

**SOLOS RESIDUAIS DE ROCHAS GRANITÓIDES
A SUL DO TEJO**

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS

ISABEL MARIA RATOLA DUARTE

142232

Dissertação apresentada à Universidade de Évora
para obtenção do grau de Doutor em Geologia

**UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ÉVORA, 2002**

Ao João, meu filho, que é também o estímulo e a maior recompensa do meu esforço pessoal e empenhamento profissional.

Ao António, meu companheiro, amigo e colega, porque é fundamental o amor, a amizade e... a paciência.

AGRADECIMENTOS

A autora deseja expressar a sua gratidão a todas as pessoas e entidades que, de variadas formas, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Fernando Lage Ladeira, agradeço o tema proposto, o qual, logo de início, suscitou grande interesse e entusiasmo. Agradeço a orientação e a revisão crítica da dissertação, para além do incentivo e optimismo constantes, a disponibilidade imediata e as sugestões pertinentes, assim como a cedência de meios e bibliografia indispensáveis à concretização dos objectivos propostos.

Ao saudoso Professor Doutor Francisco Gonçalves, estou grata pela preciosa ajuda no reconhecimento de campo, no que se refere ao enquadramento geológico do Alentejo e à identificação e caracterização geológica dos principais maciços granítoides. Apesar de já não se encontrar entre nós, a energia e alegria contagiantes permanecem na memória e, a sua postura académica e humana constituem referência importante para mim.

Ao Professor Doutor Celso Figueiredo Gomes, agradeço as facilidades concedidas na realização dos ensaios de caracterização química e mineralógica das amostras. Os seus ensinamentos e sugestões na área, a disponibilidade e interesse demonstrados, para além dos seus conselhos, sempre sensatos e amigos, constituem motivo de reconhecimento.

Ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, em especial aos docentes e funcionários que facultaram a realização de alguns ensaios nos seus laboratórios, e em particular aos Engenheiros Geólogos, José Alves e Daniel Martins, a colaboração na realização dos ensaios de corte nas amostras de grande dimensão, a todos o meu muito obrigado.

À empresa Geotécnica da Ria, a cedência dos meios técnicos e humanos para a realização dos ensaios penetrométricos *in situ*. Em particular agradeço o cuidado e o empenhamento incansáveis do Engenheiro Abílio Nogueira, na execução destes ensaios.

Ao Centro de Estudos de Geologia e Geotecnica de Santo André (CEGSA), na pessoa do seu Director, Engenheiro Alberto Silva, a cedência das instalações e apoio técnico na realização dos ensaios triaxiais, ao abrigo do protocolo entre o CEGSA e a Universidade de Évora. Ao Sr. Ramalhete, Sr. Carvalho, e a todos os funcionários do CEGSA em geral, o meu reconhecimento pela colaboração prestada.

À BRISA S.A., em particular aos Engenheiros Ernesto Domingues, Carlos Biscaia e Paulo Limede e à Doutora Susana Reis, agradeço o fornecimento de dados geotécnicos relativos aos solos residuais interessados pela A6 – Autoestrada Marateca/Elvas.

Ao Instituto para a Conservação e Exploração da Rede Rodoviária (ICERR), em especial ao Doutor Carlos Mata e à Engenheira Anabela Namorado, estou grata pelo apoio prestado na pesquisa de relatórios geológicos e geotécnicos.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Geociências em particular, e da Universidade de Évora em geral, que, directa ou indirectamente contribuíram para a realização desta tese. O meu agradecimento especial à Sandra Cruz e Celeste Travessa, técnicas do Laboratório de

Geociências da Universidade de Évora, pela eficiente, amável e bem disposta colaboração na recolha de amostras, preparação de solos e assistência nos ensaios laboratoriais. Aos Engenheiros de Recursos Geológicos Maria José Mata, Elisabete Caixeiro, Rosária Guelas e Francisco Rosa, agradeço o auxílio prestado na colheita de amostras e na realização de alguns ensaios de caracterização geotécnica.

Finalmente, mas não menos importante, o meu terno e grande agradecimento à família e amigos que me apoiaram, com palavras e acções, tornando possível e mais leve esta caminhada, e sem os quais teria sido difícil chegar a bom termo.

RESUMO

O presente trabalho visa essencialmente contribuir para o conhecimento das características geológicas e geotécnicas dos solos residuais de rochas granítóides do Alentejo, no Sul de Portugal, assim como, dos principais factores que condicionam essas características. Existem poucos estudos sobre os granítóides da região, que no entanto, se encontram enquadrados nas zonas paleogeográficas e tectónicas com maior representação em Portugal, a Zona de Ossa Morena (ZOM) e a Zona Centro Ibérica (ZCI). A sua cronologia, química e mineralogia é comparável com a de outros granítóides existentes na Península Ibérica, e está de acordo com a sua localização em relação às referidas zonas e respectivos limites.

Estas rochas granítóides foram e são sujeitas a alteração, principalmente por parte dos agentes atmosféricos que, na região do Alentejo Interior assumem um papel de realce, porque as condições climatéricas distinguem-se significativamente das que predominam na restante área do território português. A própria geomorfologia, típica desta região, associada a uma certa escassez de coberto vegetal, deixando expostas (menos protegidas) as formações rochosas, conduz à produção de solos residuais com características químicas, mineralógicas, texturais e geotécnicas próprias da região, que se distinguem dos perfis de solos residuais de rochas graníticas (s.l.) existentes no Norte e Centro do País.

A opção por um estudo sistemático dos solos residuais das rochas graníticas (s.l.), (granitos, granodioritos e quartzodioritos), com importância regional a sul do Tejo, deve-se, em grande parte, ao facto de não existir nenhum estudo sobre este tipo de solos em toda esta região. Além disso, aos solos residuais associam-se características muito peculiares, tais como a microestrutura, a macroestrutura e a composição mineralógica, que se reflectem no seu comportamento geotécnico quando solicitados *in situ* (por exemplo, como material de fundação), ou quando aplicados noutros locais (como material de construção, em aterros).

Por outro lado, a diversidade dos solos residuais estudados deve-se, não tanto à litologia da rocha de origem, mas principalmente às condições extrínsecas locais, tais como, clima, topografia, coberto vegetal, entre outros, que proporcionam diferentes tipos de alteração, e consequentemente diferentes produtos finais de alteração das rochas – os solos residuais. Na verdade, não é possível avançar a investigação de qualquer tipo de solo residual, tendo em vista a sua aplicação em geotecnia ou em qualquer outra área do saber, sem que previamente esteja perfeitamente compreendida a sua génesis, ou seja, a contribuição da geologia, dos factores climatéricos, geomorfológicos, e outros, de cuja actuação resultou esse solo.

Com o presente trabalho, reafirma-se a ideia de que a investigação de solos residuais é incompleta sem o conhecimento rigoroso das condições de campo, ou seja, dos ambientes físicos que levaram à formação dos diferentes tipos de solos residuais. Para tal, contribuíram a identificação e descrição dos perfis, os ensaios *in situ*, e os condicionalismos relacionados com a colheita de amostras.

No Capítulo 1, referem-se os principais factores e mecanismos que levam à formação dos solos residuais, descrevem-se as características gerais dos solos residuais com especial incidência nos solos resultantes de rochas granítóides, e faz-se uma breve descrição dos principais sistemas de classificação para solos residuais propostos por vários autores.

No Capítulo 2, procede-se à descrição das metodologias seguidas, no estudo dos solos residuais provenientes de 16 maciços de rochas granítóides do Alentejo, desde os processos utilizados na amostragem, aos ensaios *in situ* e no laboratório, de acordo com a bibliografia da especialidade e com as adaptações necessárias à investigação destes materiais.

A apresentação dos aspectos geológicos, condições climáticas e características geomorfológicas das áreas estudadas, faz-se no Capítulo 3, para além de uma descrição sucinta dos 62 locais de amostragem.

A caracterização química dos solos residuais e das respectivas rochas de origem dos maciços interessados, assim como a identificação mineralógica dos referidos solos, são apresentadas no Capítulo 4, onde se comentam também os dados obtidos e são indicados alguns índices de meteorização.

Os resultados de índole geotécnica provenientes da compilação de informação e resultantes dos ensaios realizados em laboratório, são expostos, sob a forma de quadros e gráficos, no Capítulo 5. Interpretam-se os valores determinados nos ensaios de: identificação (parâmetros granulométricos e limites de consistência), peso específico dos grãos, expansibilidade, permeabilidade, equivalente de areia, teor em matéria orgânica, resistência ao corte directo e triaxial, compressibilidade em célula edométrica e compactação.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados dos ensaios penetrométricos (DPL, CPT, SPT e DPSH) realizados *in situ*. Nele são interpretados os resultados obtidos e discute-se a aplicabilidade destes ensaios aos solos residuais de rochas granítóides.

Finalmente, no Capítulo 7, tecem-se as considerações finais, apresentando as principais conclusões extraídas do trabalho realizado e fazendo uma interpretação de conjunto entre as observações efectuadas no campo e os resultados experimentais, nomeadamente, de natureza química, mineralógica, estrutural e geomecânica. São indicadas sugestões para investigações a desenvolver no futuro no âmbito da temática dos solos residuais.

ABSTRACT

The present work pretends to be a contribution for the knowledge of the geological and geotechnical characteristics of the residual soils from granitic and similar rocks of the Alentejo region in the South of Portugal, as well as the main factors, which influence those characteristics. There are few studies about the granitoid rocks occurring in this region, despite their location at the more representative palaeogeographic and tectonic zones of Portugal, the Ossa Morena Zone (OMZ) and the Central Iberian Zone (CIZ). In what concerns their geochronology, chemistry and mineralogy, they are similar to other granitoids of the Iberian Peninsula.

These granitoids have been weathered mainly by the action of atmospheric agents, which have played an important role in Alentejo region, due to the fact that climactic conditions are significantly different from those prevailing in the rest of the country. The geomorphology and the shortage of vegetation, typical of this region allows the exposure of the rock masses and consequently the formation of residual soils exhibiting chemical, mineralogical, textural and geotechnical characteristics specific of this region, being different from the properties of other soil profiles developed on other granitic regions of the North and Centre of Portugal.

The reason for the election of the present systematic study of residual soils from granitoids (granites, granodiorites and quartz diorites) was due to the absence of previous studies in this matter and to the fact that the granitic outcrops are very common to the south of river Tejo. Moreover, the peculiarity of the characteristics of the residual soils such as: microstructure, macrostructure and mineralogical composition, which influence their geotechnical behaviour *in situ* (for example in foundation design), or when are used as construction material in embankments.

Otherwise, the diversity of the residual soils studied is due not much to parent rock lithology but mainly to climate, topography, vegetation, that lead to different types of weathering and consequently different weathering products – the residual soils. Indeed, is not possible to develop investigation about any kind of residual soil without the perfect knowledge about their origin, that is, the geology and the climactic and geomorphologic factors.

This work convey the idea that the investigation of residual soils is incomplete without a rigorous knowledge of field conditions like the physical environment that lead to the formation of different types of residual soils. Then, is very important the soil profile description, the field tests and a good sampling.

In Chapter 1, the main factors and mechanisms that contribute to the residual soils formation are referred. The general characteristics are described specially those about soils derived from granitoid rocks. A brief description about the principal classification systems for residual soils is presented.

In Chapter 2, the methodology followed in this study, which includes residual soils from 16 granitoid rock masses from Alentejo, is described, including the sampling methods and the field and laboratory tests.

The geological aspects, climactic conditions and geomorphological characteristics of the studied areas are presented in Chapter 3, as well as a short description of the 62 sampling sites.

The chemical characterization of residual soils and the parent rocks, as well as the mineralogical composition of the same soils, are made in Chapter 4. Comments on the results of these analytical data are made and some weathering indexes are considered.

Tables and graphs in Chapter 5 show the geotechnical data from laboratory tests. The interpretation of the results is done for several parameters: identification (grain size distribution and Atterberg limits), particle specific gravity, swelling, permeability, sand equivalent, organic matter content, shear strength (from direct shear and triaxial tests), compressibility (from oedometer test) and compaction.

The results of the *in situ* tests such as DPL, CPT, SPT and DPSH are presented in Chapter 6. Their applicability to residual soils derived from granitoids is discussed.

In Chapter 7, final remarks are made, the main conclusions of the work carried out are put forward as well as the whole interpretation and comparison between the experimental results and the field observations, namely, chemical, mineralogical, structural and geomechanical characteristics. Suggestions for future investigations are made concerning the residual soils subject.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VII
ÍNDICE GERAL.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE QUADROS.....	XXI
SIMBOLOGIA.....	XXV
ABREVIATURAS.....	XXVII

CAPÍTULO 1

1 – OS SOLOS RESIDUAIS.....	3
1.1 – Considerações gerais.....	3
1.2 – Formação dos solos residuais.....	6
1.2.1 – Tipos de alteração.....	7
1.2.2 – Mecanismos de alteração.....	9
1.2.3 – Factores que condicionam a génesis dos solos residuais.....	13
1.2.3.1 – Rocha original.....	13
1.2.3.2 – Clima.....	15
1.2.3.3 – Geomorfologia.....	16
1.2.3.4 – Coberto vegetal.....	17
1.3 – Características gerais dos solos residuais.....	18
1.4 – Descrição e classificação dos solos residuais.....	24
1.4.1 – Classificações baseadas no perfil de alteração	24
1.4.2 – Propostas recentes de classificação de solos residuais.....	28
1.5 – Os solos residuais de granítóides.....	31

CAPÍTULO 2

2 – METODOLOGIA APLICADA.....	41
2.1 – Introdução.....	41
2.2 – Recolha de dados.....	43
2.3 – Trabalhos de campo.....	43
2.3.1 – Reconhecimento geológico de superfície.....	44
2.3.2 – Métodos de amostragem.....	45
2.3.3 – Ensaios <i>in situ</i>	49
2.3.3.1 – Ensaio SPT.....	49
2.3.3.2 – Ensaio CPT.....	50
2.3.3.3 – Ensaios DP - cones penetrométricos dinâmicos.....	50
2.3.3.4 – Pesos volúmicos <i>in situ</i>	51
2.4 – Ensaios de laboratório.....	53
2.4.1 – Identificação química e mineralógica.....	53
2.4.1.1 – Espectrometria de fluorescência de raios – X (FRX).....	53
2.4.1.2 – Difracção de raios-X (DRX).....	54
2.4.2 – Caracterização geotécnica.....	55
2.4.2.1 – Ensaios de identificação.....	55
2.4.2.1.1 – Composição granulométrica.....	55

2.4.2.1.2 – Limites de consistência.....	56
2.4.2.2 – Ensaios complementares.....	57
2.4.2.2.1 – Peso específico das partículas sólidas.....	57
2.4.2.2.2 – Expansibilidade.....	58
2.4.2.2.3 – Equivalente de areia.....	58
2.4.2.2.4 – Permeabilidade.....	58
2.4.2.2.5 – Teor em matéria orgânica.....	59
2.4.2.2.6 – Compactação.....	59
2.4.2.3 – Ensaios de resistência.....	60
2.4.2.3.1 – Ensaio de corte directo.....	60
2.4.2.3.2 – Ensaio triaxial.....	62
2.4.2.4 – Ensaios de compressibilidade.....	65

CAPÍTULO 3

3 – ENQUADRAMENTO REGIONAL DAS ÁREAS DE TRABALHO.....	69
3.1 – Preâmbulo.....	69
3.2 – Localização geográfica.....	69
3.3 – Geomorfologia.....	71
3.4 – Características climáticas.....	79
3.5 – Aspectos geológicos.....	82
3.5.1 – Contexto geológico – estrutural.....	82
3.5.2 – As rochas graníticas (s.l.) a sul do Tejo.....	90
3.5.2.1 – Granitos ante-hercínicos.....	91
3.5.2.2 – Granitos hercínicos.....	92
3.6 – Descrição dos locais de amostragem.....	101
3.6.1 – Maciço eruptivo de Évora.....	102
3.6.2 – Maciço eruptivo de Arraiolos.....	104
3.6.3 – Maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.....	105
3.6.4 – Maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.....	106
3.6.5 – Maciço eruptivo do Redondo.....	106
3.6.6 – Maciço eruptivo da Vidigueira.....	107
3.6.7 – Maciço granítico de Pias.....	108
3.6.8 – Maciço granítico de Santa Eulália.....	108
3.6.9 – Maciço granítico de Elvas.....	110
3.6.10 – Maciço granítico do Vimieiro.....	110
3.6.11 – Maciço granítico de Fronteira.....	111
3.6.12 – Maciço granítico do Ervedal.....	112
3.6.13 – Maciço granítico do Gavião.....	112
3.6.14 – Maciço granítico de Portalegre.....	113
3.6.15 – Maciço granítico de Carreiras.....	113
3.6.16 – Complexo eruptivo de Nisa.....	114

CAPÍTULO 4

4 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	121
4.1 – Introdução.....	121
4.2 – Análise química das rochas e respectivos solos residuais.....	122
4.3 – Relações entre os elementos químicos maiores sob a forma de óxidos.....	124
4.4 – Índices de variação química.....	126

4.5 – Indicadores de meteorização a partir de razões moleculares.....	129
4.6 – Análise das tendências da evolução geoquímica da meteorização.....	131
4.6.1 – Índices de meteorização.....	131
4.6.2 – Diagrama de Kronberg & Nesbitt.....	135
4.7 – Identificação mineralógica.....	137

CAPÍTULO 5

5 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	145
5.1 – Considerações gerais.....	145
5.2 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora.....	146
5.2.1 – Dados compilados.....	146
5.2.2 – Resultados experimentais.....	147
5.2.2.1 – Características gerais.....	148
5.2.2.2 – Propriedades físicas.....	151
5.2.2.3 – Parâmetros de resistência.....	152
5.2.2.4 – Compressibilidade.....	156
5.3 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Arraiolos.....	160
5.3.1 – Dados compilados.....	160
5.3.2 – Resultados experimentais.....	161
5.3.2.1 – Características gerais.....	162
5.3.2.2 – Propriedades físicas.....	164
5.3.2.3 – Parâmetros de resistência.....	165
5.3.2.4 – Compressibilidade.....	167
5.4 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.....	170
5.4.1 – Dados compilados.....	170
5.4.2 – Resultados experimentais.....	172
5.4.2.1 – Características gerais.....	172
5.4.2.2 – Propriedades físicas.....	174
5.4.2.3 – Parâmetros de resistência.....	174
5.4.2.4 – Compressibilidade.....	176
5.5 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.....	179
5.5.1 – Dados compilados.....	179
5.5.2 – Resultados experimentais.....	180
5.5.2.1 – Características gerais.....	181
5.5.2.2 – Propriedades físicas.....	183
5.5.2.3 – Parâmetros de resistência.....	183
5.5.2.4 – Compressibilidade.....	185
5.6 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo do Redondo.....	188
5.6.1 – Dados compilados.....	188
5.6.2 – Resultados experimentais.....	188
5.6.2.1 – Características gerais.....	189
5.6.2.2 – Propriedades físicas.....	191
5.6.2.3 – Parâmetros de resistência.....	191
5.6.2.4 – Compressibilidade.....	193
5.7 – Solos residuais dos granitóides do complexo eruptivo da Vidigueira.....	196
5.7.1 – Dados compilados.....	196
5.7.2 – Resultados experimentais.....	197
5.7.2.1 – Características gerais.....	197
5.7.2.2 – Propriedades físicas.....	199

5.7.2.3 – Parâmetros de resistência.....	200
5.7.2.4 – Compressibilidade.....	204
5.8 – Solos residuais do maciço granítico de Pias.....	207
5.8.1 – Dados compilados.....	207
5.8.2 – Resultados experimentais.....	207
5.8.2.1 – Características gerais.....	208
5.8.2.2 – Propriedades físicas.....	209
5.8.2.3 – Parâmetros de resistência.....	210
5.8.2.4 – Compressibilidade.....	211
5.9 – Solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.....	214
5.9.1 – Dados compilados.....	214
5.9.2 – Resultados experimentais.....	216
5.9.2.1 – Características gerais.....	217
5.9.2.2 – Propriedades físicas.....	219
5.9.2.3 – Parâmetros de resistência.....	220
5.9.2.4 – Compressibilidade.....	221
5.10 – Solos residuais do maciço granítico de Elvas.....	224
5.10.1 – Dados compilados.....	224
5.10.2 – Resultados experimentais.....	224
5.10.2.1 – Características gerais.....	225
5.10.2.2 – Propriedades físicas.....	227
5.10.2.3 – Parâmetros de resistência.....	227
5.10.2.4 – Compressibilidade.....	227
5.11 – Solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.....	229
5.11.1 – Dados compilados.....	229
5.11.2 – Resultados experimentais.....	230
5.11.2.1 – Características gerais.....	230
5.11.2.2 – Propriedades físicas.....	233
5.11.2.3 – Parâmetros de resistência.....	233
5.11.2.4 – Compressibilidade.....	234
5.12 – Solos residuais do maciço granítico de Fronteira.....	238
5.12.1 – Dados compilados.....	238
5.12.2 – Resultados experimentais.....	238
5.12.2.1 – Características gerais.....	239
5.12.2.2 – Propriedades físicas.....	240
5.12.2.3 – Parâmetros de resistência.....	241
5.12.2.4 – Compressibilidade.....	241
5.13 – Solos residuais do maciço granítico de Ervedal.....	244
5.13.1 – Dados compilados.....	244
5.13.2 – Resultados experimentais.....	244
5.13.2.1 – Características gerais.....	245
5.13.2.2 – Propriedades físicas.....	246
5.13.2.3 – Parâmetros de resistência.....	247
5.13.2.4 – Compressibilidade.....	248
5.14 – Solos residuais do maciço granítico do Gavião.....	250
5.14.1 – Resultados experimentais.....	250
5.14.1.1 – Características gerais.....	250
5.14.1.2 – Propriedades físicas.....	252
5.14.1.3 – Parâmetros de resistência.....	252
5.14.1.4 – Compressibilidade.....	253

5.15 – Solos residuais do maciço granítico de Portalegre.....	256
5.15.1 – Dados compilados.....	256
5.15.2 – Resultados experimentais.....	257
5.15.2.1 – Características gerais.....	258
5.15.2.2 – Propriedades físicas.....	259
5.15.2.3 – Parâmetros de resistência.....	260
5.16 – Solos residuais do maciço granítico de Carreiras.....	262
5.16.1 – Dados compilados.....	262
5.16.2 – Resultados experimentais.....	262
5.16.2.1 – Características gerais.....	263
5.16.2.2 – Propriedades físicas.....	264
5.16.2.3 – Parâmetros de resistência.....	265
5.16.2.4 – Compressibilidade.....	266
5.17 – Solos residuais dos granitos do complexo eruptivo de Nisa.....	269
5.17.1 – Dados compilados.....	269
5.17.2 – Resultados experimentais.....	270
5.17.2.1 – Características gerais.....	271
5.17.2.2 – Propriedades físicas.....	273
5.17.2.3 – Parâmetros de resistência.....	273
5.17.2.4 – Compressibilidade.....	277

CAPÍTULO 6

6 – ENSAIOS GEOTÉCNICOS <i>IN SITU</i>	283
6.1 – Ensaios de laboratório <i>versus</i> ensaios <i>in situ</i>	283
6.2 – Ensaios penetrométricos.....	283
6.2.1 – Ensaio SPT.....	284
6.2.2 – Ensaio CPT.....	286
6.2.3 – Ensaios DP - cones penetrométricos dinâmicos.....	287
6.3 – Ensaios <i>in situ</i> e solos residuais.....	289
6.3.1 – O SPT e os solos residuais.....	291
6.3.2 – O CPT e os solos residuais.....	292
6.3.3 – O DP e os solos residuais.....	293
6.3.4 – Correlações entre ensaios de penetração em solos residuais.....	293
6.4 – Dados compilados.....	296
6.5 – Ensaios realizados.....	297
6.6 – Apresentação e análise dos resultados obtidos.....	299
6.6.1 – Maciço granítóide de Évora.....	300
6.6.2 – Maciço granítóide de Arraiolos.....	301
6.6.3 – Maciço granítóide de Reguengos de Monsaraz.....	302
6.6.4 – Maciço granítóide do Redondo.....	302
6.6.5 – Complexo granítóide da Vidigueira.....	303
6.6.6 – Maciço granítico de Pias.....	304
6.6.7 – Maciço granítico de Santa Eulália.....	305
6.6.8 – Maciço granítico do Vimieiro.....	306
6.6.9 – Maciço granítico de Fronteira.....	307
6.6.10 – Maciço granítico do Ervedal.....	308
6.6.11 – Complexo Eruptivo de Nisa.....	309
6.7 – Conclusões preliminares.....	312

CAPÍTULO 7

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	317
7.1 – Perfis de alteração e locais de amostragem.....	317
7.2 – Geoquímica e mineralogia.....	319
7.3 – Características geotécnicas.....	322
7.4 – Ensaios geotécnicos <i>in situ</i>	331
7.5 – Conclusões gerais.....	334
7.6 – Perspectivas de investigação futuras.....	340
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	345

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – OS SOLOS RESIDUAIS

Figura 1.1 – Perfil de alteração típico de um solo residual (adaptado de Little, 1969).	6
Figura 1.2 – Processos de alteração física (adaptado de Anon, 1995).	11
Figura 1.3 – Influência da zonalidade climática do globo na formação dos minerais de argila (adaptado de Uehara, 1982).	16
Figura 1.4 – Evolução do índice de vazios com a tensão efectiva, comparando solos estruturados com solos não-estruturados (adaptado de Anon, 1995).	22

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA APLICADA

Figura 2.1 – Esquema geral dos trabalhos desenvolvidos no âmbito desta tese.	42
Figura 2.2 – Determinação dos pesos volúmicos <i>in situ</i> pelo método do extractor.	47
Figura 2.3 – Amostras colhidas com o amostrador de Terzaghi.	47
Figura 2.4 – Colheita de amostras indeformadas utilizando amostradores.	48
Figura 2.5 – Recolha e protecção de blocos do solo residual do granodiorito do Redondo (amostra 16 – Calado).	48
Figura 2.6 – DPL _{LNEC} – manual.	52
Figura 2.7 – DPL ₁₀₀ – mecânico.	52
Figura 2.8 – Equipamento para a realização de ensaios SPT, DPSH, e CPT.	52
Figura 2.9 – Ensaio de compressão triaxial.	64

CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO REGIONAL DAS ÁREAS DE TRABALHO

Figura 3.1 – Os maciços granítóides a sul do Tejo. A região em estudo, no quadro geográfico e geológico de Portugal Continental, (adaptado da Carta Geológica de Portugal simplificada; IGM, 1999).	70
Figura 3.2 – Principais formas de relevo da área estudada: 1. peneplanície do Alentejo (posição alta); 2. peneplanície do Alentejo (posição baixa); 3. superfície da Casa Branca e Cano; 4. compartimentos levantados; 5. maciço calcário de Estremoz; 6. relevos de dureza; 7. cristas correspondentes a filões e impregnações de rochas duras (quartzitos, lítitos, etc.); 8. cobertura terciária; 9. terraços; 10. escarpas de falha; 11. escarpas de falha prováveis; 12. sistema de falhas associado ao grande filão dolerítico do Alentejo; 13. alinhamentos de vales de fractura; 14. superfícies balançadas ou flexuradas; (adaptado de Feio, 1951; Feio & Martins, 1993).	74
Figura 3.3 – Gráficos termo-pluviométricos obtidos a partir de registos de 5 Estações Climatológicas do Alentejo, correspondentes a 1951-1980. As colunas indicam os valores da precipitação média mensal em mm; R – precipitação média anual. A curva corresponde aos valores da temperatura média mensal (° C); T – temperatura média anual; Tm – temperatura máxima anual.	80
Figura 3.4 – a) Unidades tectono-estratigráficas do território português (adaptado de Oliveira <i>et al.</i> , 1992a). b) Subdivisão da ZOM em domínios segundo Oliveira <i>et al.</i> (1991): 1 – Cobertura sedimentar terciária; 2 – Faixa Blastomilonítica; 3 – Sector de Alter do Chão - Elvas; 4 – Sector de Estremoz - Barrancos, (a - Anticlinal de Estremoz e b - Sinclinal de Terena); 5 – Sector de Montemor - Ficalho, (a - Sinclinal de Cabrela e b - Séries proterozóicas migmatizadas); 6 – Maciço de Beja (a- Sub-sector de Santa Suzana - Odivelas); 7 – Ofiolito de Beja - Acebaches; 8 – Granítóides indiferenciados.	84
Figura 3.5 – Enquadramento geológico dos maciços granítóides em estudo, à escala 1/ 900 000 (exceto da Carta Geológica de Portugal; Oliveira <i>et al.</i> , 1992a).	86
Figura 3.6 – Imagens de alguns locais de amostragem de solos residuais de rochas granítóides a sul do Tejo, (continua).	116

Figura 3.7 – Imagens de alguns locais de amostragem de solos residuais de rochas granítóides a sul do Tejo, (continua).	117
Figura 3.8 – Imagens de alguns locais de amostragem de solos residuais de rochas granítóides a sul do Tejo.....	118

CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Figura 4.1 – Diagrama de variação do tipo de meteorização segundo Kronberg & Nesbitt (1981), onde constam os valores correspondentes às amostras de rochas e solos residuais analisados.	136
Figura 4.2 – Secções dos diagramas de difracção de raios-X correspondentes aos solos residuais seleccionados entre as amostras 5 e 45.	139
Figura 4.3 – Secções dos diagramas de difracção de raios-X correspondentes aos solos residuais seleccionados entre as amostras 46 e 61.	140
Figura 4.4 – Secções dos diagramas de difracção de raios-X correspondentes aos solos residuais seleccionados entre as amostras 68 e 84.	141

CAPÍTULO 5 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Figura 5.1 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora.	148
Figura 5.2 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora.	149
Figura 5.3 – Curvas-tipo de ensaios de corte directo e inverso, em amostras indeformadas dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Évora.	153
Figura 5.4 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, nas amostras indeformadas dos solos residuais dos granítóides do maciço de Évora.	154
Figura 5.5 – Curvas de tensão de desvio <i>versus</i> extensão axial e de variação volumétrica <i>versus</i> extensão axial do ensaio triaxial-UU em amostras não saturadas do solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Évora.	156
Figura 5.6 – Envolvente de rotura do ensaio triaxial-UU do solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Évora.	156
Figura 5.7 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos efectuados em amostras indeformadas dos solos residuais granítóides do maciço eruptivo de Évora.	157
Figura 5.8 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos....	162
Figura 5.9 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.	163
Figura 5.10 – Curvas-tipo de ensaios de corte de directo e inverso em amostra indeformada dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.	166
Figura 5.11 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada dos solos residuais dos granítóides do maciço de Arraiolos.	166
Figura 5.12 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada do solo residual de um tonalito do maciço granítóide de Arraiolos.	167
Figura 5.13 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço de Montemor-o-Novo.	171
Figura 5.14 – Curvas granulométricas dos solos residuais do tonalito do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.	173
Figura 5.15 – Gráficos do ensaio de corte directo e inverso em amostra indeformada de solo residual tonalítico do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.	175
Figura 5.16 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada de solo residual tonalítico do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.	175
Figura 5.17 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada de um solo residual do maciço granítóide de Montemor-o-Novo.	176
Figura 5.18 –Classificações geotécnicas dos solos residuais de granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	180
Figura 5.19 –Curvas granulométricas dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	181

Figura 5.20 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada dos solos residuais do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	184
Figura 5.21 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada, do solo residual de um tonalito do maciço de Reguengos de Monsaraz.	185
Figura 5.22 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada de um solo residual do maciço de Reguengos de Monsaraz.	185
Figura 5.23 – Curvas granulométricas dos solos residuais dos granítoides do maciço eruptivo do Redondo.	189
Figura 5.24 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada do solo residual de um granítido do maciço eruptivo do Redondo.	192
Figura 5.25 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada dos solos residuais dos granítoides do maciço do Redondo.	192
Figura 5.26 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada de um solo residual do maciço eruptivo do Redondo.	193
Figura 5.27 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do complexo granítido da Vidigueira.	197
Figura 5.28 – Curvas granulométricas dos solos residuais do complexo granítido da Vidigueira.	198
Figura 5.29 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada dos solos residuais do complexo granítido da Vidigueira.	201
Figura 5.30 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada dos solos residuais do complexo granítido da Vidigueira.	201
Figura 5.31 – Curvas obtidas do ensaio triaxial - CU realizado no solo residual de um granítido do complexo da Vidigueira.	202
Figura 5.32 – Curvas de tensão de desvio e variação volumétrica <i>versus</i> extensão axial do ensaio triaxial-UU em amostras não saturadas do solo residual de um granítido do complexo da Vidigueira.	203
Figura 5.33 – Envolventes de rotura dos ensaios triaxiais em amostras, a) não saturadas e b) saturadas, do solo residual de um granítido do complexo da Vidigueira.	203
Figura 5.34 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos efectuados em amostras indeformadas de solo residual do complexo granítido da Vidigueira.	205
Figura 5.35 – Curva granulométrica do solo residual do granito de Pias.	208
Figura 5.36 – Gráficos do ensaio de corte directo e inverso em amostra indeformada do solo residual do granito de Pias.	210
Figura 5.37 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada do solo residual do granito de Pias.	211
Figura 5.38 – Curva de compressibilidade obtida de ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada do solo residual do maciço granítico de Pias.	212
Figura 5.39 – Classificações geotécnicas dos solos residuais graníticos de Santa Eulália.	216
Figura 5.40 – Curvas granulométricas dos solos residuais graníticos de Santa Eulália.	217
Figura 5.41 – Recta de Coulomb deduzida do ensaio de corte directo em amostras indeformadas com 400 cm ² de área, nos solos residuais de granitos de Santa Eulália.	221
Figura 5.42 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos em duas amostras, indeformada e deformada, de solo residual do maciço granítico de Santa Eulália.	222
Figura 5.43 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítico de Elvas.	225
Figura 5.44 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.	230
Figura 5.45 – Fuso granulométrico dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.	231
Figura 5.46 – Recta de Coulomb deduzida do ensaio de corte directo em provetas indeformados com 400 cm ² de área em solos graníticos do Vimieiro.	234
Figura 5.47 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos realizados em amostras de um solo residual do maciço granítico do Vimieiro.	235
Figura 5.48 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítico de Fronteira.	239

Figura 5.49 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos realizados em amostras de um solo residual do maciço granítico de Fronteira.	241
Figura 5.50 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítico de Ervedal.	245
Figura 5.51 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra remexida de solo residual do granito de Ervedal.	247
Figura 5.52 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra remexida de um solo residual do granito de Ervedal.	248
Figura 5.53 – Distribuições granulométricas dos solos residuais do granito Gavião.	251
Figura 5.54 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada de um solo residual do granito do Gavião.	253
Figura 5.55 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada de um solo residual do granito do Gavião.	253
Figura 5.56 – Curva de compressibilidade obtida de ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico do Gavião.	254
Figura 5.57 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do granito de Portalegre.	257
Figura 5.58 – Curva granulométrica do solo residual do granito de Portalegre.	258
Figura 5.59 – Gráficos do ensaio de corte de directo numa amostra remoldada do solo residual do granito de Portalegre.	260
Figura 5.60 – Recta de Coulomb obtida do ensaio de corte directo em amostra remoldada do solo residual do granito de Portalegre.	260
Figura 5.61 – Curvas granulométricas dos solos residuais do granito de Carreiras.	263
Figura 5.62 – Gráficos do ensaio de corte directo e inverso numa amostra indeformada do solo residual do granito de Carreiras.	265
Figura 5.63 – Rectas de Coulomb obtidas do ensaio de corte directo e inverso em amostra indeformada do solo residual do granito de Carreiras.	266
Figura 5.64 – Curva de compressibilidade obtida de ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de solo residual do granito de Carreiras.	267
Figura 5.65 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do complexo granítico de Nisa.	270
Figura 5.66 – Curvas granulométricas dos solos residuais do complexo granítico de Nisa.	271
Figura 5.67 – Gráficos dos ensaios de corte de directo e inverso em amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.	274
Figura 5.68 – Rectas de Coulomb obtidas dos ensaios de corte directo e inverso em amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.	275
Figura 5.69 – Curvas dos ensaios triaxiais a) CU e b) UU, em amostras remoldadas de solo residual do granito de Marvão do complexo eruptivo de Nisa.	276
Figura 5.70 – Envolventes de rotura dos ensaios triaxiais em amostras a) não saturadas e b) saturadas, do solo residual do granito de Marvão do complexo eruptivo de Nisa.	277
Figura 5.71 – Curvas de compressibilidade respeitantes a amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.	278

CAPÍTULO 6 – ENSAIOS GEOTÉCNICOS *IN SITU*

Figura 6.1 – Resultados de ensaios DPL, realizados nos solos residuais de granítóides do Alentejo.	296
Figura 6.2 – Relação entre os resultados de SPT e a percentagem de ensaios por estudo coligido.	298
Figura 6.3 – Variação de N_{SPT} com a profundidade (resultados relativos à A6).	298
Figura 6.4 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Évora.	300
Figura 6.5 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Arraiolos.	301
Figura 6.6 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica no solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	302
Figura 6.7 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um granodiorito do maciço eruptivo do Redondo.	303

Figura 6.8 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um granito do complexo granítico da Vidigueira.	303
Figura 6.9 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual do maciço granítico de Pias.	304
Figura 6.10 – Gráficos resultantes do ensaio de penetração estática realizado no solo residual do maciço granítico de Pias.	305
Figura 6.11 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais dos granitos de S.Eulália.	306
Figura 6.12 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais dos granitos do Vimieiro.	307
Figura 6.13 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais do granito de Fronteira.	308
Figura 6.14 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais do granito de Ervedal.	309
Figura 6.15 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual do granito de Marvão.	310
Figura 6.16 – Resultados do ensaio de penetração estática realizado no solo residual do maciço granítico de Marvão.	311
Figura 6.17 – Relação entre N_{SPT} e N_{DPSH} verificada no solo residual do granito de Marvão.	312

CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Figura 7.1 – Variação do índice de vazios (e_0) em função do peso volúmico seco <i>in situ</i> (γ_d), dos solos residuais granítoides.	322
Figura 7.2 – Relação entre os valores do limite de liquidez determinados pelo método de Casagrande (w_L) e pelo método do cone penetrométrico (w_{Lc}).	324
Figura 7.3 – Variação do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx.}$) em função do teor em água óptimo ($w_{ópt.}$), em solos residuais dos granítoides.	326

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 1 – OS SOLOS RESIDUAIS

Quadro 1.1 – Classificação dos graus de alteração (Little, 1969).	26
Quadro 1.2 – Comparação entre descrições de perfis de alteração.	27
Quadro 1.3 – Classificação e características dos grupos de solos residuais (segundo Wesley & Irfan (1996) e adaptado de Blight, 1997).	30

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA APLICADA

Quadro 2.1 – Áreas aproximadas dos maciços eruptivos a que correspondem os solos residuais estudados.	41
Quadro 2.2 – Características dos penetrómetros dinâmicos utilizados.	51
Quadro 2.3 – Tipo e quantidade de ensaios de laboratório realizados para esta tese.	53

CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO REGIONAL DAS ÁREAS DE TRABALHO

Quadro 3.1 – Valores de precipitação média anual (R) obtidos em estações udométricas referentes às áreas em estudo, no período 1951-1980, e respectiva altitude do local (Hs).	81
---	----

CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Quadro 4.1 – Composição química de amostras de rocha sã (r.s.).	122
Quadro 4.2 – Composição química de amostras de solos residuais (s.r.).	123
Quadro 4.3 – Valores das razões entre elementos maiores sob a forma de óxidos no solo residual (s.r.) e na rocha sã (r.s.).	124
Quadro 4.4 – Valores das razões entre elementos maiores sob a forma de óxidos no solo residual (s.r.) e na rocha sã (r.s), depois de corrigidos (Short, 1961).	125
Quadro 4.5 – Índices de variação química na rocha sã (r.s.).	127
Quadro 4.6 – Índices de variação química nos solos residuais (s.r.).	127
Quadro 4.7 – Índices de alteração química simples.	128
Quadro 4.8 – Razões moleculares na rocha sã.	129
Quadro 4.9 – Razões moleculares nos solos residuais.	130
Quadro 4.10 – Razões moleculares utilizadas como índices de alteração química (Onodera <i>et al.</i> , 1974).	131
Quadro 4.11 – Índices de meteorização na rocha sã (r.s.).	132
Quadro 4.12 – Índices de meteorização avaliados no solo residual (s.r.).	133
Quadro 4.13 – Razões moleculares de Kronberg & Nesbitt (1981), aplicadas às rochas e solos residuais estudados.	137

CAPÍTULO 5 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Quadro 5.1 – Tipo e número de ensaios laboratoriais compilados de estudos geológico-geotécnicos relativos aos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora.	146
Quadro 5.2 – Intervalos de variação das características geotécnicas compiladas, referentes a solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora.	147
Quadro 5.3 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Évora.	149
Quadro 5.4 – Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítico de Évora.	151
Quadro 5.5 – Parâmetros de resistência ao corte directo e inverso em amostras indeformadas e remexidas dos solos residuais do maciço granítico de Évora.	154

Quadro 5.6 –	Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial-UU, em provetes não saturados, do solo residual de um quartzodiorito do maciço de Évora.	155
Quadro 5.7 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, das amostras indeformadas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora submetidas ao ensaio edométrico.	157
Quadro 5.8 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos dos ensaios edométricos dos solos residuais mais finos do maciço granítóide de Évora.	158
Quadro 5.9 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE ÉVORA.	159
Quadro 5.10 –	Tipo e número de ensaios laboratoriais compilados de estudos geotécnicos, relativos aos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Arraiolos.	160
Quadro 5.11 –	Intervalos de variação das características compiladas, correspondentes aos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.	161
Quadro 5.12 –	Características gerais dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.	163
Quadro 5.13 –	Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.	165
Quadro 5.14 –	Parâmetros de resistência ao corte directo e inverso em amostras indeformadas e remexidas dos solos residuais dos granítóides do maciço de Arraiolos.	167
Quadro 5.15 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual de um tonalito do maciço eruptivo de Arraiolos, submetida ao ensaio edométrico.	168
Quadro 5.16 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual de um tonalito do maciço eruptivo de Arraiolos.	168
Quadro 5.17 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE ARRAIOLOS.	169
Quadro 5.18 –	Tipo e número de ensaios laboratoriais compilados, relativos aos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.	170
Quadro 5.19 –	Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.	170
Quadro 5.20 –	Características gerais dos solos residuais do maciço tonalítico de Montemor-o-Novo.	172
Quadro 5.21 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual do quartzodiorítico de Montemor-o-Novo, submetida ao ensaio edométrico.	177
Quadro 5.22 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual do quartzodiorítico de Montemor-o-Novo.	177
Quadro 5.23 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE MONTEMOR – O – NOVO.	178
Quadro 5.24 –	Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais de granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	179
Quadro 5.25 –	Características gerais dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	181
Quadro 5.26 –	Propriedades físicas dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	183
Quadro 5.27 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	186
Quadro 5.28 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaios edométrico do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.	186
Quadro 5.29 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE REGUENGOS De MONSARAZ.	187
Quadro 5.30 –	Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais do maciço eruptivo do Redondo.	188
Quadro 5.31 –	Características gerais dos solos residuais do maciço eruptivo do Redondo.	190
Quadro 5.32 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo do Redondo.	194

Quadro 5.33 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo do Redondo.	194
Quadro 5.34 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DO REDONDO.	195
Quadro 5.35 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.	196
Quadro 5.36 – Características gerais dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira....	198
Quadro 5.37 – Propriedades físicas dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.....	200
Quadro 5.38 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial do tipo consolidado não drenado (CU) em amostra remoldada do solo residual de um granítóide da Vidigueira.	202
Quadro 5.39 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial-UU, em provetes não saturados, do solo residual de um granítóide do complexo da Vidigueira.	203
Quadro 5.40 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de amostras indeformadas de solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.	205
Quadro 5.41 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaios edométrico dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.	205
Quadro 5.42 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO COMPLEXO ERUPTIVO DA VIDIGUEIRA.	206
Quadro 5.43 – Características coligidas, dos solos residuais do granito de Pias.	207
Quadro 5.44 – Características gerais do solo residual do granito de Pias.	208
Quadro 5.45 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada de solo residual do maciço granítico de Pias.	212
Quadro 5.46 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaios edométrico do solo residual do maciço granítico de Pias.	212
Quadro 5.47 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO RESIDUAL DO MACIÇO GRANÍTICO DE PIAS.	213
Quadro 5.48 – Tipo e número de ensaios laboratoriais coligidos, relativos aos solos residuais dos granitos do maciço eruptivo de Santa Eulália.	215
Quadro 5.49 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.	215
Quadro 5.50 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.	218
Quadro 5.51 – Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.	219
Quadro 5.52 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada e outra deformada de um solo residual do maciço granítico de Santa Eulália.	222
Quadro 5.53 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual cinzento do maciço granítico de Santa Eulália.	222
Quadro 5.54 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE SANTA EULÁLIA.	223
Quadro 5.55 – Características coligidas relativas aos solos residuais do granito de Elvas.	224
Quadro 5.56 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Elvas.	226
Quadro 5.57 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE ELVAS.	228
Quadro 5.58 – Características coligidas dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.	229
Quadro 5.59 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.	232
Quadro 5.60 – Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.	233
Quadro 5.61 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada e duas deformadas de um solo residual do maciço granítico do Vimieiro.	235
Quadro 5.62 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico em amostras de um solo residual do maciço granítico do Vimieiro.	236
Quadro 5.63 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DO VIMIEIRO.	237
Quadro 5.64 – Características coligidas dos solos residuais do granito de Fronteira.	238
Quadro 5.65 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Fronteira.	240

Quadro 5.66 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada e de outra deformada de um solo residual do maciço granítico de Fronteira.	242
Quadro 5.67 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostras de um solo residual do maciço granítico de Fronteira.	242
Quadro 5.68 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE FRONTEIRA.	243
Quadro 5.69 –	Características coligidas dos solos residuais do granito de Ervedal.	244
Quadro 5.70 –	Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Ervedal.	246
Quadro 5.71 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE ERVEDAL.	249
Quadro 5.72 –	Características gerais dos solos residuais do maciço granítico do Gavião.	251
Quadro 5.73 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico do Gavião submetida ao ensaio edométrico.	254
Quadro 5.74 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico do Gavião.	254
Quadro 5.75 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DO GAVIÃO.	255
Quadro 5.76 –	Resumo dos dados coligidos dos solos residuais do granito de Portalegre.	256
Quadro 5.77 –	Características gerais do solo residual do maciço granítico de Portalegre.	259
Quadro 5.78 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO RESIDUAL DO MACIÇO GRANÍTICO DE PORTALEGRE.	261
Quadro 5.79 –	Resumo dos dados coligidos dos solos residuais do granito de Carreiras.	262
Quadro 5.80 –	Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Carreiras.	264
Quadro 5.81 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada de um solo residual do granito de Carreiras, submetida ao ensaio edométrico.	267
Quadro 5.82 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de solo residual do maciço granítico de Carreiras.	267
Quadro 5.83 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE CARREIRAS.	268
Quadro 5.84 –	Resumo dos dados coligidos correspondentes aos solos residuais dos granitos do Complexo Eruptivo de Nisa – CEN.	270
Quadro 5.85 –	Características gerais dos solos residuais dos granitos do complexo de Nisa.	272
Quadro 5.86 –	Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial do tipo consolidado não drenado (CU), em amostra remoldada de solo residual do granito de Marvão (Nisa).	275
Quadro 5.87 –	Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial-UU, em amostras não saturadas de solo residual do granito de Marvão (Nisa).	276
Quadro 5.88 –	Parâmetros físicos, iniciais e finais, de amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa, submetidas ao ensaio edométrico.	278
Quadro 5.89 –	Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.	279
Quadro 5.90 –	QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITOS DO COMPLEXO ERUPTIVO DE NISA.	280

CAPÍTULO 6 – ENSAIOS GEOTÉCNICOS *IN SITU*

Quadro 6.1 –	Ensaios de resistência para solos <i>in situ</i> (adaptado de Blight, 1997).	290
Quadro 6.2 –	Comparação entre vários métodos testados <i>in situ</i> em solos residuais, segundo Chang (1988) <i>in</i> Viana da Fonseca (1996).	291
Quadro 6.3 –	Correlações entre o CPT e o SPT (adaptado de Danziger <i>et al.</i> 1998).	294
Quadro 6.4 –	Número e tipo de ensaios <i>in situ</i> por local de amostragem.	299
Quadro 6.5 –	Dados obtidos dos ensaios de penetração dinâmica no solo residual de Marvão....	311

SIMBOLOGIA

a_v	- coeficiente de compressibilidade
A	<ul style="list-style-type: none"> - área - secção transversal do provete - secção da ponteira (no penetrómetro) - parâmetro de pressão neutra de Skempton
A_f	- parâmetro de pressão neutra de Skempton na rotura
Ac	- actividade coloidal do solo
An	- Anortite
B	<ul style="list-style-type: none"> - parâmetro de pressão neutra de Skempton - massa do batente
c	- coesão aparente
c'	- coesão em termos de tensões efectivas
c_{cu}	- coesão em termos de tensões totais; resistência ao corte não drenado do solo saturado e consolidado
c_u	<ul style="list-style-type: none"> - coesão em termos de tensões totais; resistência ao corte não drenado do solo não saturado - coeficiente de consolidação
C_c	- índice de compressibilidade
C_s	- índice de expansibilidade
Cc	- coeficiente de curvatura
Cu	<ul style="list-style-type: none"> - coeficiente de uniformidade granulométrica - resistência ao corte não drenado
CID	- ensaio triaxial consolidado isotropicamente com compressão drenada
CIU	- ensaio consolidado isotropicamente com compressão não drenada
d_{hkl}	- espaçamento dos planos cristalográficos
D	- diâmetro
D_n	<ul style="list-style-type: none"> - (D_{10}, ... D_{50}, ..., D_{85}), diâmetro das partículas de um solo, para o qual n % das partículas desse solo apresentam diâmetros menores
e	- penetração unitária (nos penetrómetros dinâmicos)
e	- índice de vazios
e_i	- índice de vazios inicial
e_{f1}	<ul style="list-style-type: none"> - índice de vazios no final do escalão de carga (incremento de tensão no ensaio edométrico)
e_{f2}	<ul style="list-style-type: none"> - índice de vazios no final do escalão de descarga (alívio de tensão no ensaio edométrico)
e_o	- índice de vazios no estado natural
E	- módulo de deformabilidade
Eh	- potencial redox (ou potencial de oxidação-redução)
Es	- energia específica por pancada (nos penetrómetros dinâmicos)
Eti	- módulo de deformabilidade tangente inicial
EA	- equivalente de areia
Exp	- expansibilidade
fs	- resistência de atrito lateral (no ensaio CPT)
Fr	- razão de fricção (no ensaio CPT)
g	- aceleração da gravidade
h	<ul style="list-style-type: none"> - diferença de carga hidráulica entre os extremos da amostra (no permeâmetro) - espessura média por superfície de drenagem (no ensaio edométrico)

H	- altura
	- altura de queda do pilão (nos penetrómetros dinâmicos)
Hs	- altitude do local
I _P	- índice de plasticidade
I _{PC}	- índice de plasticidade calculado a partir do limite de liquidez determinado com o cone penetrométrico BS
I _C	- índice de consistência
I _L	- índice de liquidez
k	- coeficiente de permeabilidade
K ₀	- coeficiente de impulso em repouso
L	- comprimento do provete
m _v	- coeficiente de compressibilidade volumétrica
M	- massa (de um pilão de um penetrómetro dinâmico)
MO	- teor em matéria orgânica
n	- número inteiro
n	- porosidade
N	- número de pancadas necessárias para penetrar uma determinada profundidade padronizada num ensaio penetrométrico dinâmico (N _{DPL} ; N _{DPSH} ; N _{SPT})
NP	- não plástico
NR	- não realizável
pH	- potencial de hidrogénio
ppm	- partes por milhão
PF	- percentagem de finos (partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm)
qc	- resistência de ponta
R	- precipitação média anual
Rd	- resistência à penetração dinâmica
Rp	- resistência à penetração do terreno
Rt	- resistência total
S	- grau de saturação
t	- tempo
t ₉₀	- tempo correspondente a 90 % da consolidação primária
T	- temperatura média anual
Tm	- temperatura máxima anual.
u _a	- pressão devida ao ar nos poros do solo
u _w	- pressão devida à água nos poros do solo
UU	- ensaio triaxial não consolidado, não drenado, em amostras não saturadas
v	- massa de cada vara
V	- volume de água que atravessa o provete no intervalo de tempo t (no permeâmetro)
w	- teor em água
w _f	- teor em água final
w _i	- teor em água inicial
w _L	- limite de liquidez
w _{LC}	- limite de liquidez determinado com o cone penetrométrico BS
w _P	- limite de plasticidade
w _R	- limite de retracção
w _{ópt}	- teor em água óptimo
w _o	- teor em água no estado natural
β	- índice de lixiviação
Δ	- incremento finito
ΔL	- variação do comprimento de uma amostra

ΔV	- variação de volume
ε_a	- deformação (extensão) axial
ϕ	- ângulo de atrito
ϕ'	- ângulo de atrito em termos de tensões efectivas
ϕ_{cu}	- ângulo de atrito em termos de tensões totais; resistência ao corte não drenado do solo saturado e consolidado
ϕ_u	- ângulo de atrito em termos de tensões totais; resistência ao corte não drenado do solo não saturado
ϕ_{CD}	- ângulo de atrito determinado no ensaio de corte directo
ϕ_T	- ângulo de atrito determinado no ensaio triaxial
γ	- peso volúmico
γ_d	- peso volúmico no estado seco
$\gamma_{dmáx}$	- peso volúmico seco máximo
γ_s	- peso específico das partículas sólidas
γ_w	- peso específico da água
γ_o	- peso volúmico no estado natural
λ	- comprimento de onda da radiação incidente (DRX)
θ	- ângulo de difracção (DRX)
σ	- tensão total
σ'	- tensão efectiva
σ_c	- tensão confinante
σ'_p	- tensão de pré-consolidação “virtual”
σ'_v	- tensão vertical efectiva
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	- tensões principais
#	- abertura da malha do peneiro número...

ABREVIATURAS

A	- Autoestrada
AASHTO	- “American Association of State Highway and Transportation Officials”
ASTM	- “American Society for Testing and Materials”
BS	- “British Standards”
Cap.	- Capítulo
CBR	- “California Bearing Ratio”
CEGSA	- Centro de Estudos de Geologia e Geotecnica de Santo André
CEN	- Complexo Eruptivo de Nisa
CIA	- “Chemical Index of Alteration”
CIW	- “Chemical Index of Weathering”
CMDE	- Carta de Materiais do Distrito de Évora
CMDB	- Carta de Materiais do Distrito de Beja
CMDP	- Carta de Materiais do Distrito de Portalegre
def.	- deformada (amostra)
DMT	- dilatómetro de Marchetti
CPMS	- Complexo Plutónico de Monforte - Santa Eulália
CPT	- Cone Penetration Test

CXG	- Complexo Xisto-Grauváquico
DECHAF	- “degree of chemical absolute freshness”
DIN	- “Deutsche Industrie Normen”
DP	- “Dynamic Probing”
DPL	- “Dynamic Penetration Light”
DPH	- “Dynamic Penetration Heavy”
DPM	- “Dynamic Penetration Medium”
DPSH	- “Dynamic Penetration Superheavy”
DRX	- difracção de raios-X
EM	- estrada municipal
EN	- estrada nacional
eq.	- equação
Fig.	- Figura
FAO	- “Food and Agriculture Organization of the United Nations”
FRX	- espectrometria de fluorescência de raios-X
GCO	- “Geotechnical Control Office”
IAEG	- “International Association of Engineering Geology”
ind.	- indeformada (amostra)
inf.	- inferior
I_{mob}	- “Mobiles index”
IA	- índice de alteração de Parker
IC	- Itinerário Complementar
ICERR	- Instituto para a Conservação e Exploração da Rede Rodoviária
IGM	- Instituto Geológico e Mineiro
INMG	- Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
IP	- Itinerário Principal
ISRM	- “International Society of Rock Mechanics”
ISSMFE	- “International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering”
JAE	- Junta Autónoma de Estradas
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Ma	- milhões de anos
Mac.	- Maciço
Máx.	- valor máximo
Méd.	- valor médio
MI	- Maciço Ibérico
Min.	- valor mínimo
MWPI	- “Modified Weathering Potencial Index”
NP	- Norma Portuguesa
PI	- “Product Index” (ou direcção de meteorização)
PLT	- ensaio de carga com placa
PMT	- ensaio com o pressiómetro de Ménard
P.R.	- perda ao rubro
PS	- perfis de refracção sísmica
PW	- “Partially Weathered”
RS	- “Residual Soil”
r.s.	- rocha sã
s.l.	- em sentido lato
s.r.	- solos residuais
s.s.	- em sentido estrito
SPT	- “Standard Penetration Test”

sup.	- superior
UA	- Universidade de Aveiro
UE	- Universidade de Évora
USCS	- “Unified Soil Classification System”
UW	- “Unweathered Rock”
v.g.	- vértice geodésico
V	- “Vogt ratio”
WI	- “Weathering Index”
WPI	- “Weathering Potencial Index”
WWPI	- razão entre o “Product Index” (PI) no solo residual e na rocha sã
ZCI	- Zona Centro Ibérica
ZCPE	- Zona de Cisalhamento de Portalegre – Esperança
ZCPTBC	- Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Badajoz-Cordoba
ZOM	- Zona de Ossa Morena
<i>et al.</i>	- <i>et alii</i> (e outros)
<i>e.g.</i>	- <i>exempli gratia</i> (por exemplo)

CAPÍTULO 1

OS SOLOS RESIDUAIS

1 – OS SOLOS RESIDUAIS

1.1 – Considerações gerais

O conceito de solo residual varia de país para país, e até mesmo entre autores de uma região, pois foi sofrendo evolução e algumas adaptações ao longo dos anos, de acordo com a zona do globo em que se insere este tipo de solos. De qualquer modo, e segundo Blight (1997), uma razoável definição geral reúne consenso: “*solo residual é o material resultante da alteração da rocha-mãe e que nunca foi transportado do seu local de origem*”.

Os solos residuais estão distribuídos por muitas regiões do mundo, tais como: África, o sul da Ásia, Austrália, parte sudeste da América do Norte, América Central e respectivas ilhas, América do Sul e regiões consideráveis da Europa. As maiores áreas e espessuras destes solos ocorrem normalmente em regiões tropicais húmidas, tais como: Brasil, Ghana, Malásia, Nigéria, Sul da Índia, Srilanka, Singapura e Filipinas (Brand & Phillipson, 1985). Apesar de ocuparem uma grande percentagem da superfície da Terra, e serem largamente envolvidos em trabalhos de engenharia, nem sempre receberam a atenção devida por parte dos investigadores. Isto deve-se em parte ao facto de os locais onde os solos residuais desenvolvem perfis mais espessos se situarem em regiões quentes e húmidas onde as condições são favoráveis à rápida alteração das rochas e evolução dos solos, mas em que o avanço tecnológico é lento (Kwan, 1981), de que são exemplos a África, América Central, Índia, etc. No entanto, recentemente, a partir dos anos 80, tem-se assistido ao aparecimento de numerosos trabalhos, referentes quer aos designados “solos residuais tropicais” (e.g. no Brasil e em Singapura), quer aos solos residuais formados em regiões de clima subtropical (e.g. em Hong Kong e na África do Sul), ou mesmo temperado (e.g. na Europa, na Turquia, na Austrália e na América do Norte), como consequência da maior solicitação destes solos por obras de Engenharia e devido a um maior avanço tecnológico, nestes últimos anos.

O estado actual dos conhecimentos a nível internacional, está devidamente referenciado na literatura da especialidade consultada para este trabalho. No entanto, destacam-se aqui os principais trabalhos portugueses realizados no âmbito dos solos residuais, fundamentalmente de rochas graníticas, que apesar de poucos, contribuíram para um avanço significativo no conhecimento deste tipo de solos, localizados principalmente no Norte e Centro do País. Assim sendo, é importante referir as publicações seguintes: Novais Ferreira (1985); Cardoso (1986); Teixeira Duarte (1986); Novais Ferreira *et al.* (1988); Begonha (1989); Santos (1995); Viana da Fonseca (1988, 1991, 1993, 1996, 1998, 2000a, b, c); Duarte *et al.* (1995, 2000); Lemos *et al.* (1997, 2000a, b), Martins *et al.* (1995, 2001); Pais (1998, 2000); Viana da Fonseca *et al.* (1994, 1997, 1998, 2001); Rodrigues *et al.* (2002a, b, c).

Outra atenção, menos recente, tem sido dada ao estudo da alteração das rochas, fundamentalmente graníticas: Neiva *et al.* (1950, 1965); Nascimento (1970); Delgado Rodrigues (1976, 1978); Furtado (1970, 1973, 1974, 1982); Miranda (1984, 1985, 1986); Ladeira *et al.* (1984a, b, c, 1986); Sequeira Braga (1985, 1988); Aires-Barros *et al.* (1979, 1989); Vieira e Silva (1980, 1982, 1983, 1990); Aires-Barros (1971, 1972, 1978, 1991); Sequeira Braga *et al.* (1987, 1989, 1990, 1993); Gouveia *et al.* (1993); Pereira *et al.* (1993); Delgado Rodrigues *et al.* (1994, 1996); Begonha (1989, 1991, 1997); Alves (1997), Ferreira (2000), entre outros.

Como já se referiu, o termo “solo residual” não reúne consenso em todo o mundo; Brand & Phillipson (1985) apresentam as definições provenientes de diferentes países. Na primeira

conferência internacional sobre Solos Residuais Tropicais, em Brasília (1985), foi proposta a divisão destes solos em duas classes: lateríticos e saprolíticos. Os **solos lateríticos**, são os que pertencem a um nível superior, bem drenado, onde predominam argilas do grupo da caulinite e contêm óxidos de ferro hidratados que lhes conferem uma cor avermelhada; geralmente não incluem minerais primários e a estrutura da rocha-mãe foi totalmente destruída. Os **solos saprolíticos** ou simplesmente **saprólitos**, e por vezes designados por *solo jovem* (Sandroni, 1985), são os solos residuais que mantêm a estrutura relíquia proveniente da rocha-mãe, que pertencem geralmente aos níveis depositados logo acima da rocha original, geralmente contêm pequenas quantidades de fracção argilosa e incluem minerais primários (Vargas, 1992; Bueno, Lima & Minette, 1992; Wesley & Irfan, 1997).

Enquanto os solos residuais lateríticos predominam nas regiões tropicais, entre latitudes 30° a norte e a sul do Equador, os solos saprolíticos são comuns nas regiões temperadas como Portugal, França, Turquia, Piedmont (USA), etc., ou subtropicais (Hong Kong). A formação de saprolitos relaciona-se com materiais essencialmente arenosos, incluindo minerais primários e secundários na sua componente silto-argilosa, dependendo a natureza e quantidade destes, das características da rocha-mãe e do grau de alteração atingido (Novais Ferreira, 1985). Na Europa Ocidental, os saprolitos graníticos são também designados por “*arenas*”, devido ao processo de *arenização* (alteração do tipo esquelético) a que foram submetidos os granitos (Raguin, 1957; Robert, 1966; Thénoz *et al.*, 1967; Millot, 1970; Furtado, 1970, 1974; Sarazin *et al.* 1976; Miranda, 1986; Sequeira Braga, 1988; Sequeira Braga *et al.*, 1989, 1990; Aires-Barros, 1991). Em Portugal, por vezes, também são designados por “*saibros graníticos*” (Begonha, 1989).

São estes solos saprolíticos, resultantes principalmente da meteorização física dos granitóides, pouco evoluídos do ponto de vista químico, de espessuras modestas (raramente ultrapassam 20 m) quando comparados com os das regiões tropicais onde predomina a meteorização química, que se encontram expostos em vastas áreas do Alentejo Interior. Nesta região, a taxa de erosão é considerável em relação à meteorização, e a vegetação é escassa, logo as espessuras dos solos residuais graníticos não são muito grandes; já em outras zonas do país, encontram-se “*disfarçados*” por baixo de depósitos transportados, e pontualmente podem surgir bolsadas de solo completamente desestruturado, ou depósitos de caulino, devido a intensa alteração química, causada não tanto pelo clima actual como pelo paleoclima.

O facto dos solos residuais resultarem da meteorização *in situ* das rochas, contribui para que estes solos dependam grandemente das características herdadas da rocha-mãe, nomeadamente no que respeita à mineralogia, à textura e à estrutura, factores determinantes no seu comportamento geotécnico, e que assumem maior evidência, quanto menos alterado se encontrar o solo (situação comum em regiões de clima temperado como o de Portugal).

Deste modo, os solos residuais possuem características geomecânicas diferentes dos solos transportados e redepositados. Os solos residuais são conhecidos por apresentarem grande variabilidade da dimensão e forma das partículas, do índice de vazios, dos minerais resultantes da alteração, da estrutura, etc., o que dificulta a sua caracterização em termos geotécnicos. De acordo com Vaughan *et al.* (1988), os critérios usados na Mecânica dos Solos, aplicáveis em solos sedimentares, não são apropriados para os solos residuais; mas ainda não foram desenvolvidos métodos alternativos. O que presentemente se faz, é utilizar os equipamentos e métodos convencionais, com algumas adaptações para casos pontuais, ou seja, consoante o tipo de solo residual e a situação a investigar.

Interessa salientar que enquanto os processos geológicos geradores dos solos residuais, nomeadamente os fenómenos de alteração, têm sido consideravelmente estudados, o contrário se passa, se compararmos com o estudo efectuado na determinação das propriedades geotécnicas destes solos. De forma idêntica, os métodos empíricos e semi-empíricos para previsão do seu comportamento geomecânico, estão pouco desenvolvidos.

É neste contexto que se insere o principal objectivo desta tese: **contribuir para o conhecimento das propriedades químicas, mineralógicas, físicas e principalmente geotécnicas dos solos residuais dos granítóides de clima temperado como os que se inserem na região do Sul de Portugal; a extensão da área ocupada por estes materiais, a total ausência de estudos ou trabalhos sobre esta matéria na referida região, e a solicitação dos materiais por diferentes obras de engenharia a realizar *in situ*, ou aplicados noutros locais, justificam o interesse do estudo efectuado bem como a sua continuação e aprofundamento.**

Nem sempre é contínua ou nítida a transição entre a rocha sã (inalterada), a rocha alterada (“soft rock”) e o solo residual, principalmente quando este mantém a estrutura original e apresenta um comportamento *in situ* bastante razoável (“hard soil”). Esta dificuldade em estabelecer uma fronteira entre rocha alterada e solo é posta em evidência por Lumb (1962, 1965), Howat (1985), Irfan (1996) e Ng *et al.* (2000), que estudaram os granitos alterados e respectivos saprólitos de Hong Kong; e por Arel (1998) e Arel *et al.* (2000), que tentam identificar o limite entre um granodiorito e o respectivo solo residual da Turquia. Deere & Patton (1971), consideram saprólito quando o solo contém menos de 10 %, em volume, de blocos. Sandroni (1985) estabelece que, de acordo com a prática em engenharia, rocha será o material não penetrável com o SPT.

Existem vários esquemas que ilustram perfis de alteração, mas o que melhor se adapta à alteração das rochas ígneas granítóides, e simultaneamente o mais divulgado é o de Little (1969), reproduzido na Fig. 1.1. Segundo Wesley & Irfan *in Blight* (1997), o termo solo residual necessita de clarificação, pois não está bem definido. Em qualquer processo de alteração que transforme rocha em solo, há uma transição gradual sem haver um ponto, claramente definido, no qual, o material muda de rocha para solo. No perfil da Fig. 1.1, os 3 horizontes superiores (IV, V e VI – zonas muito alteradas a completamente alteradas), tendem a comportar-se como solos, e os 3 horizontes inferiores (I, II e III) têm tendência a comportar-se como rochas. Assim o termo “solo residual”, de acordo com os mesmos autores, deve-se aplicar unicamente aos 3 horizontes superiores.

Os solos residuais constituem os produtos de alteração física e química do material rochoso, e permanecem essencialmente no mesmo nível horizontal onde existiam as rochas que lhes deram origem. Vaughan *et al.* (1988), entre outros, consideram o solo residual como o produto de alteração *in situ* da rocha subjacente, constituído por materiais relativamente brandos, motivo pelo qual o seu estudo recai normalmente no domínio da Mecânica dos Solos. E foram métodos e ensaios habitualmente usados na Mecânica dos Solos que foram utilizados para caracterizar do ponto de vista geotécnico, os solos residuais dos granítóides, neste trabalho (Cap.2 e Cap.5). No entanto, é importante referir que estes materiais apresentam, à escala do maciço terroso, muitas descontinuidades relíquia, intrusões de rochas mais resistentes ou mais brandas, e por vezes filões-relíquia com diferentes inclinações, não sendo susceptíveis de análise geomecânica através dos métodos convencionais da Mecânica dos Solos.

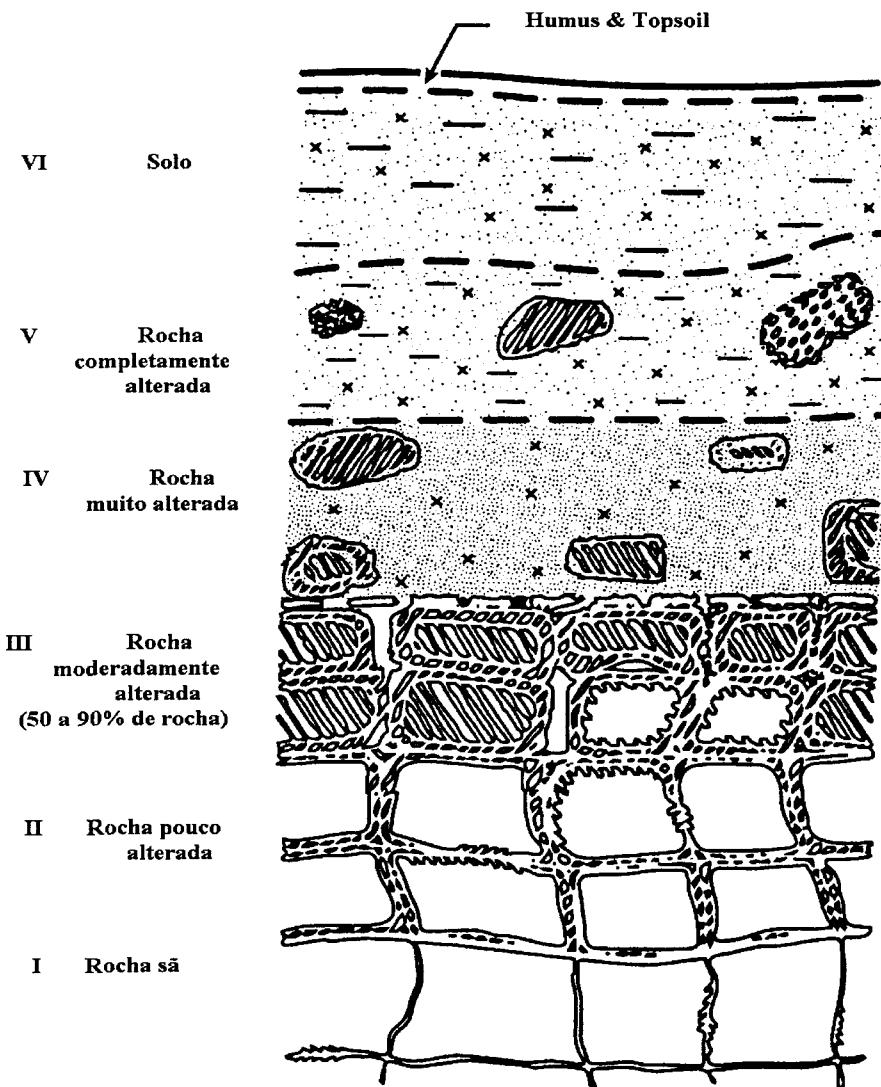


Figura 1.1 – Perfil de alteração típico de um solo residual (adaptado de Little, 1969).

1.2 – Formação dos solos residuais

Os solos residuais são gerados pela alteração química e física das rochas *in situ*, resultando numa estrutura mineral que se encontra em maior equilíbrio com o novo ambiente fisico-químico (Ollier, 1984). A actuação dos processos de alteração, depende da natureza do novo ambiente, no qual os materiais geológicos estão incluídos. Os produtos de alteração são consequência da interacção entre os processos de alteração e os materiais geológicos. Se esta interacção tiver continuidade sem interrupções, como produto final, obtém-se geralmente o solo residual.

Contudo, a alteração como resposta ao ambiente natural é um processo lento, e no curso desta alteração, as mudanças ambientais podem modificar os processos de alteração. Como exemplo, Price (1995) refere que nos últimos 20 000 anos, o clima na Bretanha mudou de glaciar para temperado; Ruxton (1980), calculou cerca de 17 000 anos para a produção de rocha parcialmente alterada, até 4 m de profundidade, em Hong Kong; Fookes *et al.* (1988) relatou que a taxa de rebaixamento da superfície terrestre pode variar entre 0,001 e 11,5 mm por ano, dependendo do tipo de rocha e das condições ambientais. Admite-se que nas áreas da Europa (clima temperado) a taxa de génesis dos solos seja de 1 cm por 100 anos; mesmo em condições climáticas favoráveis (clima equatorial húmido) são precisos, pelo menos, 20 000 anos para gerar solo a partir de granitos (Aires-Barros, 1991).

O tipo de alteração e a natureza dos seus produtos é fortemente influenciada pelo clima e pela litologia. Assim sendo, certo tipo de rocha, que pode ser muito afectado pela decomposição em regiões tropicais, produz solos com características completamente distintas dos solos produzidos pelo mesmo tipo de rocha, mas em condições mais temperadas. De igual modo, diferentes tipos de rocha podem reagir de forma muito distinta sob o efeito das mesmas condições climatéricas. A taxa de alteração é função do tipo de rocha, clima (precipitação e temperatura) e geomorfologia. Além disso, um maciço rochoso intensamente fracturado, logo com uma permeabilidade considerável, tende a alterar-se muito mais rapidamente que outro menos fracturado, e consequentemente menos permeável (ANON, 1995).

A intensidade de meteorização e o balanço entre os fenómenos de carácter físico e químico dependem também, de influências locais como a drenagem e a vegetação (Townsend, 1985; Lee & Coop, 1995), que por sua vez dependem do clima e topografia locais. Mitchell (1976) refere que a meteorização física conduz à fracturação das partículas, reduzindo a dimensão média das mesmas e aumentando o número de microfracturas. A meteorização química, a qual predomina nos climas quentes e húmidos, origina modificações na mineralogia da rocha-mãe. Em ambos os casos, a meteorização progride da superfície para o interior dos maciços, diminuindo o grau de meteorização com a profundidade.

A profundidade do perfil de alteração, depende do clima, sendo maior nas regiões tropicais que possuem uma densa vegetação que protege o perfil da sua erosão e consequente diminuição da espessura, do que nas zonas temperadas, como demonstrou Strakhov (1967) in Blight (1997) relacionando a influência do clima global na profundidade dos perfis de alteração e produtos de alteração.

Como a alteração depende de variados factores, ocorre, e facilmente progride junto às fracturas do maciço rochoso, é natural que exista uma grande variabilidade na mineralogia e nas propriedades dos solos residuais, não apenas na vertical, mas também na horizontal.

1.2.1 – Tipos de alteração

O termo “alteração” pode ser definido de várias maneiras, de acordo com a formação específica do autor, seja geólogo de engenharia, geomorfólogo, pedólogo, etc. Assim, Reiche (1950) definiu alteração como “*a resposta dos materiais que estavam em equilíbrio com a litosfera, às condições existentes junto ao seu contacto com a atmosfera, hidrosfera e biosfera*”. Ollier (1991) refere: “*alteração é a decomposição e fragmentação das rochas junto à superfície terrestre, devido fundamentalmente à reacção com a água e o ar, resultando na formação de argila, óxidos/hidróxidos de ferro e outros produtos de alteração*”. Enquanto Selby (1993) descreve alteração como “*processo de decomposição e desagregação dos solos*

e rochas junto à superfície terrestre por processos físicos, químicos e biológicos”. Price (1995) propõe uma definição para fins geotécnicos: “*alteração é a resposta irreversível dos solos, rochas e respectivos maciços à sua exposição natural ou artificial junto à superfície geomorfológica ou em obras de engenharia*”.

Um aspecto reúne consenso entre todos os autores, seja qual for a sua formação de base: a alteração ou meteorização é um dos processos geológicos mais importantes, porque:

- i) promove a formação de solos residuais, os quais, por vezes, constituem concentrações de minerais com potencialidades para serem economicamente importantes, como são os casos de caulino, bentonite, laterite, bauxite, saibro, etc.;
- ii) é o fenómeno geológico que está na base da formação do solo agrícola, sem o qual a Vida não seria possível;
- iii) os processos estudados na sedimentologia e na geomorfologia, estão directamente relacionados com a meteorização das rochas e solos;
- iv) do ponto de vista da geologia de engenharia, o interesse pelo estudo dos fenómenos de alteração é cada vez maior, devido à crescente utilização de materiais rochosos em importantes obras de engenharia, tais como, barragens, vias de comunicação, obras marítimas, etc., que se podem alterar com o tempo, e por isso é importante prever o seu comportamento a médio e a longo prazo como material de construção, ou *in situ* como terreno de fundação, ou ainda, quando solicitados por obras subterrâneas;
- v) a investigação da degradação e conservação da “pedra” dos monumentos históricos constitui também, recentemente, um grande incentivo para estes estudos;
- vi) por fim, e tendo em conta os objectivos desta tese, salienta-se a alteração como principal responsável pela formação dos solos residuais que podem ser solicitados *in situ* ou aplicados noutro local para fins de engenharia.

Autores como Miranda (1986), distinguem o termo **alteração de meteorização**, referindo que este último, derivando da terminologia anglo-saxónica “*weathering*”, constitui um tipo particular de alteração, visando relacionar o fenómeno da alteração com os agentes externos, em particular com os de natureza meteórica. O termo “alteração” tem assim um significado mais lato, traduzindo qualquer modificação experimentada por uma rocha, seja de ordem física, química ou biológica, de domínio endógeno ou exógeno (Barroso, 1993). De facto, nesta última definição, englobam-se também os processos endógenos e hidrotermais (Aires-Barros, 1991).

Sabendo que à partida, a alteração meteórica é a que mais se destaca na formação dos solos residuais em geral, é importante referir o papel de alterações do tipo metamorfismo, alterações tardi-magmáticas, alteração diagenética, hidrotermal, etc., na génese destes solos, principalmente nas etapas iniciais e que podem ser decisivas nas características químicas, mineralógicas e texturais do solo. Por vezes, não é possível separar o efeito destes dois tipos de alteração, no produto final – solo residual. Muitas vezes, os efeitos da meteorização tardia sobrepõem-se aos efeitos hidrotermais, mesmo que separados por milhões de anos. Segundo Aires-Barros (1991), os efeitos dos fenómenos da alteração hipogénica (deutérica) ou primária e da alteração supergénica (meteórica) ou secundária, são do mesmo tipo (caulinização, sericitização, cloritização, moscovitização, etc.), e explica como se formam os minerais através desses processos. Existem minerais, fundamentalmente minerais argilosos, que podem ser formados pelos dois processos, ou só por um deles e modificados pelo outro.

Esta situação é comum na alteração de rochas ígneas, principalmente ácidas, em clima temperado ou subtropical. Referindo-se à formação dos solos residuais a partir dos granitos de Hong Kong, Irfan (1996) explica que apesar da meteorização fisico-química ter sido o processo dominante, a alteração hidrotermal e os processos tectónicos que a precederam tiveram uma importância determinante no desenvolvimento dos perfis de alteração.

Também na formação dos solos residuais dos granitóides do Alentejo, a alteração primária teve um papel importante, principalmente nos maciços rochosos mais antigos, anterhécínicos, que passaram por várias fases de deformação, como no que se refere aos fenómenos tardimagnéticos e orlas de metamorfismo relacionadas com os plutões mais recentes. No Capítulo 3, pode-se ter uma ideia dos principais fenómenos de alteração que afectaram os maciços estudados.

Pelas razões referidas, não se fará distinção neste trabalho, entre os dois tipos de alteração, pois para o fazer seria necessário recorrer a estudos laboratoriais suplementares, como por exemplo, determinar com precisão as associações minerais ou determinar o índice de cristalinidade, para diferenciar os produtos originados por ambos os processos, operações que se distanciam dos principais objectivos da presente tese.

1.2.2 – Mecanismos de alteração

No processo de alteração, a rocha original sofre um conjunto de modificações de natureza física e química devido à sua interacção com os factores do ambiente (exógeno) em que a rocha se encontra, e que a partir de certos níveis, influirá nas suas características intrínsecas (textura, porosidade, permeabilidade, cor, resistência, etc.).

Embora a actuação dos agentes de alteração (água, temperatura, pH, vento, seres vivos, etc.), se dê concomitantemente (no tempo e no espaço) em graus manifestamente diversos, por vezes de maneiras dissimuladas, por razões práticas, é comum separar os mecanismos de natureza física e os mecanismos de natureza química para sua melhor compreensão. Assim, tem sido corrente o uso de expressões como: *degradação física* e *decomposição química* (Anon, 1995). A primeira é responsável pela perda da individualidade estrutural da rocha original, pela fracturação da rocha e partículas minerais e pela redução da dimensão das mesmas, sem modificar a natureza dos minerais; a segunda conduz a uma modificação na composição química e mineralógica da rocha.

A meteorização física tende a ocorrer mais junto à superfície, enquanto a alteração química pode-se estender a profundidades da ordem da dezena ou centena de metros (Chorley, 1969). Mas qualquer processo é mais activo, de acordo com as condições específicas do local e do clima dominante. Assim a meteorização química é predominante em climas tropicais, sendo a principal responsável pela formação de grandes espessuras no caso dos solos residuais tropicais (Townsend, 1985).

Os processos físicos, dos quais se realçam, a fracturação devido à libertação de tensões, as tensões causadas por amplitudes térmicas grandes, o efeito da congelação da água retida na estrutura da rocha ou a cristalização de sais, pulverizam a rocha, expõem as superfícies sãs ao ataque químico e aumentam a permeabilidade do material, permitindo a percolação de fluídos quimicamente reactivos. Mas, outros processos, tais como, a alternância de secagem e

humidificação, a insolação, a cavitação e abrasão, e a expansão, também são conhecidos por contribuírem para o avanço da desintegração física em determinados ambientes.

Os processos químicos, principalmente a hidrólise, a troca cationica e a oxidação - redução, alteram os minerais originais da rocha e formam minerais argilosos, mais estáveis no ambiente superficial (Mitchell, 1976). Outros mecanismos como a hidratação, a solução, a carbonatação e a complexação, assumem maior ou menor importância consoante o clima local, condições de drenagem, tipo de rocha, coberto vegetal, entre outros.

A alteração biológica inclui: i) a *acção física*, como por exemplo as fendas abertas pelas raízes, com algum significado na desagregação das rochas, incluindo as granitóides em clima temperado, pois não são raros os perfis de alteração que exibem raízes com uma certa envergadura e os interceptam em várias direcções, às vezes procurando zonas mais húmidas nesses perfis; ii) a *acção química*, como por exemplo, a oxidação bacteriológica, contribuição na formação de quelatos e na redução de compostos de ferro e sulfuretos (Pings, 1968), predomina nas regiões onde a vegetação é luxuriante como sucede nas florestas tropicais.

Na verdade, a alteração química e física estão tão estreitamente interrelacionadas, que um processo não prossegue sem a contribuição do outro. Assim, a meteorização química prolifera nas fracturas abertas ou parcialmente formadas como resultado da alteração física, enquanto as fracturas podem desenvolver-se como resposta às variações de volume e ao enfraquecimento induzido pela alteração química (Anon, 1995). Ambos os processos dependem do acesso ao maciço rochoso para se efectivarem. O acesso em escala pequena é proporcionado pela porosidade, e em escala maior, pela fracturação. Todas as rochas possuem fracturas, quer tenham sido formadas durante a sua génesis, ou mais tarde, devido à actuação de forças tectónicas. Price (1995) argumenta que a formação de fracturas constitui o primeiro passo para a alteração, porque as descontinuidades permitem a circulação de fluídos no maciço rochoso e determinam a dimensão dos blocos de rocha.

Na realidade, junto à superfície, as descontinuidades podem aparecer ou abrirem por descompressão dos maciços rochosos ou terrosos, quando são natural ou artificialmente expostos. A libertação de tensões residuais, parece ser um dos factores mais importantes na alteração dos maciços granitóides. A génesis e instalação dos maciços rochosos em profundidade realiza-se debaixo de um campo de tensões, e quando as rochas são expostas junto à superfície da crista, as tensões diminuem e a energia interna contida nas rochas liberta-se (Nichols & Abel, 1975). A libertação dessa energia causa o desenvolvimento de fracturas que geralmente são paralelas à superfície de erosão, mas que frequentemente acompanham os alinhamentos estruturais do maciço (por exemplo um sistema de diaclases perpendiculares entre si em rochas ígneas). Este tipo de descontinuidades por descompressão ocorre em quase todos os materiais geológicos, desde argilas moles a granitos e o seu desenvolvimento parece depender do tempo. Nichols (1980) refere que as fracturas de descompressão podem ser mais pronunciadas devido às escavações que se fazem associadas a certas obras de engenharia, a um ritmo geralmente rápido. Este é o caso dos taludes de escavação resultantes da construção das vias de comunicação, ou da abertura de pedreiras ou saibreiras que, como se pode verificar no Capítulo 3, foram os locais preferencialmente escolhidos para colheita e estudo dos solos residuais granitóides, pois correspondem aos sítios que exibem melhores perfis de alteração.

O que actualmente acontece em termos de fracturação como consequência da libertação das tensões residuais depende, da natureza da rocha, do maciço rochoso e do campo de tensões

que presidia antes da escavação. Como é do conhecimento geral, o espaçamento entre fracturas aumenta com a profundidade. A formação e abertura de descontinuidades de origem mecânica à superfície do maciço permite a percolação das águas, promovendo assim a alteração. Por isso, Price (1995) defende que desde que as rochas expostas tenham estado alguma vez sob tensões superiores às que actualmente estão sujeitas, seria correcto assumir o desenvolvimento da fracturação por descompressão como uma importante fase do desenvolvimento da alteração em geral.

A Figura 1.2 ilustra os **processos de meteorização física** mais significativos, que conduzem à desagregação dos maciços rochosos (Anon, 1995): 1) está patente a fracturação devida à descompressão causada pela erosão, degelo, tectonismo ou outro processo geológico de longa duração; 2) posteriormente, novas fracturas se podem formar, ou as originais podem ser alargadas, devido às pressões internas causadas por mudanças de temperatura, variações de volume causados pela decomposição química, formação de novos minerais e o enfraquecimento global do material pode induzir ao colapso debaixo do seu próprio peso. Pressões externas devidas à acção do gelo-degelo, cristalização de sais e crescimento de raízes, já foram referidas e encontram-se devidamente explicadas em pormenor, na bibliografia da especialidade. O que aqui importa salientar, é que a continuação do processo de fracturação pode conduzir ao resultado final de uma massa constituída por blocos ou materiais da dimensão do cascalho ou areia. Os próprios minerais podem não evidenciar significativa decomposição química, apesar de poderem apresentar alguma fracturação. Esta situação é comum nos perfis de alteração de granitos de grão médio a grosso do Alentejo.

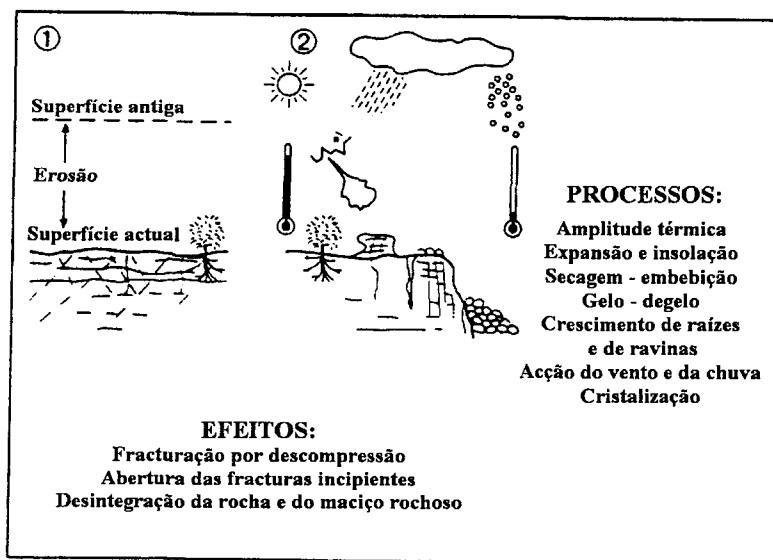


Figura 1.2 – Processos de alteração física (adaptado de Anon, 1995).

A degradação física nem sempre é contínua e pode não progredir em simultâneo com a decomposição química. Em muitas rochas, as fracturas desenvolvidas nas fases iniciais de alteração, foram preenchidas por argila ou produtos de alteração em fases posteriores. Desta forma, as rochas mais alteradas ou os respectivos solos residuais, podem ser menos friáveis e menos permeáveis que as rochas menos alteradas. Um exemplo dessa situação, é o que acontece quando se formam lentículas ou bolsadas consideráveis de caulino, ao lado de rocha

alterada, como resultado da alteração *in situ* das rochas graníticas. Este fenómeno é frequente no Norte de Portugal.

No que respeita aos mecanismos de meteorização química das rochas ígneas, tal como os de meteorização física, estão descritos detalhadamente em trabalhos como: Birkeland (1974), Miranda (1986), Fookes *et al.* (1988), Sequeira Braga (1988), Begonha (1989), Aires-Barros (1991) e Blight (1997).

A maioria dos **processos de meteorização química** depende da presença de água e do seu movimento através dos maciços. Estes processos incluem geralmente a *solução*, e a intensidade com que actua depende principalmente da quantidade de água que circula nos maciços, da solubilidade dos minerais e do pH da água. A solubilidade relativa dos elementos químicos é variável, e é frequente fazer-se referência à seguinte ordem de solubilidade para os elementos químicos que entram na formação dos minerais comuns:



As soluções de baixa temperatura e fraca concentração iónica circulam cada vez com maior facilidade e penetram nos poros, clivagens, microfracturas e superfícies expostas dos minerais primários, aumentando as trocas iónicas que conduzem à evolução progressiva dos diferentes minerais de rocha.

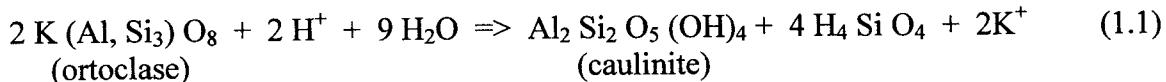
A alteração química posterior envolve processos como a hidratação, a hidrólise, a oxidação, a redução, e a quelatização, que produzem minerais secundários (maioritariamente, minerais argilosos), que se formam a partir dos minerais primários. Os produtos resultantes das várias fases de alteração são essencialmente constituídos por minerais secundários e minerais primários mais resistentes.

O desenvolvimento de minerais secundários envolve variações de volume, introduzindo pressões internas e levando à fragmentação do material, o que por sua vez proporciona uma maior superfície exposta à alteração química. Por vezes, a alteração de um único mineral é suficiente para promover a alteração de todo o material rochoso (Raymahashay & Sharma, 1993). Situação semelhante pode observar-se nos perfis de alteração do quartzodiorito de Montemor (amostra 49), onde em certas zonas a rocha parece sã, mas a rápida decomposição das anfíbolas disseminadas por todo o maciço, promove a separação fácil dos minerais sãos (quartzo, feldspato, micas), com um simples toque de martelo ou com a mão.

Apesar de, como se disse, não se descreverem aqui as numerosas reacções que levam à formação dos minerais secundários, especial atenção se dará à **hidrólise**, porque para além de ser considerada como sendo o mais importante processo de alteração química (Zaruba & Mencl, 1976), é também o processo que conduz aos produtos finais da meteorização nos climas temperados húmidos, que prevalecem em Portugal. De facto, nos climas quentes e húmidos, o processo de decomposição química é mais agressivo, e não pára na hidrólise, devido principalmente à temperatura, humidade e cobertura vegetal contínua (Aires-Barros, 1991).

Trata-se do principal processo de meteorização dos minerais, alumino-silicatos, como é o caso dos feldspatos, constituintes maioritários dos granítoides. A hidrólise corresponde à reacção entre os iões H^+ e OH^- da água e os elementos ou iões do mineral, formando como

produto o ácido silícico (H_4SiO_4). Se existir alumínio disponível no mineral decomposto e se se reunirem as condições ambientais favoráveis, forma-se um mineral argiloso. A hidrólise dos feldspatos potássicos, nomeadamente a ortoclase, pode ser representada pela equação:



Os iões libertados por hidrólise durante a meteorização superficial das rochas cristalinas podem seguir diferentes vias (Gomes, 1988): i) uns são removidos pela escorrência das águas meteóricas ao longo dos declives topográficos; ii) outros participam nas estruturas de minerais de neoformação ou dos minerais de transformação, ficando retidos nos produtos residuais da alteração, formando os solos.

Muitas outras equações se podem acrescentar ao exemplo dado pela equação 1.1, e que se encontram em trabalhos como Gomes (1988) e Aires-Barros (1991). Na realidade, é por hidrólise que se formam minerais, tais como, caulinite ($Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$), ilite ($K Al_3 Si_3 O_{10} (OH)_2$) e montmorilonite ($3 Na_{0,66} Al_{2,66} Si_{3,33} (OH)_2$), entre outros.

A hidrólise dos silicatos (feldspatos de vários tipos, micas, piroxenas, anfíbolas, olivinas, etc.), manifesta-se por fenómenos de argilização (caulinização, montmorilonização), de cloritização, de saussuritização, de serpentinização (Aires-Barros, 1991), que se encontram presentes na alteração das rochas ígneas, nomeadamente dos granítóides que deram origem aos solos residuais estudados neste trabalho (secção 3.5.2).

1.2.3 – Factores que condicionam a génesis dos solos residuais

A grande diversidade dos solos residuais existentes assim como a variabilidade presente nas características de um perfil de alteração são consequência da actuação que diversos factores têm na sua formação, nomeadamente, a rocha original, o clima, a geomorfologia e a vegetação.

1.2.3.1 – Rocha original

Certas formas de alteração estão geralmente associadas a tipos litológicos particulares. A capacidade das rochas se alterarem está ligada a factores intrínsecos, dependentes da natureza das rochas, tais como: i) composição mineralógica (solubilidade e resistência à alteração química); ii) textura (granularidade, porosidade, forma dos grãos, etc.); iii) estrutura (diaclasses, estratificação, gnaissosidade, xistosidade, etc.).

Ao nível do maciço rochoso, a existência de descontinuidades e respectivas propriedades (espaçamento, continuidade, abertura e eventual preenchimento) juntamente com o estado de tensão do maciço, constituem os factores mais importantes, uma vez que estas estruturas controlam o acesso dos agentes meteóricos ao maciço e, deste modo, a velocidade da meteorização (Baynes & Dearman, 1978a; Kwan, 1981; Dobereiner & Porto, 1993).

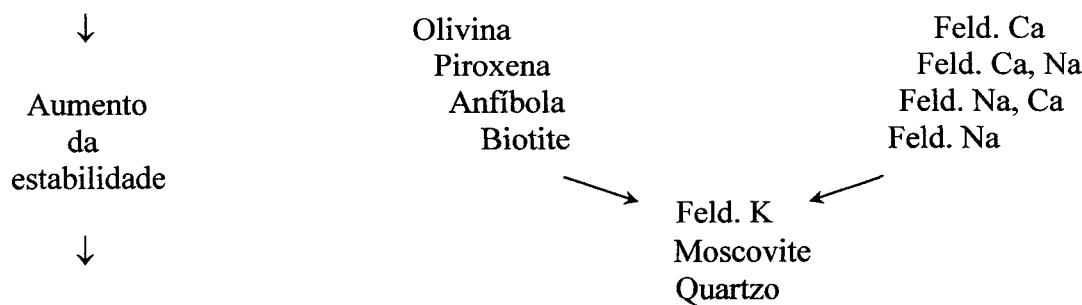
Begonha (1989), num estudo que abrangeu as rochas graníticas do Norte de Portugal, concluiu que a composição da rocha original não era um factor decisivo para a profundidade de meteorização das rochas graníticas desta região, enquanto que a intensidade de fracturação se revelou como um factor determinante.

Righi & Meunier (1995) e Berner & Berner (1996), entre outros, referem que o efeito da composição da rocha-mãe é mais pronunciado nos estados iniciais de alteração, dado que nos estados mais avançados da meteorização, os factores extrínsecos (temperatura, humidade, Eh, pH, actividade biológica, drenagem), assumem acção preponderante. Em climas temperados como é o caso de Portugal, os processos de alteração são menos agressivos, e nestas condições, a composição da fração argilosa do solo depende, fundamentalmente, da composição da rocha-mãe (Gomes, 1988).

A granularidade ou a dimensão do grão, influencia a alteração das rochas. Como se sabe, nas rochas ígneas, ácidas ou básicas, as variedades que apresentam grão mais fino são as que, geralmente, resistem mais à alteração do que as que apresentam grão mais grosso.

O arranjo estrutural de um maciço alterado reflecte a duração e a intensidade da alteração. Por outro lado, a forma como a alteração evolui depende do “fabric” da rocha original. É comum encontrar uma grande variabilidade de arranjos texturais no mesmo maciço, indicando também a existência de vários microambientes de alteração (Baynes & Dearman, 1978b). Esta situação é frequentemente exposta nos maciços de rochas ígneas ácidas, nomeadamente, as que foram motivo de estudo neste trabalho. Desta forma é comum encontrar, nestes perfis, solos residuais com texturas bastante diferenciadas lado a lado, pertencentes ao mesmo perfil de alteração e resultantes do mesmo tipo litológico.

O problema da alteração das rochas reside, em especial, no comportamento dos minerais face aos agentes externos. Como é do conhecimento geral, alguns minerais são mais resistentes à alteração química do que outros. Selby (1993) propõe a seguinte sequência para o aumento da estabilidade dos minerais (ou ordem decrescente da susceptibilidade à meteorização):



De um modo geral, verifica-se que a ordem da susceptibilidade à meteorização dos minerais, corresponde à ordem de cristalização dos mesmos, nas rochas endógenas. De facto, a sequência apontada é, praticamente, paralela à série que estabelece a ordem de cristalização dos minerais nas rochas ígneas (série de Rosenbusch), à sequência de reacções entre os minerais e o magma (série de Bowen) e à série dos tipos estruturais dos silicatos de Strunz. Tal paralelismo entre as referidas séries, reside no facto de ser a energia necessária à formação dos minerais que condiciona a ordem de cristalização, a estrutura cristalina, a estabilidade e, consequentemente, a susceptibilidade à alteração. É este o motivo porque as rochas básicas se alteram mais facilmente que as rochas ácidas e que, dentro destas, em regra, primeiro as rochas ricas em biotite e só em último lugar as ricas em moscovite. Sendo assim, o mecanismo da meteorização é um processo gradativo pelo qual os minerais constituintes da rocha respondem de forma diferente no tempo, ao ambiente exógeno em que se encontram.

1.2.3.2 – Clima

O clima é considerado pela maioria dos autores o factor mais importante na alteração das rochas e, consequentemente, na formação dos solos residuais. De facto, o clima exerce uma influência considerável na taxa de alteração (Weinert, 1964, 1974; Morin & Ayetey, 1971). A alteração física predomina nos climas secos, enquanto a extensão e a taxa de alteração química é largamente controlada pela presença da água e pela temperatura.

Os factores dominantes, que controlam o modo como a meteorização evolui, são a precipitação e a temperatura média. Entre outros factores importantes, está a periodicidade das mudanças que se verificam relativamente a estas duas variáveis (Ollier, 1984). A precipitação controla a quantidade de água que proporciona as reacções químicas nas rochas e, a libertação e transporte dos constituintes solúveis dos minerais (lixiviação). A temperatura influencia principalmente o ritmo das reacções, (segundo Blight, 1997, a intensidade das reacções químicas pode duplicar para cada 10º C de incremento de temperatura média).

Como já se referiu, as condições ideais para uma alteração rápida e profunda, verificam-se em regiões de clima quente e húmido, típico das regiões tropicais, onde a espessura dos solos residuais ultrapassa frequentemente 30 metros. Aí, como a decomposição química é agressiva e contínua, formam-se rapidamente minerais secundários do mesmo tipo, isto é, a variabilidade mineralógica dos minerais neoformados é pequena (Pedro, 1993).

O contrário se passa nas regiões de clima temperado, onde as condições climáticas são menos agressivas. A meteorização torna-se um processo mais lento, progressivo e diferenciado, iniciando-se pelos minerais primários mais vulneráveis, que no caso dos granitóides, são a biotite e os feldspatos, formando-se um solo residual com uma forte componente arenosa, daí a denominação de “arena” para o saprolito granítico (Sequeira Braga *et al.*, 1990; Aires-Barros, 1991; Pedro, 1993; Begonha, 1997).

A decomposição aumenta pois, com a humidade, com a temperatura e com o desenvolvimento do mundo orgânico associado. Estabelece-se assim, uma relação entre o clima e os tipos e graus de alteração das rochas, para os quais se pode esboçar uma zonalidade, acompanhando a zonalidade climática do globo (Pedro, 1968).

A intensidade da alteração reúne o conjunto de factores extrínsecos, que actuam em função do meio em que se processa a alteração, e dependem da temperatura, humidade, Eh, pH, actividade biológica, produção de complexos organo-metálicos, trocas iónicas, etc., os quais assumem valores próprios nas diferentes zonas climáticas do globo.

Nesse sentido, e de acordo com Uehara (1982), os minerais argilosos dos solos distribuídos pelo mundo, formam-se de uma forma previsível com a distância ao equador. Obviamente que é uma simplificação grosseira, porque os climas não variam uniformemente a partir do equador, pois são afectados pela topografia, correntes oceânicas, etc. De qualquer modo, o autor sugere uma visão global da influência do clima nos produtos de alteração (Figura 1.3).

As argilas típicas dos solos das diversas regiões climáticas estão devidamente referenciadas em Gomes (1988). Contudo, salienta-se o caso que interessa particularmente a este estudo, que são os solos de climas temperados. Segundo o mesmo autor, são solos intermédios, entre os solos de climas frios ou desérticos em que predomina a desagregação física dos filossilicatos – micas e clorites, da rocha original; e os de clima tropical onde predominam a

caulinita, gibbsite ou montmorilonita, de acordo com as condições locais. Deste modo, nas regiões de clima temperado, ocorrem solos resultantes tanto da meteorização mecânica como química. São materiais pouco evoluídos em que a temperatura e a precipitação facilitam moderadamente a hidrólise dos silicatos. Os perfis mostram transformações e neoformações de minerais argilosos. Assim a composição da fracção argilosa depende fundamentalmente da composição da rocha-mãe, podendo conter os seguintes minerais argilosos: ilita, clorita, vermiculita, montmorilonita, caulinita e interestratificados irregulares (ilite-clorita, ilite-vermiculita, ilite- montmorilonita e clorita-montmorilonita).

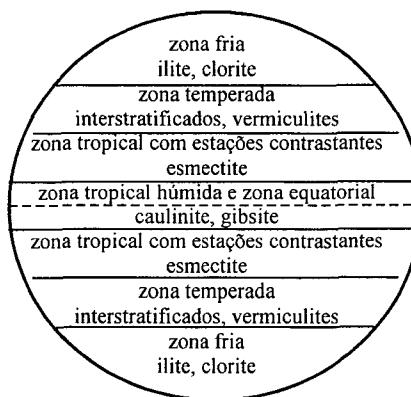


Figura 1.3 – Influência da zonalidade climática do globo na formação dos minerais de argila (adaptado de Uehara, 1982).

Gomes (1988), chama a atenção para as argilas como indicadores paleoclimáticos, o que significa que as argilas que fazem parte dos perfis geo-pedológicos actuais, podem não ter sido consequência da alteração das rochas e solos sob as condições climáticas actuais, mas serem o produto de alteração preservado, resultante da influência de um paleoclima que actuou durante outra idade geológica na região.

1.2.3.3 – Geomorfologia

A geomorfologia englobando factores como a topografia e a drenagem, influencia fortemente a meteorização pelas seguintes vias: i) controla a velocidade de escorrência superficial e desta forma a capacidade de solubilização, promovendo as reacções químicas; ii) favorece a lixiviação dos elementos solúveis; iii) aumenta o ritmo de exposição à erosão dos minerais constituintes dos maciços.

Para o desenvolvimento de um perfil de solo residual em profundidade, é necessário que a razão entre os avanços da alteração na crista terrestre seja superior à taxa de remoção dos produtos de alteração pela erosão.

A topografia controla a evolução da alteração, porque de certo modo, determina a quantidade de água disponível e a forma como ela se move através das zonas de alteração, a precipitação tende a deslocar-se das zonas montanhosas e a acumular-se nos vales e depressões. A topografia determina, em parte, a idade efectiva do perfil de alteração, através do controlo da taxa de erosão dos materiais alterados da superfície. Assim, os perfis de solos residuais mais profundos encontram-se, geralmente, nos vales e zonas de taludes suaves, em vez de zonas elevadas ou taludes muito inclinados. Daqui se deduz que o relevo antigo (paleorelevo), pode

ter tido um papel mais importante na formação do solo residual, do que o relevo actual (Blight, 1997).

A alteração mecânica domina onde existem declives fortes que propiciam o escoamento rápido, provocando na superfície uma renovação contínua de minerais frescos. A alteração química é favorecida nas regiões de topografia suave, onde o escoamento não é excessivo, assim as águas das chuvas infiltram-se com maior facilidade, permanecendo a água em contacto com a rocha por um período de tempo mais longo.

A topografia também controla a drenagem numa determinada região. As variações locais da topografia influenciam a quantidade de humidade retida, a posição e configuração do nível freático e, deste modo, a profundidade de penetração da maioria dos processos de alteração química. O relevo da região determina assim o desenvolvimento do solo sob condições de drenagem boas ou pobres. Sob boas condições de drenagem, a topografia controla a lixiviação, um mecanismo essencial na alteração das rochas. Por exemplo, os solos residuais de rochas graníticas, apresentam maior porosidade e, consequentemente, são mais compressíveis, nas zonas onde a precipitação anual e a lixiviação são maiores. Townsend (1985), Gomes (1988), Blight (1997), entre outros, consideram que zonas com uma drenagem interna boa e precipitação elevada são favoráveis ao desenvolvimento de caulinite, enquanto zonas planas e com drenagem pobre favorecem a formação de montmorilonite.

1.2.3.4 – Coberto vegetal

A cobertura vegetal, e em geral a biosfera, tem sido reconhecida como um factor importante e decisivo no tipo de alteração. No entanto, revela-se um factor de difícil quantificação, porque não é independente, ou seja, é extremamente influenciado pela existência, por exemplo de um microclima. De qualquer forma, a sua influência no processo de meteorização é indubitável, quer através de uma componente mecânica, quer através de uma componente química.

É evidente que a existência de uma floresta densa favorece a meteorização química enquanto protege os maciços da erosão mecânica. Este factor condiciona a escorrência superficial e sub-superficial da água, aumenta a acidez da água pela libertação de ácidos orgânicos, facilitando a dissolução dos constituintes solúveis dos minerais. Por outro lado, o húmus originado pela decomposição das plantas, facilita a mobilidade de certos componentes libertados durante a meteorização e impede a mobilidade de outros, fixando-os por absorção.

Noutra perspectiva, o desenvolvimento de certa vegetação arbórea, com o concomitante crescimento das raízes, gera tensões, que provocam a abertura de microfracturas e o alargamento de diaclases, facilitando assim a ação dos agentes meteóricos, aumentando a permeabilidade e consequentemente a velocidade de meteorização do maciço.

As ações mecânicas e químicas exercidas pelas plantas não actuam separadamente, pois estão intimamente ligadas entre si. No entanto, na região de clima temperado mediterrânico (Cap. 3), cujos solos são o objecto da presente tese, predominam as culturas arvenses (sobretudo cereais), oliveiras, e pastagens sob montados, dominando como espécies exóticas, a azinheira (*Quercus rotundifolia* Lam.) e o sobreiro (*Quercus suber* L.). Deste modo, a ação mecânica, promovida pelas raízes das árvores e arbustos, bem como o desenvolvimento radicular das plantas, são evidentes em grande parte dos perfis estudados, sendo considerada por isso, o fenómeno preponderante.

1.3 – Características gerais dos solos residuais

As características específicas dos solos residuais, que são distintas das dos solos transportados, são geralmente atribuídas quer à presença de minerais argilosos específicos dos solos residuais, quer aos efeitos estruturais particulares, como a presença de rocha sã ou parcialmente alterada, descontinuidades relíquia ou outros planos de fraqueza, e ligações interpartículas. De acordo com Wesley & Irfan *in* Blight (1997) estes factores podem ser agrupados em dois conjuntos genéricos.

- i) **Composição** – refere-se ao material de que é feito o solo, inclui a dimensão e a forma das partículas, e em especial a composição mineralógica da fracção fina. Pode ser dividida em:
 - *Composição física*, como por exemplo: % de rocha sã, distribuição dimensional do grão, etc.;
 - *Composição mineralógica*, compreendendo o tipo e a quantidade das espécies minerais presentes.
- ii) **Estrutura** – refere-se a características específicas do solo no seu estado não perturbado *in situ* e pode ser subdividida nas duas seguintes categorias principais:
 - 1) *Macroestrutura* – inclui estruturas discerníveis à vista desarmada, tais como, horizontes, descontinuidades, fissuras, poros, presença de rocha sã ou parcialmente alterada e outras estruturas relíquia herdadas do maciço rochoso original;
 - 2) *Microestrutura* – inclui o “fabric”, ligações interparticulares ou cimentação, agregados de partículas, dimensão e forma dos microporos, etc.

Muitas das principais características dos solos residuais estão descritas em trabalhos de referência, dos quais se destaca Brand & Phillipson (1985), em que os autores fazem uma revisão sobre a amostragem e ensaios levados a efeito em solos residuais de 18 regiões do mundo (U.S.A., África do Sul, SíriLanka, Japão, Singapura, Filipinas, Paquistão, Nigéria, Nova Zelândia, Malásia, Índia, Hong Kong, Gana, Alemanha, Reino Unido, China, Brasil, Austrália e África Ocidental). De algumas das principais características que se evidenciam através da observação dos perfis de solos residuais no campo, destaca-se:

- i) geralmente são materiais bem graduados, como demonstrou Vargas (1953) a partir de solos resultantes de diferentes litologias; a classificação destes solos com base na distribuição granulométrica é condicionada, quer pela existência frequente de agregados de partículas, quer pela presença habitual de proporções semelhantes das fracções areia, silte e argila;
- ii) os maciços de solos residuais são tipicamente heterogéneos, como refere Sandroni (1985), mas ao contrário dos solos sedimentares, a variabilidade de certa propriedade pode estar restrita a uma porção do maciço; logo trata-se de uma variabilidade não previsível;
- iii) o nível freático situa-se, frequentemente, a grandes profundidades nos perfis, pelo que geralmente se trata de solos não saturados (Blight, 1997);
- iv) devido à sua micro e macroestrutura, a penetrabilidade destes solos pelos ensaios de penetração comuns, é limitada (Danziger *et al.*, 1998; Viana da Fonseca *et al.*, 1998).

O estado actual dos conhecimentos sobre as propriedades dos *maciços de solos residuais*, tendo em conta as metodologias utilizadas nos estudos de caracterização, é apresentado de uma forma simplificada por Viana da Fonseca (1996), o qual salienta os principais pontos:

- i) maciços muito heterogéneos, em que a profundidade de alteração varia extremamente, inclusive no mesmo perfil de alteração;
- ii) solos de granulometria extensa, podendo geralmente classificar-se como areias siltosas ou siltes arenosos e contendo uma certa quantidade de argila, que pode ser significativa;
- iii) existência de ligações interparticulas herdadas da rocha original, ligações essas que se degradam rapidamente com a libertação de tensões, com a exposição aos agentes meteóricos ou com a variação do teor em água;
- iv) estado de tensão inicial difícil de conhecer, havendo investigadores que o consideram elevado sendo uma herança da rocha-mãe e outros que defendem o contrário, aproximando-o dos solos sedimentares normalmente consolidados;
- v) comportamento em termos de deformabilidade mal conhecido, em que a cedência do esqueleto sólido pode ser importante;
- vi) comportamento quando compactado mal conhecido, com particular atenção, para as variações significativas experimentadas pelas propriedades destes materiais, devido ao transporte entre a mancha de empréstimo e o local da obra;
- vii) dificuldades consideráveis em obter boas amostras indeformadas para ensaios em laboratório com vista a caracterizar o respectivo comportamento mecânico;
- viii) correlações mal definidas entre os resultados dos ensaios *in situ* e as características de resistência e de deformabilidade.

Segundo Vaughan & Kwan (1984), Vaughan (1988), Vaughan *et al.* (1988) e Leroueil & Vaughan (1990), os solos residuais apresentam basicamente as seguintes características geotécnicas com origem geológica:

- 1) uma componente de resistência e rigidez devida à existência de ligações entre as partículas, as quais se desenvolveram progressivamente durante o processo de meteorização, e à medida que o solo evoluiu, estando em equilíbrio com o estado actual das tensões *in situ*;
- 2) o efeito desprezável da “história de tensões”, que acompanhou a evolução do solo residual, na sua estrutura actual e no seu comportamento geotécnico, ao contrário dos solos sedimentares onde a “história de tensões” determina o arranjo de partículas e o índice de vazios;
- 3) grande variedade mineralógica e consequente variação na resistência dos grãos. A meteorização produz partículas de solo (individuais ou em aglomerados) com graus de fraqueza variáveis; assim, as partículas podem apresentar uma variabilidade maior de resistência à fracturação do que a usualmente encontrada nos solos transportados;
- 4) grande variedade da porosidade dos solos residuais; os processos de meteorização envolvem geralmente perda de material por lixiviação e ganho de material por precipitação, assim como a formação de novos minerais; esta variação está patente ao longo de um perfil de alteração, tanto na vertical como na horizontal.

Outros dois factores estão geralmente associados aos solos residuais (Vaughan *et al.*, 1988; Blight, 1997):

- I. o **estado não saturado**, ou parcialmente saturado, é uma constante na generalidade dos solos residuais, com a consequente existência de pressões intersticiais negativas; deste modo, as tensões efectivas no interior destes maciços são superiores às tensões totais, e a resistência e a rigidez são incrementadas; a saturação parcial, pode influenciar também a resistência tanto dos minerais presentes como das ligações entre eles;
- II. a presença de **descontinuidades relíquia** herdadas do maciço rochoso original, e que frequentemente são preenchidas por minerais com baixa resistência ao corte.

Estas duas particularidades dos maciços de solos residuais têm grande influência no comportamento geomecânico dos mesmos e têm que ser devidamente consideradas nos projectos geotécnicos.

Em relação ao primeiro aspecto focado, existem já bastantes contribuições sobre os efeitos da não saturação no comportamento dos solos (Bishop & Blight, 1963; Blight, 1967; Fredlund & Morgenstern, 1977; Blight, 1985; Fredlund, 1985; Lloret *et al.*, 1985; Alonso *et al.*, 1990; Alonso, 1993; Fredlund & Rahardjo, 1993; Biarez *et al.*, 1994; Karube & Kato, 1994; Alonso & Delage, 1995; Coop *et al.* (1995); Santos Neto *et al.*, 1995; Laloui *et al.*, 1997; Sabbagh, 1997; Kato *et al.*, 2000; Byrne & McKnight, 2001; Henoegl, 2001; Mirata, 2001; entre outros). Mas a melhor forma de relacionar a tensão efectiva para os **solos não saturados** ainda não foi acordada. De qualquer forma, é consensual que a tensão efectiva é governada pela diferença de tensão ($\sigma - u_a$) e a sucção ($u_a - u_w$) onde, u_a e u_w são, respectivamente, as pressões devidas ao ar e à água nos poros do solo. Na maioria dos casos práticos, u_a é considerada igual à pressão atmosférica e pode ser igual a zero. Assim a forma clássica para a equação da tensão efectiva $\sigma' = \sigma - u_w$, pode ser usada com pouca margem de erro para solos não saturados, mas razoavelmente próximos da saturação. Num solo não saturado onde $u_a = 0$, u_w será negativo e, por isso a tensão u_w é somada à tensão total para se obter a tensão efectiva. Se o nível freático estiver a uma profundidade de 10 m, este efeito pode incrementar um máximo de 100 KPa na tensão efectiva no perfil do solo, e cerca de 50 KPa na resistência do solo (Blight, 1997). É esta resistência capilar, que contribui para a estabilidade de espessos perfis de solos residuais praticamente verticais, mas que se pode perder durante períodos de precipitação prolongada, ou caso o nível freático suba sazonalmente, ou ainda se as condições de não saturação forem modificadas com uma mudança do uso do maciço, podendo provocar, em última análise, o seu colapso. Outro factor a acrescentar é a existência de ligações cimentantes entre grãos de solo, cujo papel estruturante pode ser modificado com um aumento do teor em água, passando a funcionar como material essencialmente lubrificante. Em suma, com o aumento considerável do teor em água no perfil do solo, há um consequente decréscimo na coesão aparente devido à perda do efeito “sucção”, e tensão capilar nos poros do solo, por um lado, e por outro, assiste-se a uma diminuição da coesão verdadeira devida às ligações entre partículas, ambas características intrínsecas dos solos residuais.

No que respeita ao segundo aspecto apontado, a existência de **descontinuidades relíquia** nos maciços de solos residuais é sobejamente conhecida como sendo dos principais factores relacionados com a respectiva resistência ao corte e, por conseguinte, determinante nos problemas de estabilidade de taludes. São os principais meios de circulação de águas, aumentando a permeabilidade do maciço, diminuindo a resistência ao corte dos materiais de preenchimento, lubrificando as superfícies de cisalhamento, e proporcionando uma diminuição global da resistência ao corte do maciço. Este aspecto foi aprofundado por

autores, tais como: Lumb (1962), Howat (1985), Begonha (1989), entre outros. No entanto, estas zonas de fraqueza, são geralmente difíceis de detectar por furos ou sondagens. As próprias amostras de solos residuais não contemplam este tipo de descontinuidades de grande escala. Trata-se pois de um parâmetro, apesar de crucial, difícil de caracterizar. Autores como Cowland & Carbray (1988), Irfan & Woods (1988) e Lo *et al.* (1988), concluíram que a resistência dos saprolitos é governada, quase na totalidade, pelas suas características texturais e estruturais herdadas. A resistência do material entre fracturas é controlada pelo grau de alteração e cimentação. Contudo, a resistência global do maciço de solo residual é governada pela intensidade das fracturas, pela orientação predominante das mesmas em relação à direcção de aplicação das tensões e, pelas características de resistência destas fracturas.

Uma outra característica importante que influencia as propriedades geotécnicas (resistência, deformabilidade e permeabilidade) dos solos residuais ao nível da sua estrutura é expressa pelo **índice de vazios** ou densidade da amostra. O índice de vazios num solo residual é função do estado de alteração alcançado e das características da rocha-mãe e, como já se referiu, varia amplamente, não estando geralmente relacionado com a história de tensões. Num solo fracamente cimentado, o índice de vazios exerce uma forte influência na resistência não drenada, a qual aumenta com a densidade (Howat & Cater, 1985; Howat, 1988).

A **deformabilidade** dos solos também é geralmente influenciada pelo índice de vazios. Do ponto de vista geomecânico, Vaughan & Kwan (1984) e Vaughan *et al.* (1988) consideram a meteorização como um processo de enfraquecimento da rocha original, com remoção de iões e moléculas dos minerais, lixiviação dos iões mais solúveis e precipitação de novos elementos e compostos mais em equilíbrio com o ambiente exógeno, que proporcionam o desenvolvimento de uma estrutura fracamente cimentada. Por isso, a maioria dos solos residuais comporta-se como se estivesse sobreconsolidada. A sua compressibilidade é relativamente baixa para níveis baixos de tensão. Uma vez ultrapassada o que alguns autores designam por tensão de *cedência*, no limite do *estado metaestável* (Fig.1.4), a compressibilidade aumenta proporcionalmente à diminuição do índice de vazios. É possível observar esta cedência em ensaios edométricos e certos ensaios triaxiais, em amostras indeformadas, e é habitualmente designada por “*tensão de pré-consolidação virtual*” (Vargas, 1953). A Figura 1.4 ilustra de forma esquemática a influência da estrutura fracamente cimentada na compressibilidade dos solos, assim como a diminuição brusca do índice de vazios no ponto de cedência, após o que as ligações entre partículas se quebram. A posição do ponto de cedência assim como a área e localização da zona metaestável, dependem da resistência da estrutura do solo (Leroueil & Vaughan, 1990).

À medida que um maciço se altera, há simultaneamente perda de material por lixiviação, erosão interna das partículas finas, etc. A diminuição do **módulo de deformabilidade (E)** com o grau de alteração, pode ser atribuída a modificações da microestrutura, aumentando assim a deformabilidade do maciço, como provou Baynes & Dearman (1978b). Por outro lado, a menos que os produtos finais da alteração sejam expansivos, é previsível que as tensões laterais num perfil de solo residual sejam menores que as tensões verticais provocadas pela cobertura. Por outras palavras, o efeito da meteorização pode reduzir o valor do **coeficiente de impulso em repouso (K₀)**, de valores superiores à unidade na rocha sã, para valores inferiores a 0,5 no solo residual (Ruddock, 1967; Chan, 1976; Kwan, 1981; Viana da Fonseca, 1996; Blight, 1997; Viana da Fonseca *et al.*, 2001).

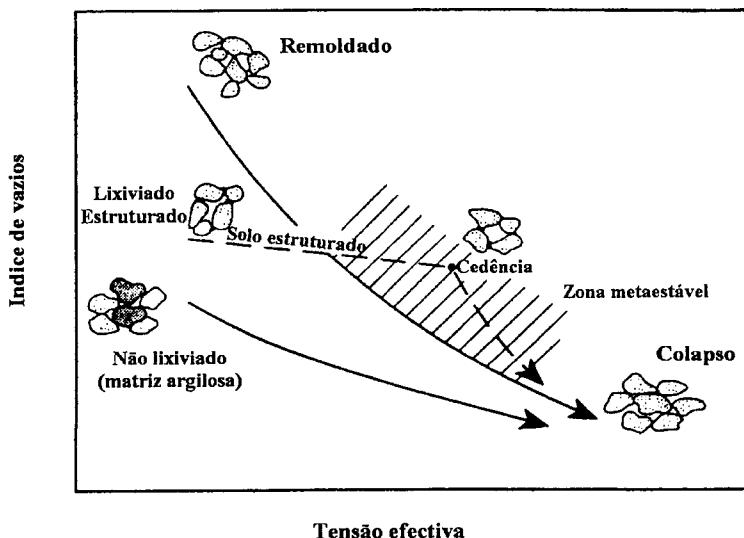


Figura 1.4 – Evolução do índice de vazios com a tensão efectiva, comparando solos estruturados com solos não-estruturados (adaptado de Anon, 1995).

O fenómeno de **colapso** está frequentemente associado a alguns tipos de solos residuais, geralmente arenosos ou siltosos, com uma estrutura aberta como a que resulta da alteração dos granitos, ou argilas activas, ou ainda solos do tipo “loess” (Blight, 1997). O comportamento colapsável dos solos é actualmente muito referido, devido aos graves problemas geotécnicos que ocorrem com estruturas fundadas nestes solos de que são exemplos os casos de obra relatados em Brand & Phillipson (1985). O assunto é abordado por autores, tais como: Ferreira, 1990; Smith *et al.*, 1994; Machado & Vilar, 1997; Klukanová *et al.*, 1998; Pereira & Fredlund, 2000; Birand & Primkulov, 2001.

Yudhbir (1982), define colapso como sendo todo o assentamento adicional mais ou menos imediato, caracterizado por uma súbita diminuição de volume, de solos não saturados que sob carga constante, sofreram aumento do teor em água ou mesmo saturação, com consequente enfraquecimento das cimentações existentes entre as partículas. Verifica-se que os solos que apresentam maior tendência para um comportamento colapsável, se localizam preferencialmente em regiões onde existe uma alternância nítida de estações seca e húmida, como por exemplo as zonas de clima semi-árido.

O fenómeno de assentamento por colapso, que interessa referir neste trabalho, é efectivamente o que se relaciona com os solos residuais de rochas ácidas ou intermédias como é o caso dos granítóides, que podem atingir um estado de alteração e lixiviação elevado, contendo uma grande proporção de grãos de quartzo, mais resistentes. Como resultado da lixiviação, e perda do material mais fino e decomposto, o solo residual torna-se numa areia siltosa ou argilosa com elevado índice de vazios e uma estrutura granular instável e colapsável.

Apesar da enorme importância da infiltração na estabilidade de taludes, no projecto de fundação de barragens, em escavações e em trabalhos subterrâneos, a literatura geotécnica apresenta uma informação muito limitada acerca da **permeabilidade** em solos residuais. A variação da macroestrutura e microestrutura num perfil de solo residual resulta numa larga dispersão de valores de permeabilidade, quer em profundidade, quer lateralmente.

Generalizações acerca de valores “típicos” para determinados tipos de solos residuais devem, segundo Blight (1997), ser evitadas, porque podem variar de local para local, como demonstram Lumb (1962, 1975); Deere & Patton (1971); Vargas (1974) e Blight (1988). Embora a estrutura cimentada, tenha aqui um papel importante, sendo menor a permeabilidade de um solo estruturado do que de outro desestruturado e com igual porosidade, o que é certo é que a grande influência das descontinuidades estruturais na definição das condições de circulação dos fluídos (Costa Filho *et al.*, 1985 e Maciel, 1991), traduz-se por um lado, numa diminuição da influência das ligações cimentadas na permeabilidade e, por outro, na dificuldade da determinação com precisão do valor desta propriedade.

Devido às limitações inerentes às amostras de dimensão reduzida, nos ensaios de permeabilidade executados em laboratório, em incluir as variações micro e macroestruturais bem evidentes no campo, e de acordo com a revisão internacional de ensaios em solos residuais (Brand & Phillipson, 1985), é claramente recomendada a preferência dos ensaios de permeabilidade *in situ*.

Depois do que se referiu neste subcapítulo, é importante realçar dois aspectos fundamentais relativamente às características dos solos residuais em geral:

- 1) o primeiro relaciona-se com o comportamento dos maciços de solos residuais face às propriedades geotécnicas (resistência, deformabilidade e permeabilidade), que depende fundamentalmente da macroestrutura, ou seja das descontinuidades relíquia herdadas da rocha-mãe;
- 2) o segundo, prende-se com a resposta do material “solo residual”, face às mesmas propriedades, e que, como é fácil constatar, ela é essencialmente controlada pela microestrutura, ou seja, a existência de ligações entre partículas, e também pela composição mineralógica, quer das partículas (grãos), quer do material (cimento) que constitui as referidas ligações.

Em resumo, são esperáveis grandes variações nas propriedades geotécnicas dos solos residuais, mas se forem conhecidas as características mineralógicas e estruturais destes solos, pode-se prever a sua influência no correspondente comportamento geotécnico (Townsend, 1985; Carvalho & Simmons, 1997).

Parâmetros tais como: índice de plasticidade e de consistência, compacidade relativa, teor em argila, etc., são largamente informativos acerca da resistência e deformabilidade dos solos sedimentares; são muito menos, para os solos residuais (Viana da Fonseca *et al.*, 1994). Um importante princípio a adoptar é que os solos residuais podem ter características geotécnicas melhores que as sugeridas pelos ensaios índice, principalmente se forem comparados com as classificações dos solos transportados (Blight, 1997).

Como foi referido por Leroueil & Vaughan (1990), entre outros, a metodologia clássica utilizada pela Mecânica dos Solos é inadequada na determinação do comportamento geotécnico dos solos residuais, uma vez que a ligação entre partículas não é reconhecida. Cardoso (1986) considera as ligações estruturais dos solos residuais graníticos do Porto responsáveis pela não aplicabilidade das correlações entre os resultados dos ensaios *in situ* e as características geotécnicas determinadas em laboratório. Estas correlações, estabelecidas no âmbito do estudo dos solos sedimentares, conduzem a valores conservativos quando aplicadas aos solos residuais.

As propriedades dos solos residuais devem ser estabelecidas tendo em atenção casos concretos. No caso de dúvida em relação a um comportamento fiável deste tipo de solos, as operações de reconhecimento ou a avaliação directa das propriedades no campo, têm muito maior significado do que a experiência e a aplicação da mecânica dos solos transportados (Carvalho & Simmons, 1997). Assim sendo, os solos residuais apresentam exigências específicas na sua identificação e caracterização. Para além das classificações clássicas da Mecânica dos Solos, deverão incluir-se a descrição do perfil de alteração e, os aspectos químicos, mineralógicos e físicos dos materiais presentes (Cook & Newill, 1988; Viana da Fonseca, 1996).

1.4 – Descrição e classificação dos solos residuais

1.4.1 – Classificações baseadas no perfil de alteração

Muitos autores recorrem ao uso dos perfis de alteração para obter uma melhor descrição e classificação dos solos residuais, uma vez que, como já se referiu, estes são o resultado da alteração das rochas *in situ* e, o grau de alteração vai variando com a profundidade, idade, litologia, etc. A maioria dos problemas geotécnicos associados aos solos residuais está relacionada com o desenvolvimento de perfis a partir de tipos de rocha específicos. Os prováveis problemas geotécnicos associados a determinados perfis de alteração, podem ser de certa forma previsíveis, tendo em conta o tipo de rocha original, o conhecimento do processo de alteração, a superfície topográfica e o clima (Netterberg, 1994).

O uso de perfis de alteração tem provado ser eficiente, permitindo a representação de todas as variantes ocorridas nos materiais durante o processo de alteração. Segundo Collares & Lorandi (1994), este método evita a omissão ou a sobreestima de alguns destes materiais. Por outro lado, os perfis de alteração podem ser consideravelmente variáveis e imprevisíveis, pois contêm materiais com uma larga gama de resistências e eventuais estruturas herdadas da rocha-mãe. As condições hidrogeológicas podem ser muito complexas. A sua aplicação a situações particulares tem que ser considerada com cuidado.

Contudo, a utilização dos sistemas de classificação em termos de graus de alteração são essenciais em projectos de Engenharia. Nesse sentido, assistiu-se, a partir da década de 50, a uma profusão de classificações baseadas nos graus de alteração. As características típicas das principais classificações de perfis de alteração e o seu desenvolvimento, foram revistas por Lee & De Freitas (1989), Dearman (1986; 1995), Price (1995) e Anon (1995), entre outros.

Das classificações mais importantes e com interesse geotécnico, destacam-se entre as primeiras, as propostas por Moye (1955) e Ruxton & Berry (1957), concebidas para rochas graníticas da Austrália e Hong Kong, respectivamente. Outras classificações específicas ou generalistas, são apresentadas por autores, tais como Little (1969), Fookes & Horswill (1970) e Newbery (1971). Posteriormente, numa tentativa de uniformizar as descrições dos maciços rochosos e solos, surgiram outras classificações: Deere & Patton (1971); Vargas (1971); Mello (1972); Dearman (1974, 1976); Stapledon (1976); BS5930:1981 (Anon, 1981a); IAEG (Anon, 1981b); ISRM (Anon, 1981c); Hencher & Martin (1982); Martin & Hencher (1986); Sueoka (1988); GCO (Anon, 1988); Geological Society (Anon, 1970, 1972, 1977, 1990, 1995). Algumas destas classificações referem-se a tipos litológicos específicos ou reflectem a localização geográfica onde o autor desenvolveu trabalhos; no entanto, a maioria delas

apresenta pontos comuns, uma vez que as mais recentes são, basicamente, o resultado da evolução e generalização das primeiras.

Parece evidente que, devido à diversidade litológica e estilos de alteração, é impossível produzir uma única classificação adequada a todos os tipos de rocha e a todas as escalas com significado para a Geologia de Engenharia. A diversidade de classificações é enorme, assim como os tipos de perfis de alteração, até mesmo dentro da mesma litologia. Por isso, as classificações mais utilizadas são as mais generalistas, favorecendo os aspectos mais comuns dos perfis de alteração, em detrimento dos específicos.

Nesse sentido, uma atenção especial é dada à classificação proposta por Little (1969) por ser uma das mais divulgadas e referidas em trabalhos recentes, como Dearman (1995), Anon (1995), Viana da Fonseca (1996) e Blight (1997). A classificação de Little, de carácter qualitativo e tendo em conta a grande variabilidade dos perfis, é reproduzida no Quadro 1.1, que por sua vez corresponde ao esquema ilustrado na Figura 1.1. Esta classificação tem a vantagem de relacionar cada grau de alteração com as respectivas propriedades geotécnicas e aplicabilidade em obras de Engenharia e baseia-se nos seguintes critérios: i) razão solo/rocha; ii) intensidade de descoloração; iii) preservação ou não da estrutura original da rocha.

No Quadro 1.2 apresentam-se alguns dos esquemas mais utilizados nas classificações dos perfis de alteração. Verifica-se que apesar de assentarem basicamente nos mesmos critérios de classificação, os limites entre horizontes de alteração variam significativamente de autor para autor. Hencher & Martin (1982) salientam que para apoiar o projecto e construção de obras é conveniente estabelecer os perfis de alteração com base nas variações das propriedades geotécnicas e com base em ensaios índice que podem fornecer informação quantitativa (de índole química, mineralógica e física). Neste sentido Martin & Hencher (1986) propõem que nas classificações dos graus de alteração se utilizem as seguintes propriedades e ensaios realizados no campo:

- côr;
- tamanho dos grãos e textura (análise granulométrica);
- microfracturação;
- desagregação (manual e “slake”);
- quantificação dos feldspatos (análise mineralógica);
- resistência (ensaios de campo: penetrómetros e/ou martelo de Schmidt);
- grau de decomposição (análise química – índices químicos);
- infiltração (e.g. teores de Al_2O_3 e H_2O).

No entanto, é importante lembrar que a alteração é um processo complexo e a utilização de índices específicos não é suficiente para estabelecer uma classificação credível. De acordo com Anon (1995), é preferível considerar um conjunto de características típicas em vez de propriedades particulares.

Alguns dos esquemas apresentados no Quadro 1.2, foram concebidos com base nos perfis de alteração observados em regiões tropicais. Nestes países, é usual dar-se mais ênfase às zonas superficiais (solo) dos perfis de alteração, uma vez que são estes materiais os mais solicitados em trabalhos de Engenharia. Assim a “Geological Society Engineering Group Working Party Report: Anon (1990)”, faz a revisão de vários sistemas de classificação e recomenda um esquema orientado para os solos tropicais, dando uma importância acrescida aos processos pedológicos.

Quadro 1.1 – Classificação dos graus de alteração (Little, 1969).

GRAU	DESIGNAÇÃO	RECONHECIMENTO NO CAMPO	PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS
VI	Solo	A textura da rocha não é reconhecível; as zonas mais superficiais contêm húmus e raízes de plantas.	Não é utilizável em fundações importantes. Instável em taludes quando a cobertura é destruída.
V	Rocha completamente alterada	A rocha está completamente decomposta pela alteração <i>in situ</i> , mas a textura original é ainda visível. Quando a rocha-mãe é o granito, os feldspatos originais estão completamente alterados em minerais argilosos. Não é recuperada como testemunhos de sondagem em furos por rotação normal.	Pode ser escavada à mão ou por “ripper” sem a utilização de explosivos. Não pode ser utilizada como fundação de barragens de betão ou em grandes estruturas. É possível empregar-se como fundação de barragens de aterro e como aterro. É instável em cortes muito altos e inclinados. Requer protecção contra a erosão.
IV	Rocha muito alterada	A rocha está tão enfraquecida pela alteração que mesmo grandes fragmentos são facilmente partidos ou esmigalhados à mão. Por vezes é recuperada como testemunho de sondagem em furos à rotação executados cuidadosamente. Apresenta coloração devida à presença de hidróxidos de ferro. Contém menos de 50 % de rocha.	Semelhante ao grau V. É impossível ser utilizada como fundação de barragens de betão. A presença errática de núcleos menos alterados impossibilita a sua utilização como fundação de grandes estruturas.
III	Rocha moderadamente alterada	Alteração considerável em toda a rocha. Possui alguma resistência, grandes fragmentos (testemunhos com diâmetro NX) não são partidos à mão. Muitas vezes apresentam coloração devida à presença de hidróxidos de ferro. A percentagem de rocha está compreendida entre 50 e 90 %.	É escavada com grande dificuldade sem recurso a explosivos. Na maioria das vezes pode desfazer-se sob um impulso de um “bulldozer”. Pode ser utilizada como fundação de pequenas estruturas de betão e como fundação de barragens de enrocamento. Aplicável em aterros semi-permeáveis. A estabilidade em taludes depende das características estruturais, especialmente da orientação das diaclases.
II	Rocha pouco alterada	Alterada distintamente na maior parte da rocha e com leve coloração. Nos granitos há alguma decomposição dos feldspatos. A resistência aproxima-se da da rocha sã. Mais de 90 % do material é rocha.	Requer explosivos para a escavação. Utiliza-se como fundação de barragens de betão. Muito permeável ao longo de diaclases abertas. É frequentemente mais permeável que as zonas acima ou abaixo. A sua utilização como inerte do betão é questionável.
I	Rocha sã	A rocha sã pode apresentar alguma coloração nas diaclases imediatamente abaixo à rocha alterada.	A coloração indica circulação de água ao longo de diaclases. Alguns fragmentos podem-se soltar em explosões ou por alívio de tensões, sendo necessário, por vezes, o uso de suporte em túneis e poços.

Nas regiões sub-tropicais, com estações seca e húmida distintas (e.g. Hong Kong), ou nos climas temperados que predominam em grande parte da Europa e América do Norte, tem que ser dada atenção à descrição do perfil completo. Por isso, é comum, e é recomendado por organismos internacionais (Anon, 1981b, c), o uso de classificações dos maciços divididas em 6 classes. Tendo como objectivo a sua aplicação à alteração das rochas ígneas em Hong Kong, foi recomendada pelo “Geotechnical Control Office” (Anon, 1988) uma classificação usando

Quadro 1.2 – Comparaçao entre descrições de perfis de alteração.

Descrição dos graus de alteração dos maciços rochosos (Anon, 1981c)	Dearman (1976) ¹ Todas as rochas	IAEG & ISRM (Anon, 1981 b, c) ¹ Todas as rochas	Vargas (1971) R. ígneas e metamórficas	Deere & Patton (1971) R. ígneas e metamórficas	Martin & Hencher (1986) R. ígneas e metamórficas	GCO (Anon, 1988) Rochas ígneas	Anon (1990) ¹ Todas as rochas	Anon (1995) ² Maciços heterogêneos
Solo	A	B	VI	Solo residual	IA	IA	RS	Humus
Todo o material foi convertido em solo: a estrutura do maciço e o “fabric” do material foram destruídos. Ocorre uma significativa variação de volume.				Solo residual maduro	IA	IA	VI	Zona 6 100 % GIV-GVI
Todo o material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. A estrutura da rocha original encontra-se bem preservada.				Solo residual	IB	VI	Solo residual	
Mais de 50 % do material rochoso encontra-se desintegrado ou decomposto num solo. Rocha sã ou descolorada está presente no maciço como esqueleto descontínuo ou em núcleos resistentes.				Solo residual	IC	VI	Solo residual	
Menos de 50 % do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorada está presente no maciço contínuo ou em blocos resistentes.				Solo residual jovem	IC sapróitico	VI	Solo residual	
A descoloração do maciço indica a alteração ao longo das descontinuidades e no material rochoso.					Sapróitio (<30% rocha)	PW 0/30	PW 0/30	
Não ocorrem sinais visíveis de alteração no material rochoso. Apenas uma leve descoloração ao longo das superfícies das maiores descontinuidades.								Zona 5 < 30 % GI-GIII
								Zona 4 30-50 % GI-GIII
								Zona 3 50-90 % GI-GIII
								Zona 2 > 90 % GI-GIII
								Zona 1 100 % GI-GIII

Notas: 1 – Escala de graus de alteração do maciço rochoso. Os graus não ocorrem necessariamente pela sequência indicada.

2 – GI – GVI: graus de alteração do material. GI a GIII é assumido como rocha e GIV a GVI como solo; o solo é considerado como material alterado podendo ser desagregado com a mão.

termos como PW – “Partially Weathered” e UW – “Unweathered Rock” para clarificar a confusão entre o maciço rochoso e o material rocha.

Várias classificações foram propostas mais recentemente (Anon, 1995), tendo em conta os diferentes tipos litológicos e maciços de alteração. O esquema referenciado na última coluna do Quadro 1.2, é o que melhor se adapta às condições de alteração dos maciços heterogéneos. Este sistema de classificação, com 6 zonas distintas de alteração, desenvolve-se assentando na mistura relativa entre materiais mais resistentes e menos resistentes do maciço. A fronteira entre rocha (graus GI a GIII) e solo (graus GIV a GVI) é estabelecida na base do material que pode ser desagregado manualmente.

1.4.2 – Propostas recentes de classificação de solos residuais

Os sistemas até agora referidos, embora forneçam informações sobre a estrutura do solo, pouco ou nada revelam sobre a sua composição, sendo necessário como suplemento outras classificações que descrevam a composição mineralógica e a natureza do solo.

As classificações baseadas em critérios pedológicos, podem ser úteis em Geotecnia, na ausência de qualquer outra informação e quando se dispõe de mapas de solos. No entanto, estes sistemas de classificação são geralmente complexos, tendo surgido, no decurso das últimas décadas, diversas classificações desenvolvidas por diferentes organizações.

Os solos residuais tropicais podem resumir-se a três tipos distintos, com maior interesse para Geotecnia, correntemente designados por solos lateríticos, “andosols” e solos negros expansivos (“Black Cotton Soils”). Wesley (1988) apresenta os sistemas de classificação mais utilizados, (Classificação Francesa, Americana e da FAO – Unesco), descrevendo os diferentes grupos pedológicos de solos residuais tropicais, minerais argilosos predominantes e características associadas.

De acordo com critérios puramente pedológicos, as rochas ígneas ácidas sob condições de clima temperado mediterrânico, com Verão seco e quente, que se fazem sentir no Alentejo (Cap.3), dão origem, essencialmente, à formação de solos mediterrânicos pardos (Silva, 1990); ou, em zonas de declive acentuado, ocorrem preferencialmente solos litólicos não húmicos, pouco evoluídos, resultantes apenas da alteração *in situ* da rocha-mãe (Cardoso, 1974).

As classificações de solos mais usadas em Geotecnia, são o Sistema Unificado e a AASHTO. Mas como já se referiu, as correlações entre os parâmetros índice e as propriedades mecânicas nem sempre são aplicáveis aos solos residuais devido, quer às suas características estruturais quer à natureza mineralógica. Na realidade, é difícil incluir a composição mineralógica num sistema de classificação, tanto pelo facto de poderem coexistir mais do que um mineral argiloso na fracção argila, como também, de os minerais mais activos, mesmo em menores quantidades, poderem controlar o comportamento do solo. Esta situação atinge proporções consideráveis quanto maior for a fracção fina dos solos residuais, o que é habitual nas regiões tropicais. Por esta razão, alguns autores como Vargas (1988) e Yudhbir *et al.* (1988), propõem uma adaptação ao sistema de Casagrande para este tipo de solos, em que a actividade da argila (índice introduzido por Skempton) é utilizada juntamente com o índice de plasticidade e o limite de liquidez utilizados no sistema original, para além da granularidade e do teor em matéria orgânica.

Por outro lado, tanto estas classificações como o sistema proposto por Anon (1990), não consideram as características estruturais dos solos residuais, principalmente nos saprolitos, as quais distinguem estes solos dos sedimentares, e contribuem decisivamente para o seu comportamento geotécnico peculiar no campo e no laboratório. Para além disso, estes sistemas utilizam muitos termos pedológicos, pouco familiares aos engenheiros geotécnicos.

É precisamente esta dupla influência da composição, quer física (percentagem de rocha sã, forma das partículas, etc.) e mineralógica, quer da estrutura (ver secção 1.3), que formam a base de um sistema universal de classificação dos solos residuais, recomendado por Wesley & Irfan (1996) e apresentado ao ISSMFE – “International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering”.

As principais razões para a utilização de um sistema de classificação especial para os solos residuais são apontadas por Wesley & Irfan *in Blight* (1997), e de certa forma resumem o que foi dito sobre o assunto. Há características específicas dos solos residuais que não são adequadamente contempladas pelos métodos convencionais de classificação de solos, como o “Unified Soil Classification System” (USCS). Algumas destas características são:

- i) as pouco usuais características mineralógicas das argilas presentes nestes solos, conferem-lhes propriedades que não são compatíveis com as normalmente associadas ao grupo a que o solo pertence, de acordo com os sistemas existentes como o USCS;
- ii) o maciço de solo residual *in situ* pode apresentar uma sequência de materiais variando de um solo verdadeiro a uma rocha branda, dependendo do grau de alteração, o qual pode não ser adequadamente descrito usando os sistemas baseados nas classificações dos solos transportados;
- iii) os sistemas de classificação convencionais assentam maioritariamente nas propriedades do solo no seu estado remexido/remoldado; isto conduz normalmente a conclusões erradas quando se trata de solos residuais, cujas propriedades são, na maior parte dos casos, fortemente influenciadas pelas características estruturais herdadas da rocha-mãe ou desenvolvidas como consequência da alteração.

O sistema proposto por Wesley & Irfan (1996), utiliza métodos semelhantes aos tradicionalmente usados na classificação e descrição dos solos sedimentares e, consiste em duas partes:

- a) a classificação do material em si, sem fazer qualquer referência ao estado não perturbado (material solo);
- b) a descrição do solo tal como se apresenta no seu estado não perturbado (em jazida), em termos de rigidez, densidade relativa, descontinuidades, etc. (maciço terroso).

Trata-se de um sistema simples e prático para a classificação de solos residuais (Quadro 1.3), baseado na composição mineralógica e na micro e macroestrutura do solo. Este sistema pretende ordenar os solos residuais, dividindo-os em grupos, segundo factores comuns da sua formação e/ou composição e perante os quais se podem esperar propriedades geotécnicas semelhantes. Neste sistema, destacam-se as descrições e relatórios, permitindo aos engenheiros encontrar o melhor “caminho” entre o complexo mundo dos solos residuais e, permite colocar qualquer solo residual numa categoria específica, assente nas propriedades geotécnicas comuns (Blight, 1997).

Quadro 1.3 – Classificação e características dos grupos de solos residuais (segundo Wesley & Irfan (1996) e adaptado de Blight, 1997).

GRUPO PRINCIPAL	SUBGRUPO	EXEMPLOS	MEIOS DE IDENTIFICAÇÃO	PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS GEOTÉCNICOS PROVÁVEIS
GRUPO A (Solos sem uma forte influência mineralógica)	(a) Forte influência da macroestrutura	Rochas muito alteradas, resultantes de rochas ígneas ácidas ou intermédias, e sedimentares.	Aparência geral (inspecção visual)	Trata-se de um grupo muito vasto (incluindo os “saprolitos”), onde o comportamento (especialmente em taludes) é dominado pela influência das descontinuidades, fissuras, etc.
	(b) Forte influência da microestrutura	Rochas completamente alteradas provenientes de formações ígneas e sedimentares.	Inspecção visual e avaliação da sensibilidade, índice de liquidez, etc.	Estes solos são essencialmente homogéneos e formam um grupo considerável e muito mais fácil de avaliar sistematicamente e analisar do que o grupo (a). A identificação da natureza e papel das ligações entre partículas (desde as ligações primárias herdadas, até às fracas ligações secundárias formadas durante a alteração) é importante para a compreensão do seu comportamento.
	(c) Pequena influência estrutural	Solos formados a partir de rochas muito homogéneas.	Pouca ou ausência de sensibilidade; aparência uniforme.	É um subgrupo relativamente pequeno. O seu comportamento provável assemelha-se ao dos solos moderadamente sobreconsolidados.
GRUPO B (Solos fortemente influenciados por minerais argilosos comuns)	(a) Grupo da esmectite (montmorilonite)	“Black Cotton Soils” (solos negros), maioritariamente formados em regiões tropicais em condições de drenagem pobres. “Vertisols”.	Cor escura (cinzenta a negra) e elevada plasticidade, sugerem solos deste grupo.	São normalmente solos problemáticos que se encontram preferencialmente em zonas baixas ou planas, possuem resistência baixa, compressibilidade elevada, e expansibilidade e retracção elevadas.
	(b) Outros minerais			É provavelmente um subgrupo muito pequeno.
	(a) Grupo da alofana	Solos resultantes da alteração de cinzas vulcânicas nas regiões de clima tropical húmido, e temperado. “Andosols”.	Teor em água natural elevado, e modificações irreversíveis devidas à secaem.	Estes solos são caracterizados por valores do teor em água natural elevados, assim como limites de liquidez e plasticidade elevados. As propriedades geotécnicas são na generalidade boas, embora em alguns casos a sensibilidade elevada pode dificultar a trabalhabilidade e compactação.
GRUPO C (Solos fortemente influenciados por minerais argilosos essencialmente encontrados somente nos solos residuais)	(b) Grupo da haloísite	Solos derivados, fundamentalmente, de rochas vulcânicas antigas; especialmente as argilas vermelhas tropicais. “Ferralsols”.	Cor avermelhada; uma topografia que permita boa drenagem associada a rochas vulcânicas, são indicadores úteis.	São geralmente solos de grão fino, de plasticidade baixa a média, e actividade baixa. As propriedades geotécnicas são normalmente boas. (De notar que por vezes há uma certa sobreposição entre solos haloíticos e alofânicos).
	(c) Grupo dos sesquióxidos	Estes solos são referidos de uma forma abrangente como “lateríticos”, ou “Laterites”.	Aparência granular ou nodular.	Trata-se de um grupo muito vasto, variando das argilas siltosas às areias grossas e cascalho. O comportamento pode variar de plasticidade baixa nas argilas siltosas até não plástico nas areias e cascalho.

A referida classificação é apresentada aqui de forma modificada, e de acordo com os autores, trata-se de um complemento a qualquer método de classificação universal ou local, em uso. Desta forma, não proporciona uma descrição detalhada e sistemática dos solos residuais no campo ou em laboratório, além de não pretender substituir qualquer método particular ou *standard* como a USCS ou alguma classificação proposta especialmente para solos residuais.

1.5 – Os solos residuais de granitóides

Depois de tudo o que se referiu em relação aos processos de formação, características e classificação dos solos residuais em geral, e apesar da maioria dos pontos focados se aplicar aos solos residuais graníticos, faz todo o sentido realçar, nesta secção, os aspectos inerentes aos solos residuais de granitóides.

A meteorização do granito em climas temperados da Europa Ocidental é normalmente designada por arenização. As “arenas” são o produto final da alteração meteórica do granito *in situ*, não se verificando modificações significativas na estrutura original da rocha ou maciço rochoso. Trata-se de uma meteorização do tipo esquelética, e em que os materiais se comportam como solos de fracção arenosa dominante, do ponto de vista geotécnico. Como não foram submetidas a qualquer transporte, as “arenas” incluem-se na designação geotécnica de solos residuais ou “saprolitos” (Begonha, 1997).

Sequeira Braga *et al.* (1989, 1990) referem que na arenização pode haver perdas de material entre 10 e 46 %, existindo uma zonalidade climática dos minerais secundários, traduzida por um grau de evolução mineralógica crescente com o aumento de temperatura: vermiculite e interestratificados 2:1 dominantes na Escandinávia e Escócia; caulinite e gibbsite dominantes na Galiza, Espanha Central e Noroeste de Portugal; e mistura das duas na Europa Atlântica Média, podendo conter maioritariamente ilite e clorite, segundo Aires-Barros (1991).

A meteorização das rochas graníticas implica variações nas composições mineralógica e química, verificando-se a alteração rápida de alguns minerais e a relativa estabilidade de outros. Deste modo, a composição mineralógica da fracção argilosa dos produtos finais da alteração, incluindo os solos residuais, é função da actuação de diversos factores (secção 1.2.3), assim como do estado de alteração do solo, daí que os minerais secundários presentes nos solos residuais de rochas granitóides, podem ser bastante diversificados.

Na apreciação que se faz nesta secção, é necessário ter presente que, apesar do substrato rochoso poder ser similar em duas regiões, os solos residuais poderão ter características completamente distintas. Por exemplo, os solos resultantes da alteração do granito nas condições quentes e húmidas da Malásia têm propriedades muito diferentes das dos solos graníticos de zonas mais frias, semi-áridas da África do Sul (Blight, 1997).

Por outro lado, consoante o estado de alteração, um solo residual de determinada rocha granítica pode ter um comportamento típico de um solo granular, se os minerais constituintes se encontrarem na sua maioria não alterados e pouco cimentados, mas pode ter um comportamento completamente diferente, se numa fase mais avançada da alteração, certos minerais (e.g. feldspatos) estiverem totalmente alterados; aqui o solo adquire um carácter plástico, moldável, mais compressível e menos resistente. Ou seja, neste caso, ter-se-á a mesma rocha-mãe, clima igual, topografia semelhante, mas diferente tempo de exposição à meteorização.

Baynes & Dearman (1978b) concluíram que as modificações das propriedades geotécnicas dos granitos alterados são devidas à microfracturação e porosidade intergranular, observadas na microestrutura do material alterado estudado. Collins (1985) comprova esta teoria com granitos alterados do Brasil. Este autor também acrescenta que o aumento da rigidez num saprolito granítico, deve-se às ligações entre os grãos de quartzo por minerais argilosos e/ou sesquióxidos, o que naturalmente resulta num aumento da resistência coesiva do solo.

Os trabalhos publicados sobre a mineralogia das argilas resultantes de granitos alterados é escassa, no entanto destacam-se: Lumb (1962; 1965), Lumb & Lee (1975) e Irfan (1996) sobre os granitos de Hong Kong; Irfan & Dearman (1978a) sobre o granito de Cornwall (Inglaterra); Baynes & Dearman (1978a), Gilkes *et al.* (1981) sobre aspectos químicos e mineralógicos dos granitos da Austrália; Raj (1985) refere-se a um perfil de alteração de um granito biotítico da Malásia; Miranda (1986) sobre a evolução mineralógica e geoquímica da meteorização de granitos de Sintra (Portugal); Furtado (1970, 1973, 1982) e Sequeira Braga (1985, 1988) relativamente aos minerais dos solos graníticos do Norte e Centro de Portugal; Silva (1990) sobre a geoquímica de alteração de rochas granítóides do Baixo Alentejo.

Nos perfis residuais de rochas ígneas, são frequentes os núcleos rochosos ou blocos de rocha sã no seio do solo residual ou rocha mais alterada (Lumb, 1962). É um tipo de alteração comum, disjunção esferoidal, neste tipo de maciços rochosos em certas zonas do globo terrestre, nas quais se inclui o Alentejo (Figura 3.7 – amostra 74). Em geral, o desenvolvimento de perfis com grandes blocos de rocha “*corestones*” é muito comum nos granitos de grão grosseiro e com grande espaçamento entre as diaclases (e.g. Hong Kong e Alentejo). Nos perfis de alteração dos granitos em clima temperado e subtropical, é comum a ausência de horizontes de alteração, devido à criação de microambientes de alteração causados pelos sistemas de diaclasamento e variações texturais da rocha-mãe. As condições climáticas temperadas que se registam em certas regiões da Europa (Portugal), América do Norte e Ásia (Hong Kong), não permitem o desenvolvimento de grandes espessuras de solos residuais graníticos (Irfan, 1996; Viana da Fonseca, 1996).

Os solos residuais resultantes da alteração dos granitos, apresentam geralmente grandes variações no tamanho dos grãos. Lumb (1962), tomando como exemplo os solos graníticos de Hong Kong, refere que essas variações se devem, em parte, às diferenças entre os procedimentos (preparação e ensaios) preconizados. No entanto, a principal razão para a grande variação na dimensão das partículas, é a variação da composição mineralógica e da textura destes solos, proveniente dos diferentes graus de alteração química e física, assim como das condições de drenagem de cada local. Em geral, a percentagem da fração fina (argila e silte) aumenta com o grau de alteração, mas isso depende, uma vez mais, das condições locais.

Nos climas temperados e subtropicais, a percentagem de argila nas amostras de solos residuais graníticos, é geralmente pequena (< 10 %), (Irfan, 1996; Viana da Fonseca, 1996; Begonha, 1997). Contudo, importa salientar que, os produtos de alteração da dimensão dos minerais de argila, podem estar concentrados em certas zonas do perfil como no preenchimento de fracturas, ou mesmo, no interior de feldspatos parcialmente alterados e, nem sempre são contabilizados nas análises granulométricas (Irfan, 1996). Por outras palavras, dificilmente se obtêm amostras representativas em perfis de alteração de rochas graníticas que apresentam grandes variações texturais, físicas e, consequentemente, das propriedades geotécnicas, tanto na vertical como na horizontal.

O comportamento dos solos residuais saprolíticos graníticos *in situ* e no laboratório, difere consideravelmente dos solos transportados com distribuição granulométrica e características de plasticidade semelhantes (Massey *et al.*, 1989). Isto deve-se às suas propriedades mineralógicas e microestruturais especiais desenvolvidas como herança do ambiente de meteorização ou outros processos de alteração. Por esse motivo, as correlações desenvolvidas para os solos transportados, relacionando o resultado dos ensaios de identificação e as diferentes propriedades geotécnicas, parecem não ser aplicáveis a estes solos (Vaughan, 1988). Isto deve-se, em parte, às dificuldades em determinar o verdadeiro significado da granularidade destes solos, consequência da extrema variabilidade do tamanho das partículas, porosidade e produtos de alteração, mesmo dentro da mesma amostra, associada à presença em larga escala de ligações frágeis e da microestrutura (quer herdada da rocha-mãe, quer formadas durante a meteorização), (Irfan, 1988). Os granitos muito a completamente decompostos, podem tornar-se muito densos, e as ligações primárias herdadas são suficientemente fortes para fornecer uma coesão verdadeira ao material solo (Irfan, 1996).

De qualquer modo, a tendência geral é que à medida que as rochas graníticas se vão alterando, a porosidade desenvolve-se dentro e entre os grãos dos minerais, como descrevem Baynes & Dearman (1978b). Estes poros podem ser mais tarde parcial ou totalmente preenchidos por produtos de alteração como argilas que podem ou não ser lixiviadas. Em casos extremos, mais de metade da massa original do material pode ser perdida, por decomposição e posterior lixiviação, apesar dos grãos maiores e resistentes manterem as posições relativas ao material original. Muitos saprolitos graníticos apresentam esta aparência e estes materiais podem manter-se em estado metaestável, desde que a posterior alteração ou aplicação de uma carga, não provoque a quebra das ligações enfraquecidas e o consequente colapso do maciço, tornando-se num solo residual que perdeu a estrutura da rocha original (Lumb, 1962; Anon, 1995).

Uma das consequências das ligações intergranulares presentes nos solos residuais que mantêm a textura da rocha original, independentemente da sua densidade, é a existência de uma coesão verdadeira. No entanto, as ligações relíquia não sobrevivem às tensões associadas à amostragem e assim, quando se mede a resistência do material nos ensaios, ela pode não ser representativa do material *in situ*. Vaughan (1985) provou isto em solos residuais de granitos da Tailândia onde houve uma pequena variação nas medições da coesão de materiais cujo peso específico natural variava entre 11 e 20 KN/m³. Baynes & Dearman (1978b) demonstraram que os solos graníticos podem ter um comportamento dilatante no ensaio de corte directo para níveis baixos de tensão e onde menos de 30 % do material é argiloso; para percentagens de argila superiores, o comportamento era compressivo. Cheung *et al.* (1988) também referem o comportamento dilatante durante ensaios de saprolitos graníticos não perturbados, sob tensões confinantes baixas, deduzidas de uma coesão “aparente”, apesar do seu elevado índice de vazios e potencial de metaestabilidade. A relação entre as ligações primárias e/ou secundárias nos mecanismos de corte dos granitos decompostos foi investigada por autores como Ebuk *et al.* (1993) e Viana da Fonseca (1996). Devido ao elevado índice de vazios, os solos derivados de alteração dos granitos, também exibem uma significativa coesão aparente devida à sucção quando parcialmente saturados. Esta resistência temporária é perdida durante a saturação.

À escala do maciço, é ponto assente que as descontinuidades “relíquia” (fracturas, veios, etc.) são determinantes tanto na permeabilidade, como na resistência ao corte dos taludes de solos residuais graníticos.

Os perfis de alteração de rochas graníticas, principalmente de regiões temperadas, em que geralmente os solos não se encontram muito evoluídos (Moye, 1955; Ruxton & Berry, 1957; Anon, 1988), mas apresentam características que lhes são singulares e que diferem dos solos residuais de outras rochas como calcários, argilitos, xistos, arenitos, etc., levou Anon (1995), (Quadro 1.2), a sugerir uma classificação apropriada a cada litologia e ao estado de heterogeneidade do maciço.

Apesar da maioria das classificações baseadas nos perfis de alteração (secção 1.4), apresentar 6 classes, correspondendo a diferentes graus de alteração, o que é certo é que em certas regiões do globo, a transição entre granito fresco e alterado é frequentemente abrupta, tal como refere Moye (1955) relativamente aos granitos da Austrália, podendo, segundo Dearman (1995), a classificação ser simplificada para 4 ou 3 estágios de alteração: i) rocha sã; ii) rocha alterada (descolorida); iii) solo residual (decomposto e/ou desintegrado). Em muitas regiões de Portugal, das quais destacamos as do Alentejo, é muito frequente este tipo de perfil de alteração dos granitóides, em que se passa rapidamente de rocha sã para solo residual, através de uma pequena espessura de rocha alterada.

A descrição da alteração das rochas ígneas de grão grosso, principalmente granitos, tem sido alvo de especial atenção por parte dos investigadores, porque, segundo Price (1995), estas rochas, enquanto sãs, estão bem expostas e relativamente uniformes. Irfan & Dearman (1978b) descrevem a petrografia da alteração do granito, enquanto Krank & Watters (1983) apresentam as modificações das propriedades geotécnicas associadas à alteração do granodiorito. Perfis de granito foram descritos por Raj (1985). Malomo (1980) estabelece índices de alteração dos feldspatos dos granitos que relaciona com a variação da porosidade e densidade. O problema da fronteira entre granito alterado e solo residual foi examinado por Howat (1985), através dos valores de SPT nos granitos alterados de Hong Kong. Lee & De Freitas (1989) propõem uma escala de alteração de granitos baseada na durabilidade dos mesmos. Viana da Fonseca (1996) e Ng *et al.* (2000), investigaram a resistência ao corte e deformabilidade dos saprólitos graníticos, do Norte de Portugal e de Hong Kong, respectivamente. Irfan (1996) analisou a mineralogia, propriedades e classificação dos granitos alterados de Hong Kong. Shelton & Cooper (1984) e Au (1993) analisam a resistência ao corte de um granito decomposto. Lee & Coop (1995) e Pun *et al.* (1996) referem-se ao comportamento intrínseco (triaxial) de saprólitos graníticos.

Segundo Vaughan *et al.* (1988), como resultado da alteração de granitos, podem-se obter vários tipos de partículas de solos: i) grãos de minerais individuais; ii) agregados de grãos provenientes da rocha original, com vários graus de alteração e resistência; iii) partículas individuais ou aglomerados de partículas criados durante o processo de alteração. Assim, uma grande variedade de partículas com resistências variáveis está geralmente presente nos solos residuais graníticos, porque o quartzo, originário da rocha-mãe, persiste, normalmente, sob forma de grãos resistentes e praticamente inalteráveis, enquanto que outros minerais (feldspatos, micas, etc.) foram parcial ou totalmente alterados.

Os solos residuais graníticos, são materiais complexos e heterogéneos, e a sua análise (ensaios) e caracterização apresenta, com frequência, problemas à engenharia geotécnica. Os estudos de campo e de laboratório da resistência ao corte dos solos graníticos de Hong Kong, mostraram significativas variações nas propriedades geotécnicas destes solos, entre poucos metros ou até na mesma amostra. Isto é devido, principalmente, às variações de “microfabric”, incluindo as ligações entre grãos herdadas da rocha-mãe e o microambiente de alteração (Irfan, 1988).

A resistência do solo saprolítico de granito, particularmente nos estágios iniciais de corte e sob a aplicação de baixas tensões, é função das ligações frágeis herdadas e geradas e, das propriedades (incluindo resistência e porosidade) das partículas (primárias e secundárias) que compõem o solo e também do seu arranjo ou textura. Sendo o quartzo o principal constituinte do solo, sobrevivendo sob forma de grãos resistentes e relativamente inalterados, influencia significativamente a resistência dos solos graníticos. Os valores registados para o ângulo de atrito a partir de ensaios de corte directo e triaxiais, em amostras saturadas, são geralmente semelhantes aos verificados para materiais arenosos (30° - 40°). A resistência, devido às ligações entre partículas é de difícil determinação no laboratório, devido à danificação das mesmas durante a amostragem ou preparação das amostras, particularmente em solos fracamente estruturados, facto de que resulta uma subestimação das propriedades de resistência *in situ*.

Martin *et al.* (1992) referem-se aos solos residuais resultantes da alteração de granitos em clima temperado (província de Piedmont – na parte oriental dos U.S.A.). Descreve-os como sendo solos essencialmente areno-siltosos, com considerável resistência ao corte ($\phi = 32^\circ$), devido à presença de grãos de quartzo inalterados, e baixa compressibilidade devido à estrutura herdada. Os autores chamam a atenção para a extrema dificuldade em obter amostras não perturbadas, (para além de que nestas regiões temperadas as espessuras destes solos são geralmente modestas, não costumando ultrapassar 20 m), o que aliás está de acordo com Devlin *et al.* (1995), segundo o qual é impossível obter amostras de Classe 1 nos solos graníticos de Leinster (Irlanda), para a determinação das características de resistência e deformabilidade. Geralmente são favoráveis para terrenos de fundação; mas nos casos de obra em que o seu comportamento não é o desejável, os autores recomendam métodos e técnicas de melhoramento, baseados na experiência com estes solos.

Haskins *et al.* (1998) apontam valores de ϕ (20° - 40°) relativamente elevados para os solos residuais graníticos da África do Sul, sendo materiais com densidade baixa, porosidade elevada e, permeabilidade moderada; o contacto com a rocha é abrupto; a natureza aberta do saprolito leva a exibir uma estrutura metaestável e colapsável.

Pastore *et al.* (1994), referindo-se a saprolitos graníticos do Brasil (clima tropical), com valores de $\phi = 31,5^\circ$, aconselham a utilização das teorias da Mecânica das Rochas, para auxiliar os estudos dos maciços de solos residuais saprolíticos, uma vez que eles são muito influenciados pela macroestrutura herdada da rocha-mãe.

A identificação da transição entre rocha e solo nas rochas graníticas é investigada por muitos autores, porque as modificações provocadas pela alteração das rochas graníticas, levam a reduções abruptas na resistência em períodos de tempo relativamente curtos. Arel & Önalp (2000) propuseram-se estudar este fenómeno, através de um método que relaciona a porosidade com as propriedades mecânicas, utilizando o parâmetro B da pressão intersticial medida durante os ensaios triaxiais.

Viana da Fonseca, Matos Fernandes, Cardoso & Barreiros Martins (1994) resumem a experiência portuguesa da caracterização geotécnica dos solos residuais dos granitos do Norte de Portugal, assente fundamentalmente nos dados provenientes de 24 barragens da região, e salientam os seguintes aspectos:

- i) a heterogeneidade patente nestes solos, principalmente devida à existência de descontinuidades, cujas propriedades (intensidade, espaçamento, orientação e continuidade), atribuem os autores como principal factor de alteração dos granitos;
- ii) a espessura dos solos residuais pode atingir 20 m; variando os valores mais comuns entre 5 e 9 m;
- iii) os solos residuais são geralmente bem graduados (reflectido a textura da rocha-mãe) e apresentam plasticidades baixas; geralmente são classificados como areias siltosas (SM) e em alguns casos areias argilosas (SC);
- iv) relacionam os valores baixos do peso específico natural (15-18,5) KN/ m³, com a estrutura aberta dos solos, resultante dos processos de lixiviação; assim como, os valores relativamente elevados da permeabilidade (10⁻⁶-10⁻⁵) m/s, reflectem a influência da microestrutura na criação de caminhos preferenciais para a percolação de água;
- v) as características de compactação variam da seguinte forma: $W_{opt.}$ (15,2-19,9) % e $\gamma_{dmáx.}$ (15,7-17,2) KN/m³ para a compactação leve; as curvas de compactação quando comparadas com as dos solos transportados com uma distribuição granulométrica semelhante, revelam valores menores de $\gamma_{dmáx.}$ relativamente ao $W_{opt.}$; no que respeita à aplicação destes solos em aterros, a experiência tem demonstrado um comportamento francamente bom, nomeadamente na construção de estradas, com valores moderadamente elevados de C.B.R. (Novais Ferreira *et al.*, 1988);
- vi) o valor determinado para o coeficiente de impulso em repouso para os solos residuais graníticos foi de $K_0 = 0,35$, (o que está de acordo com as deduções feitas por Vaughan & Kwan (1984) para este tipo de solos, e posteriormente, Viana da Fonseca *et al.* (2001) confirmaram uma variação entre 0,35 e 0,50); além disso a experiência regional de escavações suportadas, tem mostrado que não há tendência para deslocamentos substanciais e generalizados, (exceptuam-se os desprendimentos localizados causados por descontinuidades relíquia), o que seria de esperar se estes maciços estivessem sujeitos a elevados estados de tensão de confinamento horizontais;
- vii) relativamente às características de resistência ao corte a partir de ensaios triaxiais, Viana da Fonseca *et al.* (1994) deduzem as seguintes tendências gerais:
 - a) os valores de ϕ' (25 - 41)º variam menos que os de c' (0 - 55) KPa, (tendo em conta que o tipo de ensaio nem sempre foi o mesmo);
 - b) a dispersão dos parâmetros de resistência ao corte diminui quando se utilizam amostras maiores, devido à menor dependência da heterogeneidade do solo e à melhoria na qualidade da amostra;
 - c) os valores de ϕ são relativamente elevados, com o limite inferior rondando 27-30º, valores que correspondem aos valores típicos obtidos para materiais granulares;
 - d) os solos residuais graníticos apresentam uma vasta gama de compacidades (NsPT varia de 7 a mais de 60), enquanto que a variação do ϕ é muito menor, quando comparada com variações semelhantes de NsPT para os solos transportados; os autores atribuem esta diferença à estrutura aberta mas cimentada destes solos residuais, que condiciona o seu comportamento mecânico (Rocha Filho *et al.*, 1985), tornando-os menos dependentes do índice de vazios do que os solos transportados;
 - e) as diferenças na resistência ao corte entre níveis mais ou menos cimentados reflecte-se, basicamente, nos valores de c' , os quais variam de 0 KPa (solos remoldados) até cerca de 50 KPa, para valores de tensão de consolidação efectiva baixos;
 - f) os solos exibem resistências de pico e tendência para a dilatação positiva, (ou para a geração de poropressões baixas a negativas nos ensaios não drenados), típicos de

- materiais densos ou sobreconsolidados; o que entra em contradição com o seu elevado índice de vazios, reflectindo deste modo o efeito da estrutura cimentada;
- viii) correlações entre qc (CPT) e N_{SPT} estabeleceram valores para o quociente qc/N_{SPT} da ordem de 0,35 – 0,40 MPa; estes resultados são típicos de solos arenosos e são geralmente aceites para solos transportados;
 - ix) comparações entre os valores de N_{SPT} e o N_{DPSH} , revelaram concordância entre as correlações teóricas e empíricas, pelo que se deduz que o amostrador do SPT, funciona nestes solos, como se não fosse oco e a sua ponteira terminasse em cone;
 - x) relativamente aos parâmetros de deformabilidade e até mesmo de capacidade de suporte (testados por ensaios triaxiais e de placa), pode dizer-se que as correlações usadas para os solos transportados podem ser adaptadas aos solos residuais graníticos, sendo os valores em geral conservativos; por outras palavras, pode-se esperar um melhor comportamento *in situ* para estes solos, que o previsível por ensaios e/ou correlações;
 - xi) os ensaios de consolidação realizados, a que posteriormente se associam as curvas de compressibilidade obtidas dos ensaios edométricos em Viana da Fonseca (1996), retratam uma característica singular destes solos, a metaestabilidade (Vaughan, 1988); as observações experimentais implantadas em ábacos que relacionam o grau de decomposição, o índice de vazios e a variação volumétrica na alteração dos granitos (Vaughan & Kwan, 1984 e Collins, 1985) referidos por Irfan (1988) e Viana da Fonseca (1996) revelam que os saprolitos analisados se situam, na sua maioria, na zona metaestável (Baynes & Dearman, 1978b), devido a terem sido sujeitos a fortes lixiviações, denotando estruturas granulares abertas; alguns são meramente granulares (soltos) e outros evidenciam tendências de pontes interparticulares cimentadas.

A probabilidade de instabilidade de taludes foi estudada por Martins *et al.* (2001), com base nos parâmetros geotécnicos, ϕ , c e γ . Os autores chegaram às seguintes conclusões: a influência de c' diminui enquanto que a influência de ϕ' aumenta, com o aumento de γ ; por outro lado, a influência de c' aumenta com o aumento da inclinação do talude, à medida que a influência de ϕ' diminui. De notar que nesta análise não foram considerados parâmetros importantes, tais como, o nível freático e a existência de descontinuidades.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA APLICADA

2 – METODOLOGIA APLICADA

2.1 – Introdução

O plano inicial da presente tese incluía o estudo de solos residuais de várias origens genéticas, isto é, resultantes de diferentes tipos de rocha-mãe, mas pertencentes a uma área restrita. Depressa se chegou à conclusão que, devido à grande variabilidade de características físicas e geomecânicas directamente relacionadas com a composição e textura da rocha de origem, essa opção levaria a diferentes linhas de investigação mais ou menos paralelas. Então optou-se, pela escolha de solos residuais das rochas granítoides, as mais abundantes na região, e pelo alargamento da área em estudo, abrangendo solos residuais resultantes das principais manchas de rochas graníticas (s.l.) de Portugal, a sul do Rio Tejo. Deste modo, o plano de tese estabelecia como fundamental, a realização de um vasto conjunto de ensaios e a aplicação de técnicas perfeitamente conhecidas e rotinadas em algumas zonas de uma região bastante ampla, de forma a abranger diferentes tipos de solos residuais graníticos (s.l.).

A definição das diferentes manchas de solos residuais de granítoides teve como base o tipo litológico predominante do maciço rochoso que lhes deu origem, nomeadamente granito, granodiorito e quartzodiorito. Daí que a adopção da designação das várias manchas de solos residuais recaia sobre as correspondentes formações geológicas (ver Cap. 3). Ao todo, são 16 maciços eruptivos que deram origem aos solos residuais sobre os quais incidiu o presente estudo e, cujas áreas correspondentes são indicadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Áreas aproximadas dos maciços eruptivos a que correspondem os solos residuais estudados.

Manchas de solos residuais	Áreas aproximadas (Km ²)
Maciço eruptivo de Évora	500
Maciço eruptivo de Arraiolos	300
Maciço eruptivo de Montemor-o-Novo	70
Maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz	160
Maciço eruptivo do Redondo	170
Complexo granítóide da Vidigueira	40
Maciço granítico de Pias	70
Maciço granítico de Sta. Eulália	480
Maciço granítico de Elvas	16
Maciço granítico do Vimieiro	350
Maciço granítico de Fronteira	30
Maciço granítico de Ervedal	35
Maciço granítico do Gavião	8
Maciço granítico de Portalegre	120
Maciço granítico de Carreiras	200
Complexo eruptivo de Nisa	700
Total	3249

Neste capítulo descrevem-se as metodologias seguidas nas diferentes fases da investigação, as quais se podem agrupar em três domínios fundamentais: 1) recolha de dados; 2) trabalhos de campo; 3) ensaios de laboratório. São referidos todos os procedimentos relativos à recolha de amostras e à realização dos ensaios *in situ* e laboratoriais, fazendo-se uma descrição sumária das diversas técnicas utilizadas. Serão, também, tecidos alguns comentários sobre a

aplicação de alguns destes ensaios a solos residuais. Na Fig. 2.1 apresenta-se de forma esquemática as principais operações que se desenvolveram no âmbito deste estudo.

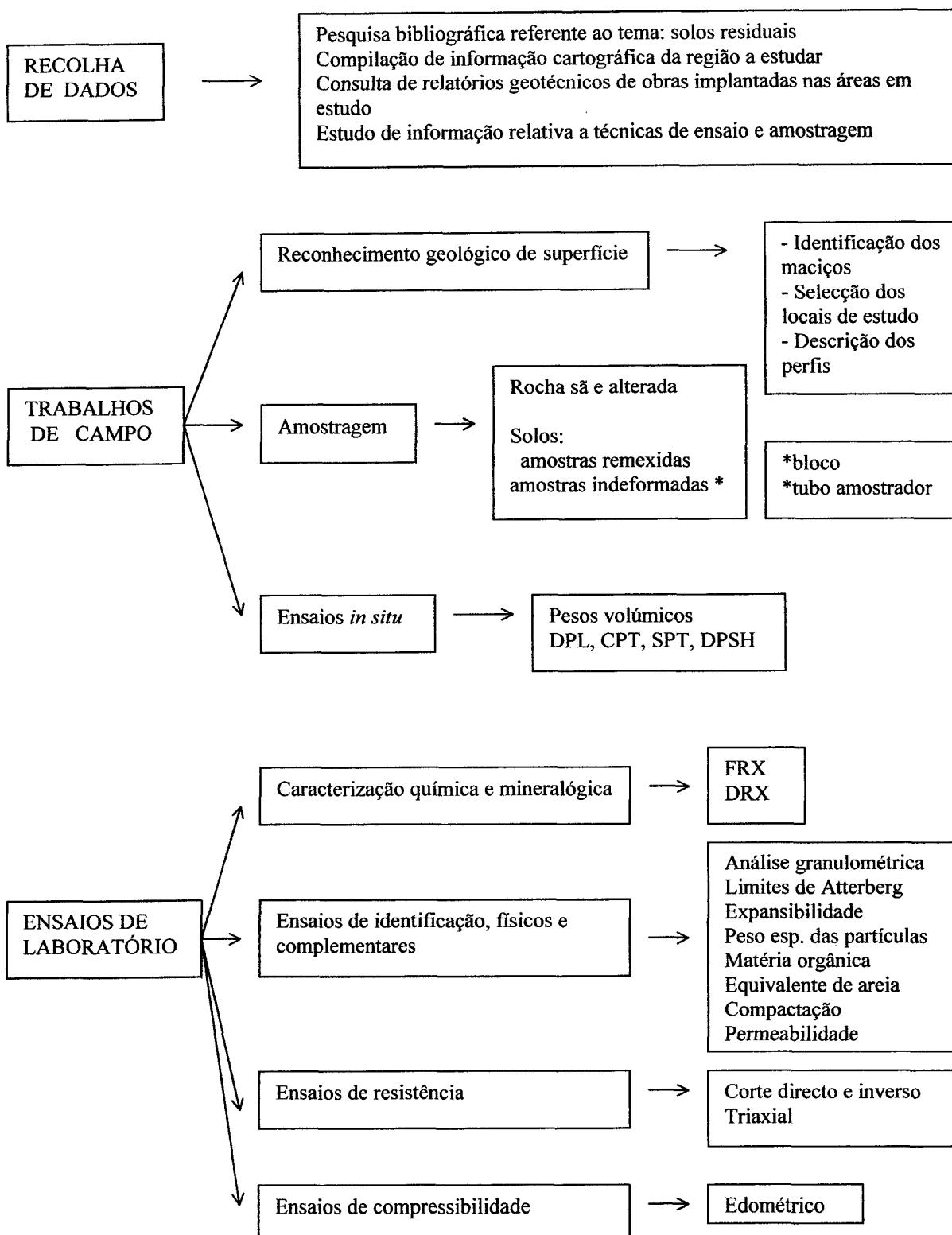


Figura 2.1 – Esquema geral dos trabalhos desenvolvidos no âmbito desta tese.

2.2 – Recolha de dados

O máximo aproveitamento dos trabalhos de campo (reconhecimento, amostragem e ensaios *in situ*) e dos posteriores estudos em laboratório, só é possível quando os dados compilados são devidamente analisados, situação que exige uma correcta avaliação, selecção e confirmação da informação. Assim, o planeamento dos trabalhos de campo é possível e, torna-se uma componente imprescindível a ter em conta na maximização dos mesmos por forma a obter os melhores resultados, minimizando as energias e tempo envolvidos.

A recolha de dados desenvolveu-se em quatro vertentes principais seguidamente descritas.

- i) Pesquisa da bibliografia disponível e actualizada sobre o tema ‘solos residuais’, nomeadamente, artigos, teses, livros e relatórios de autores nacionais e internacionais por forma a estabelecer o “*state of art*” sobre o assunto. Especial atenção foi dada aos solos residuais de rochas graníticas (s.l.), principalmente os que se formaram em clima temperado.
- ii) Consulta de dados cartográficos, notas, memórias e artigos, no que respeita à geologia, geomorfologia, climatologia, pedologia e exploração de materiais, hidrologia e hidrogeologia, (referidos no Capítulo 3), o que permitiu um conhecimento prévio das áreas a investigar.
- iii) Compilação de dados de índole geotécnica, nomeadamente, registos de sondagens, ensaios *in situ* e ensaios de laboratório, que visaram materiais semelhantes aos solos a estudar. Os elementos coligidos, pertencentes a obras, sobretudo rodoviárias, que interceptam as áreas em estudo, permitiram a comparação com os resultados obtidos (Capítulos 5 e 6), assim como, a complementação dos estudos desenvolvidos. Na totalidade, consultaram-se 266 ensaios de identificação e respectivas classificações do Sistema Unificado e AASHTO, e 51 ensaios de compactação. Nestes estudos também foram analisadas as características geológicas observadas nos solos residuais de granítóides do Alentejo, através dos trabalhos de prospecção geotécnica efectuados nessas manchas. Ao todo, realizaram-se 77 sondagens mecânicas à percussão e rotação, 29 trados mecânicos e 126 poços de prospecção nos solos residuais. Também foram registados os valores obtidos nos ensaios realizados *in situ* para esses estudos, nomeadamente, 440 ensaios de penetração standard (SPT), 67 ensaios de penetração ligeira (DPL), e 51 perfis de refracção sísmica (PS).
- iv) Estudo aprofundado das técnicas existentes e equipamento disponível por forma a ser aplicado com êxito na investigação dos solos residuais. Este estudo inclui métodos de amostragem, selecção e “performances” dos equipamentos para os ensaios *in situ*, e procedimentos usuais ou específicos para a execução de ensaios laboratoriais em solos residuais de granitos e rochas similares.

2.3 – Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo compreenderam três fases principais: 1^a fase => Reconhecimento geológico de superfície; 2^a fase => Recolha de amostras; 3^a fase => Ensaios *in situ*.

2.3.1 – Reconhecimento geológico de superfície

O reconhecimento geológico de superfície visou os objectivos a seguir expostos.

- Identificação dos principais maciços rochosos graníticos (s.l.) do Alentejo, assim como das zonas em que a meteorização desses maciços permitiu a formação de solos residuais de espessura e extensão com interesse para a investigação iniciada.
- Verificação e complementação dos dados fornecidos pela cartografia geológica e pedológica de várias escalas através da observação directa das formações.
- Definição de 16 manchas de solos residuais de granitos e rochas afins, baseada em critérios de homogeneidade litológica, utilizando a inspecção visual, o contacto directo e ensaios expeditos. Estas manchas apresentam aspectos geológicos e geotécnicos diversos, assim como enquadramentos geográficos distintos.
- Selecção dos locais mais representativos de cada mancha de solos residuais com vista ao aprofundamento da investigação através de ensaios *in situ* e recolha de amostras para posteriores estudos laboratoriais. Foram privilegiados os taludes naturais, taludes de escavação de obras rodoviárias e perfis expostos em saibreiras ou pedreiras em exploração ou inactivas.
- Descrição dos 62 perfis de solos residuais escolhidos para caracterização geológica e geotécnica pormenorizada, com espessuras expostas que podem atingir cerca de 15 metros, tendo em média 6 metros. A primeira avaliação das propriedades *in situ* pela inspecção visual e contacto directo com as mãos ou ferramentas simples, tem como principal objectivo, transmitir uma visão global da situação do perfil, e torna-se imprescindível à compreensão genérica dos perfis de solos residuais, onde os aspectos estruturais tal como descontinuidades, cimentação interpartículas ou heterogeneidade na textura e na cor, inerentes a este tipo de solos, ainda a tornam mais importante em comparação com os solos transportados. Os aspectos registados nesta descrição, baseados fundamentalmente na aparência, apreciação e experiência, podem ser retomados, com informação mais específica, em estágios mais avançados da investigação.

Nos perfis dos solos transportados pode ser suficiente, para uma avaliação adequada do perfil do solo, explorar indirectamente através de meios como por exemplo: SPT, CPT, DPL, resíduos provenientes da lavagem dos furos de sondagem, piezocone, etc. Nos perfis de solos residuais, a essencial inspecção visual do perfil e o contacto directo com os materiais no estado natural, tem sido prática corrente em certos países (Jennings *et al.*, 1973), e mais recentemente tem sido recomendado como prática internacional no estudo de solos residuais (Blight, 1997).

A descrição dos perfis (Cap. 3), para além da localização geográfica exacta, dimensões do perfil (altura e largura), formação geológica do substrato, deve incluir informação acerca do solo no seu estado natural, tal como: humidade, cor, estrutura, textura, consistência, densidade, heterogeneidade, estado de alteração, presença de blocos de rocha sã ou alterada, existência e espessura de terra vegetal, etc.. Anotar o tipo de amostras que se prevê recolher e os ensaios *in situ* a efectuar, assim como a ilustração do perfil através de fotografias ou esquemas, constitui uma ajuda prestimosa. Dependendo da finalidade, torna-se importante,

por vezes, que a descrição contenha dados referentes a solicitações para fins de engenharia como por exemplo: uso do solo como material de construção, como fundação, para aterros compactados, para escavação ou como talude natural. Frequentemente, o controle da construção e qualidade da segurança dependem do conjunto de informação de índole prática acerca dos perfis de solos (Blight, 1997).

2.3.2 – Métodos de amostragem

As informações adquiridas durante a fase de reconhecimento de superfície, principalmente no que respeita à descrição dos perfis, são imprescindíveis para o planeamento da fase de amostragem, ao nível do tipo, quantidade e posicionamento exacto no perfil seleccionado, das amostras a recolher.

Excepto para materiais que apresentam já uma superfície natural exposta, como é o caso da maioria dos perfis estudados, toda a amostragem envolve algum grau de perturbação que não pode ser evitada. Os métodos de amostragem foram escolhidos com cuidado de acordo com os objectivos a atingir e de forma a obter amostras representativas do perfil e da mancha a caracterizar, estando o número de amostras colhidas em conformidade com a extensão e heterogeneidade de cada mancha. A escolha das técnicas mais apropriadas foi, geralmente, finalizada no campo, consoante a situação encontrada e de acordo com o equipamento disponível, por forma a garantir sucesso nas operações de amostragem.

O tipo de amostras colhidas em cada perfil, assim como a respectiva descrição e localização, são apresentadas no Capítulo 3. Nas diferentes fases de amostragem, seguiram-se as recomendações da Especificação LNEC E 218 (1968), “Prospecção geotécnica de terrenos. Colheita de amostras.”, fazendo naturalmente algumas adaptações necessárias à amostragem de solos residuais, as quais se encontram referenciadas na bibliografia da especialidade como por exemplo, Brand & Phillipson (1985), os quais apresentam detalhes sobre a amostragem em solos residuais praticada em várias partes do mundo.

Descrevem-se em seguida os vários os tipos de amostras recolhidas e as técnicas usadas, de acordo com o fim a que se destinam, nas diversas fases.

- Amostras de rocha sã e/ou alterada: recolheram-se blocos de rocha, directamente do seio do perfil de solo residual ou do maciço rochoso subjacente, com a ajuda do martelo de geólogo, picaretas ou outras ferramentas de uso corrente; o material recolhido destinou-se à classificação das rochas por exame macroscópico, assim como à identificação dos minerais principais, possível à vista desarmada ou recorrendo a lupas; seleccionaram-se 20 amostras de rocha sã pertencentes aos 16 maciços, parte das quais foi reduzida a pó para posteriormente ser submetida a análise química (Cap. 4).
- Amostras de solo residual para determinação dos pesos volúmicos *in situ* e do teor em água natural utilizando o método do extractor (Gomes Correia, 1987). Cravaram-se 4 a 6 extractores em cada perfil junto ao local de recolha das amostras remexidas e/ou indeformadas, às profundidades referidas no Capítulo 3, e com volumes que variam entre 60 e 760 cm³, consoante a dimensão máxima das partículas do solo a extraer (Fig. 2.2).
- Amostras colhidas com o amostrador de Terzaghi (Fig. 2.3) durante os ensaios SPT: estas amostras serviram essencialmente para inspecção visual, determinação do teor em água e

ensaios de identificação, permitindo fazer um estudo comparativo dos resultados obtidos em profundidade (Cap. 6).

- Amostras remexidas: utilizaram-se pás e armazenou-se o material em sacos plásticos grossos, por vezes dentro de 2 ou 3, porque as partículas dos saprolitos graníticos (s.l.) são geralmente angulosas e, frequentemente, rompem os sacos. Cada saco, devidamente fechado, continha cerca de 15 Kg de material, e colheram-se 10 sacos em cada local de amostragem, o que perfaz 150 Kg por perfil, e cerca de 2,5 toneladas no total de solo residual colhido (sob a forma remexida) para posterior tratamento laboratorial, nomeadamente: preparação dos solos, secagem, esquartejamento, e execução de ensaios de identificação, de compactação, físicos e geomecânicos, etc..
- Amostras indeformadas obtidas por dois processos de amostragem:
 - i) utilizando amostradores cilíndricos biselados de parede fina em aço inox ($D = 101\text{ cm}$; $H = 30\text{ cm}$) e quadrados ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$), lubrificados com óleo fino e cravados estaticamente, utilizando contrapesos ou equipamento de prospecção mecânica (Fig. 2.4); logo de seguida, os topes dos amostradores foram selados usando parafina, etiquetados, e transportados em caixas forradas com material fofo para absorver os choques provocados pelo transporte; as amostras cilíndricas destinavam-se (devido à dimensão e geometria apropriadas) aos ensaios triaxiais e edométricos; os cubos depois de subdivididos em laboratório em 3 provetes, foram submetidos ao ensaio de corte directo e inverso;
 - ii) recolha de blocos de solo de dimensões aproximadas de $(30 \times 50 \times 50)\text{ cm}^3$, talhados no perfil, utilizando pás e facas; logo após a obtenção do bloco, este foi selado progressivamente com gaze e parafina no mesmo local onde foi talhado (Fig. 2.5); posteriormente, foi acondicionado em caixas com material “anti-choque”, dentro das quais foi transportado e se manteve armazenado até à altura de ser ensaiado (ASTM D4220-95, 1999); nos momentos que precederam os ensaios mecânicos, depois de retirado o invólucro (gaze + parafina), procedeu-se a uma subamostragem já em laboratório, utilizando o anel do edómetro (no caso do ensaio de consolidação) ou o anel cortante da caixa de corte (no caso do ensaio de corte directo).

Na realidade, não há amostras verdadeiramente intactas, porque as mudanças de tensões e alguma perturbação mecânica são inevitáveis durante a amostragem. A perturbação é assim estabelecida em termos da influência nas propriedades mecânicas, as quais são medidas a partir da amostra. No entanto, e de acordo com a norma alemã DIN 4021 ou a norma americana ASTM D4220-95, as amostras recolhidas em bloco directamente do perfil, são classificadas como amostras indeformadas de classe 1, ou D da ASTM, segundo as quais, apesar de existir o inevitável alívio do estado de tensão de repouso, as amostras não sofreram distorção nem alteração de volume durante o processo de amostragem.

A recolha de amostras provoca inevitavelmente a diminuição da tensão efectiva média, a que se associam fenómenos de expansão que podem levar, a uma perda da resistência das ligações entre os grãos nos solos residuais e, deste modo, a subestimar as propriedades *in situ*. Assim, a única maneira de reduzir essas perturbações consiste em trabalhar com amostras de grande dimensão: amostradores com elevado diâmetro ou blocos de grande volume (Vaughan *et al.*, 1988).



Figura 2.2 – Determinação dos pesos volúmicos *in situ* pelo método do extractor.



Figura 2.3 – Amostras colhidas com o amostrador de Terzaghi.



Figura 2.4 – Colheita de amostras indeformadas utilizando amostradores.

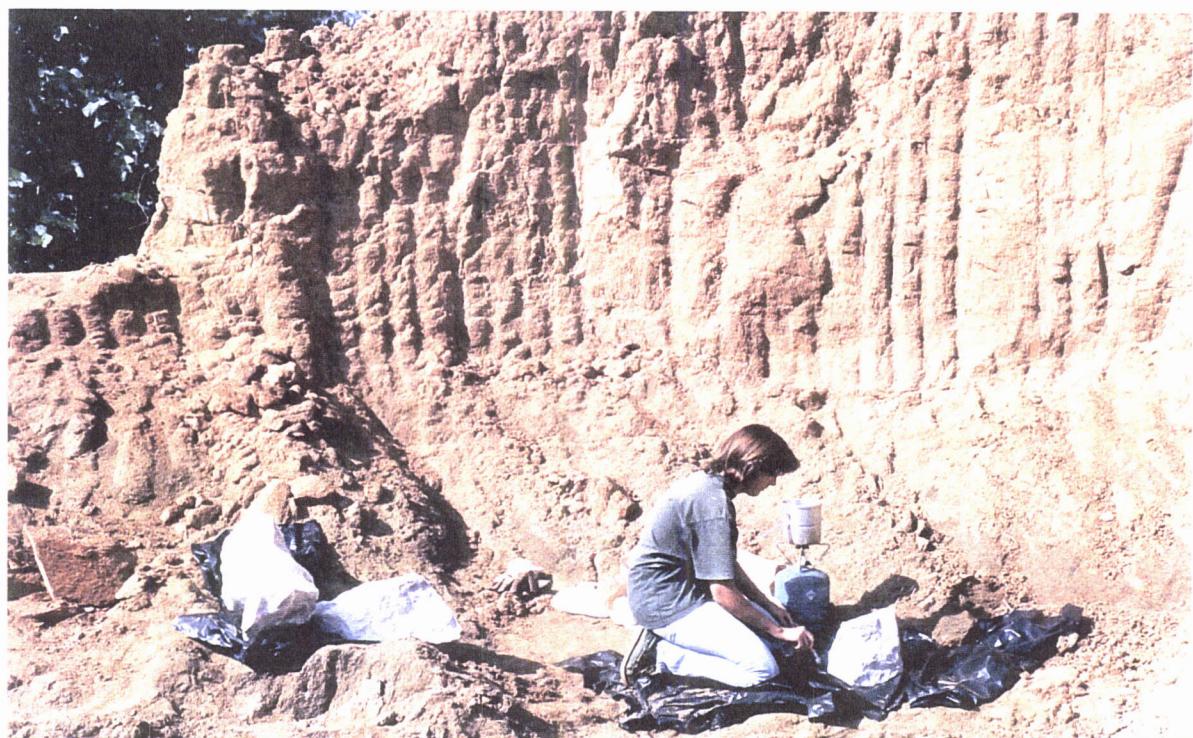


Figura 2.5 – Recolha e protecção de blocos do solo residual do granodiorito do Redondo (amostra 16 – Calado).

2.3.3 – Ensaios *in situ*

Sempre que possível, no estudo de solos residuais, é importante a realização de ensaios *in situ*, porque somente desta forma, são testados os materiais mantendo todas as características no seu estado natural, incluindo as tensões de repouso. Nos ensaios *in situ* realizados para esta tese incluem-se os ensaios penetrométricos nomeadamente, o ensaio de penetração SPT – “Standard Penetration Test”, ensaio de penetração estática CPT – “Cone Penetration Test” e os penetrómetros dinâmicos com ponteiras cónicas DP – “Dynamic Probing”. Destes últimos, utilizaram-se penetrómetros dinâmicos ligeiros (DPL₁₀₀ e DPL_{LNEC}) e o penetrómetro super-pesado DPSH. Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados *in situ* foram confrontados com os dados de ensaios penetrométricos coligidos a partir de relatórios geotécnicos. Os primeiros encontram-se devidamente referenciados (quantidade e tipo) por local de amostragem e respectivo maciço interceptado no Quadro 6.4; o número e tipo de ensaios *in situ* coligidos por estudo consultado, constam na secção 6.4.

No Capítulo 6 apresentam-se alguns comentários sobre as vantagens e desvantagens de cada um dos ensaios *in situ* adoptados e, da sua aplicabilidade aos solos residuais, assim como, se apresentam os registos e respectivas interpretações dos resultados obtidos e dos dados coligidos, para além de referir bibliografia da especialidade. No presente capítulo descrevem-se os procedimentos gerais das técnicas aplicadas e as características fundamentais do equipamento utilizado.

2.3.3.1 – Ensaio SPT

Os ensaios SPT foram realizados em furos de sondagem à percussão, nos locais previstos, até profundidades referidas nos gráficos de registo do Capítulo 6. O método em questão, consiste em introduzir um amostrador em forma de tubo dividido em duas meias canas de paredes grossas ao longo de 45 cm através do solo residual intacto ou rocha branda, a partir do furo de sondagem (Fig.2.3). A penetração foi conseguida pelo impacto de um pilão de 63,5 Kg que é solto de uma altura de 75 cm (Fig. 2.8). Os golpes necessários para cravar os primeiros 15 cm do amostrador, apesar de registados, não se apresentam nos gráficos, uma vez que se considera serem afectados pela perturbação do fundo do furo. O número de golpes necessários para a introdução do amostrador nos restantes 30 cm, é considerado o valor do N_{SPT}, a partir do qual se pode inferir a resistência do solo. Após a cravação completa, o amostrador foi removido, desmontado, e a amostra de solo foi utilizada para a determinação do teor em água natural e ensaios de identificação.

O amostrador de meias canas é munido na extremidade de uma rosca ou anel que termina em ponta de bisel para melhor cortar o solo. Na Austrália, Inglaterra e África do Sul é usual a opção de uma ponteira cónica maciça com um ângulo de 60° em substituição do anel cortante, quando se ensaiam solos residuais grosseiros ou cascalhentos por forma a minimizar os danos da ponteira oca e afiada. Este procedimento foi proposto originalmente por Palmer & Stuart (1957). Os valores de N são similares ao anel cortante ou ligeiramente superiores.

Em todos os furos abertos para a realização do ensaio SPT, os solos residuais interceptados, exibiam características que permitiram dispensar o revestimento do furo, mesmo nas sondagens que atingiram profundidades maiores. Questões relacionadas com o SPT encontram-se desenvolvidas em 6.2.1 e 6.3.1.

2.3.3.2 – Ensaio CPT

O ensaio de penetração estática ou CPT tem sido aplicado nos solos residuais com uma amplitude limitada. Os solos residuais são frequentemente muito duros e densos e a penetração pode ficar limitada a poucos metros do topo do perfil. Além disso, blocos de rocha e inclusões pedogénicas tais como nódulos de silte, os quais ocorrem frequentemente em perfis de solo residual, são impenetráveis ou podem deflectir o cone.

O ensaio consiste na cravação contínua, por meio de um sistema hidráulico, de varas de poucos centímetros de diâmetro, no extremo das quais é enroscada uma ponteira que termina em cone. O aparelho utilizado da marca PAGANI, modelo TG 63-100 (Fig. 2.8), possui um cone de Begeman com um ângulo de 60° no vértice e um diâmetro de 36 mm na base, a que corresponde uma secção transversal de 10 cm². Um mecanismo deslizante permite o movimento do cone independentemente das varas (comprimento = 1 m; diâmetro = 36 mm; peso = 6,4 Kg) fornecendo a resistência de ponta (qc); ou introduzidas em conjunto (cone + varas), obtendo-se, deste modo, a resistência total (Rt). O valor destas resistências, em cada 20 cm de penetração, é medido através de manómetros colocados à superfície, de modo a serem lidos pelo operador; da diferença entre as duas resistências, obtém-se a resistência de atrito lateral (fs). A capacidade do aparelho corresponde a uma força máxima de 100 KN. A velocidade de penetração foi de 2 cm/s e, a periodicidade das leituras efectuadas foi estabelecida a todos os 20 cm de penetração, de acordo com as recomendações da ISSMFE. Considerações adicionais acerca do CPT, suas características, limitações e aplicações aos solos residuais, apresentam-se mais desenvolvidas na secção 6.2.2 e 6.3.2.

2.3.3.3 – Ensaios DP – penetrómetros dinâmicos

Os ensaios DP – “Dynamic Probing”, consistem, genericamente, em cravar no solo uma ponteira cónica de área (A) com o auxílio de um pilão de massa (M) que cai livremente de uma determinada altura (H) e que transmite a força dinâmica ao cone através do batente (B) e das varas metálicas (i.v). O número de pancadas (N) necessárias para penetrar uma determinada profundidade padronizada (e), permitirá obter informações qualitativas e/ou quantitativas acerca das características do solo atravessado.

A expressão da energia específica, por pancada, tem a seguinte forma (Nixon, 1988):

$$Es = (M.g.H)/A \quad (2.1)$$

sendo g, a aceleração da gravidade.

Os resultados das sondagens de penetração dinâmica, são usualmente avaliados em termos de resistência à penetração dinâmica Rd; para o efeito, é comum utilizar-se a “fórmula dos holandeses”:

$$Rd = M^2 \cdot H \cdot N / e \cdot A \cdot (M + B + i.v) \quad (2.2)$$

onde i significa o número de varas.

Na normalização estabelecida pelo ISSMFE – “DP Working Party”: 1980, uniformizam-se os equipamentos existentes em 4 níveis energéticos: DPL, DPM, DPH e DPSH. No âmbito desta tese utilizaram-se os seguintes cones penetrométricos dinâmicos: DPSH – “Dynamic

Penetration Superheavy" (penetrômetro dinâmico superpesado), (Fig.2.8) e, o DPL ou PDL – "Dynamic Penetration Light" (penetrômetro dinâmico ligeiro), em duas variantes, DPL_{LNEC} (manual) e DPL₁₀₀ (mecânico), ilustrados nas Fig. 2.6 e 2.7, respectivamente; as características mais importantes destes penetrômetros resumem-se no Quadro 2.2. Considerações teóricas mais aprofundadas sobre os referidos penetrômetros constam em 6.2.3 e 6.3.3, os dados compilados são apresentados em 6.4 e os resultados obtidos nos ensaios realizados constam em 6.5.

Quadro 2.2 – Características dos penetrômetros dinâmicos utilizados.

Designação	DPSH	DPL _{LNEC}	DPL ₁₀₀
M – massa do pilão (Kg)	63,5	10	30
H – altura de queda (cm)	75	50	16,67
A – secção da ponteira (cm ²)	20	7	7
B – massa do batente (Kg)	-	3,0	3,0
v – massa de cada vara (Kg)	5,1	2,0	2,0
e – penetração unitária (cm)	20	10	10
Ângulo do cone (graus)	90°	60°	30°
Diâmetro das varas (cm)	3,2	2,2	2,2
Número de pancadas por penetração standard	N ₂₀	N ₁₀	N ₁₀

2.3.3.4 – Pesos volúmicos *in situ*

Os pesos volúmicos *in situ* foram determinados simultaneamente com a amostragem. Utilizou-se o método do extractor (Gomes Correia, 1987), usando extractores cilíndricos, em aço inox, com uma extremidade aberta e biselada para facilitar a entrada do solo residual e a extremidade oposta tapada, onde existiam uns pequenos orifícios para saída do ar à medida que se introduzia o solo. Os volumes dos extractores variaram entre 60 e 200 cm³ para os solos residuais mais finos e, 265 e 760 cm³ para os solos de grão mais grosseiro.

Após a cravação dos extractores no terreno (Fig.2.2), extraiu-se o solo circundante e, com a ajuda de uma pá plana, que se cravou perpendicularmente à direcção de introdução do extractor, retirou-se o extractor com o solo residual no seu interior, colocando-o directamente num saco plástico que foi fechado e onde foi cuidadosamente transportado para o laboratório. Aí chegados, o excesso de solo no topo foi nivelado com a ajuda de uma faca ou espátula; usando um pincel, limpou-se o exterior do extractor, sendo de seguida o conjunto, extractor mais solo, pesados e introduzidos em estufa com uma temperatura de 105° C.

Do modo descrito, determinou-se, em todos os solos amostrados, o peso volúmico no estado natural (γ_0) e o teor em água natural (w_0), segundo a Norma Portuguesa LNEC NP 84 (1965), "Solos. Determinação do teor em água", após o qual se calculou o peso volúmico no estado seco (γ_d). Realizaram-se para cada local de amostragem 3 a 5 determinações, tendo sido considerados os seus valores médios.

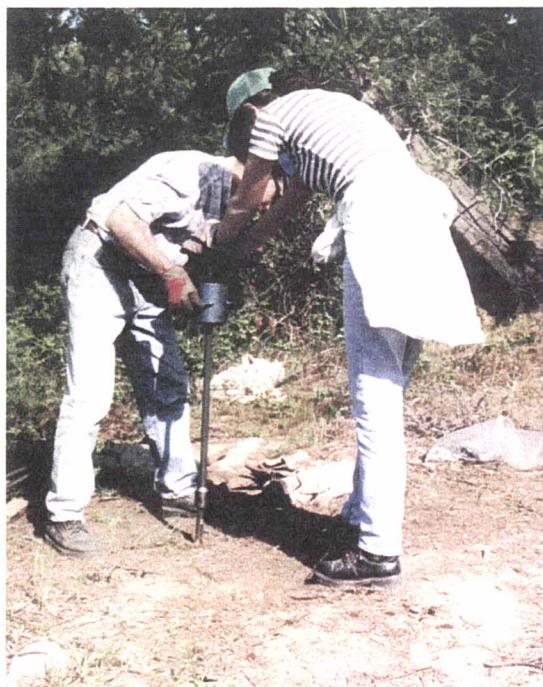


Figura 2.6 – DPL_{LNEC} – manual.



Figura 2.7 – DPL_{100} – mecânico.

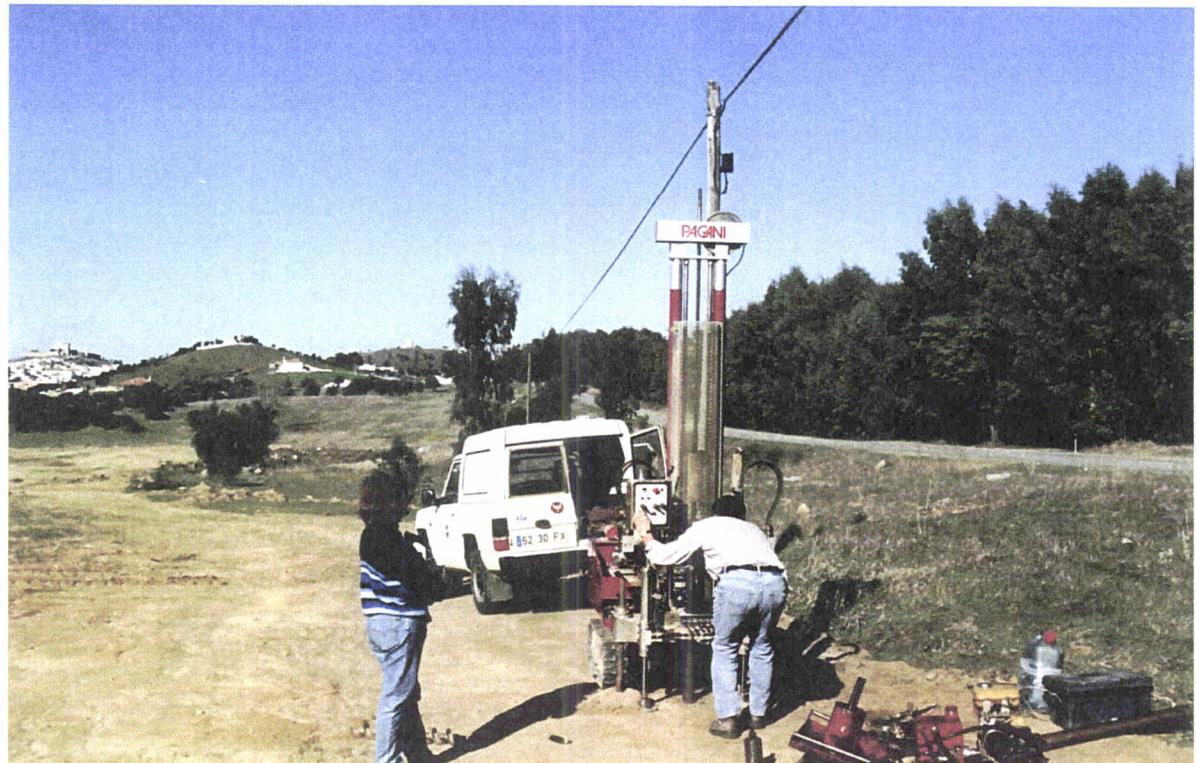


Figura 2.8 – Equipamento para a realização de ensaios SPT, DPSH, e CPT.

2.4 – Ensaios de laboratório

Nas amostras de solos residuais colhidas no decurso dos trabalhos de campo, foram realizados ensaios laboratoriais (Quadro 2.3), na sua maioria no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Geociências da Universidade de Évora. As análise químicas e mineralógicas, as análises granulométricas da fracção fina e o ensaio de corte directo em caixa grande, efectuaram-se no Laboratório de Geociências da Universidade de Aveiro. Os ensaios triaxiais foram executados no CEGSA – Centro de Estudos de Geologia e Geotecnia de Santo André.

Quadro 2.3 – Tipo e quantidade de ensaios de laboratório realizados para esta tese.

Designação do ensaio	Nº de amostras ensaiadas
Análise química	40
Análise mineralógica	33
Análise granulométrica	62
Limites de Atterberg	62
Peso específico das partículas sólidas	62
Permeabilidade	59
Expansibilidade	62
Equivalente de areia	62
Teor em matéria orgânica	62
Compactação	56
Corte directo	42
Triaxial	5
Edométrico	24

2.4.1 – Caracterização química e mineralógica

2.4.1.1 – Análise química por espectrometria de fluorescência de raios – X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é, actualmente, uma técnica analítica largamente utilizada nos laboratórios envolvidos na análise química dos solos. Dos desenvolvimentos tecnológicos ao longo de 30 anos, resultou um método fidedigno, versátil, e geralmente mais rápido que os métodos convencionais de análise química. Os espectrómetros modernos são capazes de detectar mais de 80 elementos e, em quantidades que variam entre poucos ppm (parts per million) e 100%. A preparação do solo para análise é simples. O método de análise utilizado é destrutivo, não permitindo que as amostras sejam retomadas mais tarde para análises posteriores de outro tipo.

Em termos gerais, a fluorescência é a propriedade que os materiais possuem de, após terem sido excitados por uma radiação incidente, emitirem uma radiação visível ou muito próxima da visível. A análise por espectrometria de fluorescência de raios-X tira partido das relações existentes entre as características elementares de cada elemento químico e o comprimento de onda da radiação emitida por esse elemento após ter sido “bombardeado” com um feixe de raios-X de elevada energia.

A análise de 20 amostras da fracção de grão menor que 0,425 mm dos diferentes solos residuais, e de 20 amostras das respectivas rochas de origem devidamente moídas, foram efectuadas num espectrómetro de raios-X do Dep. Geociências da Univ. de Aveiro. Na realização das análises foi utilizado um conjunto Philips, constituído por um espectrómetro

PW 1410/00, o qual dispõe de gerador PW 1732/10, “channel control” PW 1390 e registador PM 8203. A radiação utilizada foi Cr K α , e as concentrações operacionais foram as seguintes: 25 mA, 45KV, contador de fluxo, colimador fino, e cristais analisadores ou dispersores TIAP e LiF220.

O processo iniciou-se com a incidência, em cada amostra, de um feixe de raios-X primário capaz de provocar o fenómeno de fluorescência; posteriormente, os raios-X secundários emitidos pela amostra, com comprimentos de onda diversos, incidem num cristal analisador que os difracta segundo a lei de Bragg (eq. 2.3); por fim, a análise dos elementos químicos da amostra pode ser qualitativa quando se identificam as várias linhas características do espectro emitido, e quantitativa quando a intensidade dessas linhas forem comparadas com as intensidades de linhas correspondentes de padrões adequados (Gomes, 1979). Os resultados da análise química das amostras de solos estudados, encontram-se em 4.2.

$$\text{Lei de Bragg: } n \lambda = 2d_{hkl} \sin 2\theta \quad (2.3)$$

em que: θ é o ângulo de difracção e d_{hkl} é o espaçamento dos planos cristalográficos (valores característicos do cristal analisador); λ é o comprimento de onda dos raios-X secundários emitidos pelos elementos químicos, e n é um número inteiro.

2.4.1.2 – Análise mineralógica por difracção de raios-X (DRX)

A difracção de raios-X (DRX) é uma técnica que só por si fornece informações amplas, precisas e detalhadas relativamente à qualificação, caracterização e semi-quantificação dos minerais presentes numa amostra de solo ou rocha moída. Além disso, a DRX é uma técnica de análise não destrutiva, rápida e muito versátil, porque permite vários tipos de preparação e tratamento dos espécimes.

Cada mineral tem a sua estrutura própria, e o respectivo diagrama DRX mostra o modelo de difracção da radiação X nos respectivos planos estruturais. Cada espécie mineral cristalina tem um modelo de difracção específico a partir do qual ela pode ser identificada, mesmo quando faça parte de misturas mais ou menos complexas com outras espécies minerais (Gomes, 1988).

A análise por difracção de raios-X (DRX) tira partido da relação, traduzida pela lei de Bragg (eq. 2.3), existente entre dois parâmetros, θ - ângulo de incidência do feixe monocromático de raios-X incidente e os valores de d_{hkl} , característicos de uma espécie mineral. Quando o ângulo de incidência satisfaz a lei de Bragg, as várias difracções que ocorrem numa série quase infinita de planos, estão em fase (n é um número inteiro), resultando um feixe de raios-X difractado mais intenso (Klein *et al.*, 1985).

Basicamente, a técnica de DRX, consiste em fazer incidir sobre a amostra em estudo um conjunto de feixes monocromáticos de raios-X, cujos ângulos de incidência se fazem variar, registando-se num difractograma a intensidade das difracções em função do ângulo de incidência. Uma vez identificados os picos ou máximos de difracção dos minerais de uma amostra, pode-se calcular a sua composição mineralógica aproximada. De notar que a avaliação é sempre semi-quantitativa.

As 33 amostras analisadas, foram obtidas após sucessivos esquartejamentos dos solos residuais seleccionados até obter 20 g de material de grão com dimensão inferior a

0,425 mm, e que se consideram representativos dos solos em estudo; a fracção analisada, assegura a inclusão de todas as espécies minerais presentes em cada solo, por isso, pode-se designar por amostra total. No entanto, em alguns solos e, pelo facto do teor relativo de minerais argilosos ser pequeno, recorreu-se à análise da fracção inferior a 2 μm , por ser nesta fracção que eles estão mais concentrados, para confirmação da identificação destes minerais, efectuada na amostra total.

Nas análises mineralógicas por DRX, utilizou-se um aparelho Philips, com radiação $\text{K}\alpha\text{ Cu}$, monocromatizada por filtro de Ni ou por cristal de grafite, composto por gerador PW 1130/90, goniómetro 1050/70, microprocessador PW 1710 e registador Pm 8203 A. Um espécime representativo foi montado num porta-amostras *standard* de alumínio, de forma a não comprimir demasiado o solo, evitando-se quanto possível a orientação preferencial de certos cristais com hábitos favoráveis, o que viria a traduzir-se no realce da intensidade de certos máximos e na redução de intensidade de outros (Gomes, 1988).

Os difractogramas respeitantes às amostras analisadas (Figuras 4.2, 4.3 e 4.4) e as respectivas interpretações constam em 4.7. Para auxiliar a identificação dos minerais representados nos picos dos difractogramas, referem-se trabalhos como Assunção & Garrido (1953) e Moore & Reynolds (1989).

2.4.2 – Caracterização geotécnica

2.4.2.1 – Ensaios de identificação

Qualquer ensaio de campo ou de laboratório efectuado em solos deve ser precedido pela identificação e classificação do material, para que os resultados obtidos possam ser avaliados à luz da experiência adquirida com ensaios similares anteriormente realizados. A identificação e descrição de terrenos para propósitos de engenharia deve consistir, acima de tudo, em classificar os tipos de solos, designadamente por termos simples, a partir de um número restrito e significativo de propriedades índice, determinadas por ensaios padrão (Vargas, 1992). Tem sido prática frequente, a aplicação de correlações directas entre algumas destas propriedades índice simples e os parâmetros geomecânicos usados no dimensionamento de obras geotécnicas.

Em todas as amostras de solos, foram realizados ensaios de identificação (análise granulométrica e limites de Atterberg), visando a sua classificação geotécnica pelo Sistema Unificado ASTM D 2487-98 e AASHTO (LNEC E 240-1970). Para a realização dos ensaios de identificação, prepararam-se as amostras remexidas de solos residuais seguindo as técnicas recomendadas pelas normas LNEC E 195 (1966) e BS1377: Part1(1990).

2.4.2.1.1 – Composição granulométrica

De todas as amostras recolhidas, tomou-se uma sub-amostra de material representativo de cada solo residual que foi submetida à análise granulométrica por peneiração húmida, de acordo com os procedimentos recomendados nas normas, portuguesa LNEC E 239 (1970) e britânica BS 1977: Part 2 (1990).

Optou-se pela peneiração por via húmida em detrimento da via seca, por se considerar que aquele processo viabiliza uma distribuição da dimensão das partículas individuais mais fidedigna em solos residuais. Por um lado, a crivagem manual utilizando água, é muito

menos agressiva que a peneiração por via seca utilizando agitadores mecânicos; algumas partículas mais sensíveis, destes solos, como por exemplo as micas, e grãos de minerais angulosos e/ou fissurados, são preservados o melhor possível na sua dimensão e forma original, ao contrário do que acontece quando os grãos, previamente secos, são atirados uns contra os outros e contra as paredes do crivo na peneiração por via seca, podendo reduzir, desta forma e, drasticamente, a dimensão de parte das partículas destes solos. Por outro lado, por muito prolongada que seja a peneiração seca, existem sempre partículas da fracção silte e da fracção argila que, inevitavelmente aderem às reentrâncias e fissuras dos grãos de areia e seixo e, no tratamento dos resultados, são erradamente contabilizadas nestas últimas classes granulométricas; enquanto que, a circulação da água, e quando necessário, com o auxílio de agentes dispersantes, promove a libertação das fracções mais finas, que assim, podem ser devidamente contabilizadas.

Para as partículas finas, argila e silte, a determinação da distribuição dimensional do grão foi realizada num analisador de partículas com raios-X, modelo Sedigraph-5100 da Micromeritics, do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. O referido aparelho, funciona baseado no método de sedimentação, sendo esta, acompanhada por um feixe de raios-X de baixa energia e um detector, numa célula contendo o líquido de sedimentação, com a finalidade de determinar a distribuição dimensional do grão. Os dispositivos de emissão e detecção de raios-X, permanecem estacionários enquanto a célula se move verticalmente entre eles. A célula contém uma janela transparente através da qual os raios-X gerados numa fonte atingem o detector. A distribuição da massa das partículas, em vários pontos da célula, condiciona o número de impulsos da radiação utilizada que alcançam o detector. Esta contagem de impulsos de raios-X, é usada para inferir a distribuição granulométrica. Desta forma, tomaram-se 10 g de solo com partículas de dimensão inferior a 100 μm , que foram dispersas numa solução aquosa com hexametafosfato de sódio, que foi colocada no aparelho, procedendo-se ao registo automático da dimensão dos grãos e ao estabelecimento da respectiva curva granulométrica.

A distribuição do tamanho das partículas dos solos residuais pode ser afectada por certos aspectos da preparação das amostras, como por exemplo o processo de desagregação do solo, o tipo de desfloculante e o tempo de agitação utilizados, o efeito de secagem, etc. Em relação ao processo de secagem, o efeito mais comum, é a redução da fracção argila ($< 2 \mu\text{m}$). Assim, e principalmente nos solos residuais com componente argilosa considerável, recomenda-se uma adaptação às normas preconizadas, ou seja, a secagem prévia antes do ensaio deve ser evitada. A amostra de solo deve ser dividida em 2 sub-amostras: uma para determinação do teor em água e outra para o ensaio propriamente dito. A última, deve ser imersa numa solução aquosa com dispersante (hexametafosfato de sódio), e posteriormente passada através dos peneiros *standard*.

No caso dos solos residuais em estudo, prepararam-se amostras de duas formas: com secagem prévia e sem secagem prévia; tendo-se verificado que, os diferentes processos de preparação não influenciavam de forma determinante a composição granulométrica do solo.

2.4.2.1.2 – Limites de consistência

Embora, ainda, insuficientemente explicado, os limites de consistência ou de Atterberg, estão intimamente relacionados com os principais parâmetros responsáveis pelo comportamento dos solos, como: a superfície específica das partículas, o índice de vazios, a macroporosidade e a microporosidade, a capacidade de troca iônica, a composição mineralógica, a composição

granulométrica e a história geológica (Moitinho de Almeida, 1991). Por outro lado, já em 1932, Casagrande demonstrou a existência de relações entre os limites de consistência e a textura, estrutura, resistência ao corte e compressibilidade dos solos.

Em relação às metodologias para determinação do limite de liquidez, fez-se um estudo comparativo entre os valores obtidos pelos procedimentos clássicos, (LNEC NP – 143, 1969), onde se utiliza a concha de Casagrande, e a norma britânica (BS 1377: Part 2: 1990) com o cone penetrométrico. Os resultados obtidos e interpretações inerentes constam nos Capítulos 5 e 7. Considerações teóricas e resultados práticos acerca destes métodos constam nos trabalhos de Weston (1978), Kumapley & Boakye (1980), Netterberg & Haupt (1981), Sampson (1983), Wasti & Bezirci (1986) e Ladeira & Oliveira (1995), entre outros.

Para a determinação do limite de plasticidade, seguiram-se os procedimentos normalmente utilizados nas normas supracitadas. Salienta-se que, os solos foram sempre secos ao ar, apenas o tempo suficiente, para se proceder à determinação dos limites de Atterberg; o tempo de mistura foi de 5 min, porque, de acordo com Blight (1997), tempos de mistura próximos de 30 minutos ou mais, para certos tipos de solos residuais, provocam diminuição na dimensão das partículas de argila do solo.

O limite de retracção é, por definição, o teor em água, abaixo do qual a secagem do solo se processa a volume constante (Head, 1992). Existem várias formas para determinar o limite de retracção, a partir de ensaios em amostras intactas ou amostras remoldadas, segundo as referidas normas. Na prática, e dado que habitualmente não é determinado o limite de retracção da mesma forma sistemática que os outros limites, é possível avaliá-lo a partir dos valores do limite de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_P). No presente estudo, foi aplicada a expressão proposta por Casagrande em 1947, para a determinação do limite de retracção (w_R):

$$w_R = w_L - I_P / 0,73 \quad (2.4)$$

sendo I_P , o índice de plasticidade ($I_P = w_L - w_P$).

A partir dos valores obtidos para as já referidas propriedades de identificação, foi possível calcular, para os solos residuais, outros índices, que são apresentados em seguida.

$$\text{Actividade coloidal do solo:} \quad A_c = I_P / \% < 2 \mu\text{m} \quad (2.5)$$

$$\text{Índice de consistência:} \quad I_c = (w_L - w_o) / I_P \quad (2.6)$$

$$\text{Índice de liquidez:} \quad I_L = (w_o - w_P) / I_P \quad (2.7)$$

2.4.2.2 – Ensaios complementares

2.4.2.2.1 – Peso específico das partículas sólidas

Para a determinação do peso específico das partículas sólidas (γ_s), seguiram-se as normas LNEC, E15 (1953) e NP – 83(1965). No que respeita ao procedimento de ensaio, as normas contemplam dois métodos. O método preconizado, sem secagem prévia do provete, isto é, usando o solo no seu estado natural, justifica-se, porque a secagem prévia deve ser evitada,

pois tende a diminuir o γ_s , quando comparada com provetes com a humidade natural (Blight, 1997).

Para cada solo residual colhido, efectuaram-se no mínimo 3 determinações do γ_s , considerando como valor final, a média entre eles. Este valor, foi usado na determinação do índice de vazios, da porosidade, e no cálculo de parâmetros de compressibilidade.

2.4.2.2.2 – Expansibilidade

O ensaio de expansibilidade reflecte a capacidade que os solos têm em variar de volume, quando em condições bem definidas, absorvem água por capilaridade através de uma placa porosa (LNEC E 200 – 1967).

O objectivo fundamental da realização deste ensaio, consiste em estabelecer relações entre a expansibilidade dos solos residuais em questão e as respectivas composições mineralógicas, percentagem de partículas finas, designadamente argila, e outras propriedades índice ou geomecânicas.

2.4.2.2.3 – Equivalente de areia

A especificação seguida, (LNEC E 199-1967), destina-se a fixar o modo de determinar o equivalente de areia, característica que exprime, segundo uma escala convencional de 0 a 100, a quantidade e qualidade dos elementos finos plásticos existentes num solo. Esta quantificação obtém-se, estabelecendo a relação volumétrica entre os elementos arenosos não floculáveis e a totalidade dos elementos. Este ensaio deve ser sempre realizado em solos não plásticos e de baixa plasticidade, ou solos contendo argilas de alta plasticidade, mas em pequena percentagem.

2.4.2.2.4 – Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade (k), foi determinado em solos arenosos, com uma percentagem de “finos” inferior a 30 %, utilizando um permeâmetro de carga constante com as seguintes características: $L = 10,1\text{ cm}$; $A = 22,3\text{ cm}^2$; $h = 163\text{ cm}$.

O permeâmetro é constituído por um tubo de metal de altura h , e secção transversal A , cujo topo tem uma entrada permanente de água e, logo abaixo, um orifício de saída, de maneira a manter o nível de água estabilizado. A amostra de solo é colocada entre duas placas de aço com orifícios e geotextil, para permitir a passagem livre de água sem que haja perda das partículas mais finas. A partir da equação 2.8 (Bowles, 1986), é possível determinar o coeficiente de permeabilidade:

$$k = V \cdot L / A \cdot h \cdot t \quad (2.8)$$

em que: V – volume de água que atravessa o provete no intervalo de tempo t ;

L – comprimento do provete;

A – secção transversal do provete;

h – diferença de carga hidráulica entre os extremos da amostra.

Considerações sobre ensaios de permeabilidade em solos residuais são apresentados por autores como: Hvorslev (1951); Schmidt (1967); O'Rourke *et al.* (1977); Hamilton *et al.*

(1981); Olson & Daniel (1981); Pregl (1987) e Blight (1997). Estudos comparativos entre a permeabilidade medida *in situ* e no laboratório, nestes solos, constam de trabalhos tais como: Day & Daniel (1985); Chen & Yamamoto (1987) e Elsbury *et al.* (1990).

2.4.2.2.5 – Teor em matéria orgânica

Nas amostras dos solos residuais estudados, determinou-se o teor em matéria orgânica, seguindo os procedimentos recomendados na Especificação LNEC E 201 (1967). O objectivo da realização deste ensaio, consiste no conhecimento do eventual transporte de complexos orgânicos dos níveis superficiais de solo, onde geralmente existe terra vegetal, para os níveis inferiores, onde foram colhidas as amostras, através das águas percolantes. Como é sabido, um teor em matéria orgânica superior a 2 %, poderá influenciar as propriedades geotécnicas dos solos.

2.4.2.2.6 – Compactação

O interesse do estudo das características de compactação dos solos residuais em questão, reside na possível utilização destes materiais na execução de aterros. Muitas das amostras colhidas (Cap. 3), provêm de saibreiras, cujos materiais explorados eram aplicados, na sua grande maioria, em aterros (vias de comunicação ou barragens de terra), e nas camadas de base e/ou sub-base de obras rodoviárias.

Nos projectos de engenharia que envolvem execução de terraplenagens, é usual compactar os solos por forma a obter uma melhoria nas propriedades geotécnicas dos materiais aplicados. Entende-se por compactação, o processo pelo qual uma porção de solo constituída por partículas sólidas, água e ar, fica com o índice de vazios reduzido, por diminuição do volume da sua fase gasosa, conseguida à custa da aplicação repetida de cargas. Assim, geralmente, a compactação aumenta a resistência e reduz a deformabilidade e a permeabilidade dos solos. A durabilidade das vias de comunicação depende das boas condições de execução da terraplenagem (Novais Ferreira, 1985).

Para cada solo existe um dado teor em água que conduz ao valor máximo do peso volúmico seco ($\gamma_{dmáx}$), isto é, a um valor máximo de compacidade do solo. A esse valor do teor em água, denomina-se teor em água óptimo ($w_{ópt}$).

O controlo do grau de compactação é essencial para obter um resultado satisfatório a um custo razoável. Deste modo, os ensaios laboratoriais de compactação, providenciam a base para o procedimento de controle utilizado no local da obra. A determinação do teor em água óptimo e respectivo peso volúmico seco máximo para um dado solo, é realizada em laboratório por meio de diversos ensaios, sendo o mais conhecido e aplicado, o ensaio Proctor. Este ensaio está normalizado e nesta tese seguiu-se a Especificação LNEC E 197 (1966) e a norma britânica BS 1377: Part 4 (1990).

Todos os solos residuais que foram submetidos ao ensaio de compactação Proctor, foram previamente secos ao ar (aproximadamente 15 Kg), apenas o tempo suficiente para garantir o teor em água necessário para iniciar o ensaio. Utilizou-se, quase sempre, o molde pequeno e pilão leve, com o objectivo de obter dados comparáveis com outros solos residuais; as excepções a esta regra, (molde grande - 40 Kg de solo e/ou pilão pesado), prendem-se unicamente com as características granulométricas de alguns solos ou, com a dificuldade em

obter os parâmetros de compactação ($\gamma_{dmáx}$; $w_{ópt}$) em casos pontuais (principalmente, solos mal graduados).

2.4.2.3 – Ensaios de resistência

Existem dois tipos principais de métodos de ensaio, geralmente utilizados, para determinar a resistência ao corte de solos em laboratório: o ensaio de corte directo e o ensaio triaxial. Os procedimentos *standard*, geralmente seguidos, para a realização dos referidos ensaios, em solos residuais, de países de diferentes partes do mundo, foram apresentados por Brand & Phillipson (1985). Este trabalho, chama a atenção para a necessidade de uma compreensão clara das diferenças entre os solos residuais e os solos transportados, diferenças que se notam, sobretudo, na preparação e manuseamento das amostras, bem como na interpretação dos resultados. O conhecimento da génesis dos solos residuais e dos factores que afectam a sua resistência ao corte, nomeadamente, história de tensões, resistência dos grãos, ligações intergranulares, estrutura e descontinuidades relíquia, anisotropia, índice de vazios, densidade *in situ* e saturação parcial, são abordados em pormenor por Blight (1997).

O sistema de forças aplicado, no ensaio de corte directo e no ensaio triaxial, é obviamente diferente. As características destes dois ensaios, assim como o equipamento fundamental e considerações teóricas correspondentes, são devidamente explicadas, recorrendo a esquemas e fotografias elucidativos, pela bibliografia da especialidade, da qual se assinala Head (1994). Ambos têm vantagens e desvantagens, mas certamente as condições de campo são melhor simuladas por um ensaio relativamente ao outro.

O ensaio triaxial é, em teoria, superior ao ensaio de corte directo. No entanto, as grandes vantagens do ensaio de corte directo são, a rapidez e a simplicidade de execução do ensaio. Para solos residuais, os quais são frequentemente de grão grosso, ou podem conter partículas grosseiras ou agregados de minerais, o ensaio de corte directo é geralmente mais vantajoso que o ensaio triaxial. Isto porque, a partir de uma amostra em bloco, que são aliás as de melhor qualidade, (secção 2.3.2), é mais fácil obter um provete com a forma de um paralelepípedo do que um provete cilíndrico, para além de que, com caixas de corte de $30 \times 30 \text{ cm}^2$ disponíveis no mercado, um provete maior, fornece, com certeza, uma melhor representação das condições *in situ* que um provete do triaxial que no máximo tem 10 cm de diâmetro (Lo, 1970 e Marsland, 1972; *in* Blight, 1997) e (Garga, 1988). Por outro lado, nos locais seleccionados para a colheita de amostras dos solos residuais a estudar, o ensaio de corte directo é, sem dúvida, o que melhor simula as condições de campo, por duas razões: primeiro, não estão previstas, pelo menos a curto prazo, a edificação de construções, exactamente nos locais de estudo; segundo, estes pontos, na sua grande maioria, situam-se em taludes de escavação, onde necessariamente os esforços tangenciais e os estados de deformação plana, predominam.

2.4.2.3.1 – Ensaio de corte directo

A partir do ensaio de corte directo podem-se obter, os parâmetros de resistência, nomeadamente, o ângulo de atrito (de pico e residual) e a coesão (de pico e residual), e as variações volumétricas (dilatação ou contracção) como resposta às tensões de corte.

Há um vasto número de variações de ensaios que podem ser especificadas, mas o equipamento disponível limita, geralmente, a escolha dessas variáveis. A máquina de corte directo utilizada é da Wykeham Farrance, modelo WF 25402, a qual permite cortes directos e reversivos e é munida com um anel dinamométrico com uma capacidade máxima de 5 KN.

No total, realizaram-se 42 séries de ensaios de corte directo em provetes provenientes de 12 amostras indeformadas e de 30 amostras remoldadas, estas, de acordo com o teor em água e densidade no estado natural.

Os procedimentos gerais seguidos constam da norma britânica BS 1377: Part 7 (1990) e ASTM D3080-98. No entanto, algumas alterações específicas para os solos residuais foram introduzidas.

A dimensão máxima das partículas de solo determina a espessura mínima do provete a ensaiar (Cheung *et al.*, 1988). De acordo com a norma ASTM D3080, recomendam-se as seguintes indicações: a espessura do provete deve ter pelo menos 6 vezes a máxima dimensão do grão, e não menos que 12,5 mm; a largura tem que ser 2 vezes maior que a espessura.

Para além dos ensaios na referida caixa de corte de 100 cm² de área com uma espessura máxima de 25 mm, realizaram-se duas séries de ensaios numa caixa de corte quadrada de 400 cm², em seis amostras indeformadas de solos residuais de granulometria mais grosseira.

Cheung *et al.* (1988), concluiu que caixas de corte com 100 mm de largura e com 44 mm de espessura de amostra, são adequadas para ensaiar solos residuais graníticos com partículas com diâmetro máximo aproximado de 8 mm. Quando são usadas caixas mais pequenas, obtêm-se curvas de tensão-deformação mais irregulares, e uma maior resistência ao corte, provavelmente devido ao excessivo esmagamento e rearranjo entre partículas dentro do espaço confinado da caixa. (Deve ser notado que as caixas de corte de 100 mm e 20 mm de espessura de amostra estão disponíveis como equipamento *standard*; a espessura de 44 mm foi alcançada pela remoção das placas porosas).

Depois de bem acondicionadas dentro da caixa de corte, as amostras de solo residual foram consolidadas, e posteriormente cortadas com uma velocidade de 1 mm/min, e tensões verticais na fase de corte iguais às de consolidação, isto é, 55, 104 e 202 KPa, para cada caixa de corte. Nas amostras indeformadas, depois de concluído o corte directo, inverteu-se o sentido de marcha da meia-caixa, induzindo, deste modo, o corte inverso nos três provetes, para as mesmas tensões verticais.

A forma como foram concebidos os aparelhos para o ensaio de corte directo, teve em consideração a realização de ensaios drenados, permitindo a determinação dos parâmetros de resistência ao corte em termos de tensões efectivas. Mas como não é possível controlar a drenagem, não há forma segura de confirmar se o corte é realizado sem excesso de pressões neutras, isto é, inteiramente drenado. Os ensaios devem decorrer com a caixa de corte completamente imersa em água, de forma a eliminar os efeitos das tensões capilares.

Tratando-se de um ensaio de deformação controlada, a tensão de corte é aplicada pelo movimento relativo entre as duas partes da caixa de corte, à velocidade preestabelecida e à medição da tensão resultante. Deste modo, é possível, se necessário, a determinação da resistência ao corte 'residual'.

A velocidade de corte a aplicar depende das condições de drenagem em que a amostra é cortada, assim como da permeabilidade do provete. Com provetes de 25×100 mm, o tempo de drenagem é muito mais curto que no ensaio triaxial. Investigações sobre a velocidade de corte a aplicar, foram levadas a cabo por Gibson & Henkel (1954) in Head (1994). Para solos residuais de granito (com D_{50} a variar entre 0,2 e 2 mm), Cheung *et al.* (1988), não encontraram diferenças significativas nos parâmetros de resistência, quando a velocidade de corte varia entre 0,007 e 0,6 mm por minuto.

O gráficos tensão-deformação e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, respeitantes às amostras indeformadas, encontram-se no Cap.5, assim como os parâmetros de resistência resultantes de todas as amostras indeformadas ou não, submetidas ao ensaio de corte directo.

2.4.2.3.2 – Ensaio triaxial

O equipamento do ensaio triaxial tem uma versatilidade considerável e permite uma larga variedade de procedimentos de ensaio para determinar os parâmetros de resistência triaxial, deformabilidade e relação entre tensões características da amostra de solo. Adicionalmente, este ensaio pode ser usado para medir as características de consolidação e permeabilidade. O “*state of the art*” do ensaio triaxial de provetes de solo de forma cilíndrica foi estabelecido por Bishop & Henkel (1962).

Na prática, são utilizados por rotina os seguintes ensaios triaxiais, embora outros tipos de ensaios sejam também possíveis.

UU – Ensaio não consolidado, não drenado com ou sem medição de pressões neutras: não é permitida a drenagem nem a dissipação de pressões neutras durante a aplicação da pressão confinante e durante a aplicação da tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$).

CIU – Ensaio consolidado isotropicamente com compressão não drenada, com ou sem medição de pressões neutras: é permitida drenagem após a tensão de consolidação σ_3 ter sido aplicada; o provete consolida totalmente sob esta tensão. Não é permitida drenagem durante a aplicação da tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$).

CID – Ensaio consolidado isotropicamente com compressão drenada: a drenagem é permitida durante todo o ensaio, de modo a que a consolidação total ocorra sob a tensão de consolidação σ_3 , e não se gerem excessos de pressão neutra durante a aplicação da tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$).

Importa referir que as opções que se fizeram para a escolha do tipo e número de ensaios, foram condicionadas pela disponibilidade dos meios e equipamentos existentes no laboratório do CEGSA (Centro de Estudos de Geologia e Geotecnia de Santo André), no período em que se desenvolveu o presente estudo. O recurso a técnicas convencionais, em particular no que respeita ao tipo de trajectória de tensões imposta, enquadrava-se nos objectivos deste trabalho, onde se pretende uma caracterização genérica dos principais tipos de solos residuais graníticos (s.l.), o que só é possível com métodos tradicionalmente aplicados. Como é sabido a metodologia de realização dos ensaios de resistência, afecta de forma significativa os valores da coesão e do ângulo de atrito dos solos (Simons & Menzies, 1977).

Para a realização dos ensaios triaxiais, foram colhidas amostras utilizando amostradores de parede dupla mas, ao retirar as amostras em laboratório, o solo desagregou-se em placas, devido à fraca coesão entre as partículas. Devido à impossibilidade de obter amostras indeformadas, recorreu-se então a amostras remoldadas, tentando reproduzir o melhor possível as características físicas *in situ*. Deste modo, foi conseguido que os três provetes pertencentes a cada série de ensaios, fossem tão idênticos quanto possível, o que é um requisito difícil de obter, em amostras indeformadas na maioria dos solos residuais, devido à sua grande variabilidade no terreno.

Selecionaram-se três tipos de solo residual, provenientes dos maciços de Évora, Nisa e Vídigueira (secção 5.2, 5.7 e 5.17, respectivamente), com características mineralógicas e texturais distintas, os quais foram submetidos a cinco ensaios triaxiais: dois deles do tipo consolidado-não drenado (CIU) com leitura de pressões neutras; os três restantes, do tipo não consolidado – não drenado sem leitura de pressões neutras, onde os respectivos 9 provetes se encontravam não saturados, isto é, com valores do teor em água natural correspondentes às condições no terreno. Este último procedimento é o mais indicado, no estudo das características de resistência da maioria dos solos residuais, tal como justificam autores como Blight (1997) e Vaughan *et al.* (1988). Na verdade, a grande maioria dos solos residuais, encontra-se, em jazida natural, em condições de não saturação, porque os níveis freáticos, geralmente, estão muito abaixo dos locais estudados ou dos locais interceptados por obras de engenharia. Estas condições de não saturação, conferem a estes solos características de resistência típicas, devido ao efeito de sucção e às tensões de capilaridade entretanto geradas nos processos de rotura (Cap. 5 e 7). As duas séries de ensaios realizados nos mesmos solos, e onde as amostras foram saturadas, representando, deste modo, a condição menos favorável para os solos residuais, serve por um lado como termo de comparação, quer entre o mesmo solo e diferentes metodologias, quer entre o solo em causa e outros solos estudados por outros autores em que se usou a mesma metodologia; por outro lado, permite a obtenção dos parâmetros de resistência em termos de tensões efectivas.

Nos procedimentos gerais seguiram-se as normas BS 1377: Part 7 (1990) e ASTM 2850-95, com alguns requisitos adicionais exigidos pelas características inerentes aos solos residuais em estudo. Assim, os provetes foram isolados, não por uma, mas por duas e, por vezes, três membranas finas e resistentes, de modo a evitar a sua rotura pelas arestas aguçadas de alguns grãos. Normalmente o efeito restritivo das membranas é minorado e, geralmente, negligenciado, no caso de solos rijos (“*hard soils*”) e ou provetes de grande diâmetro, igual ou superior a 100 mm, Head (1994).

Depois de assegurado o isolamento, introduziu-se água na câmara triaxial; o sistema de tensões confinantes durante a consolidação foi isotrópico ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Posteriormente, a força é aplicada axialmente, através de um pistão que actua no topo do provete à medida que se controla a magnitude da tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$), (Fig.2.9). Nestes ensaios de compressão por deformação controlada, onde o provete é levado à rotura pela aplicação, a velocidade constante, da deformação axial, a tensão principal maior σ_1 , é que representa a tensão axial. As tensões principais intermédia e menor, σ_2 e σ_3 , respectivamente, são iguais e correspondem à tensão confinante.

Os 15 provetes cilíndricos ensaiados, tinham 102 mm de diâmetro e o dobro da altura deste. Segundo Blight (1997), para ensaiar solos residuais, o diâmetro do provete não deve ser menor que 76 mm. Provetes com diâmetros pequenos não são considerados representativos, devido ao efeito escala relacionado com fissuras e heterogeneidades próprias destes solos.

Simultaneamente o diâmetro do provete não deve ser menor que 8 vezes a máxima dimensão das partículas do solo.

Nos ensaios CIU, as amostras foram previamente saturadas ($S > 95\%$), recorrendo à aplicação de contrapressão. O grau de saturação que o provete alcançou, pode ser comprovado pela medição do parâmetro de pressão neutra de Skempton ($B = \Delta U / \Delta \sigma_3$), que para os provetes em questão, pode considerar-se $B \approx 1$ ($B = 0,992$). Este parâmetro é, no entanto, dependente da porosidade do provete e da compressibilidade, tanto da estrutura do solo como do fluido nos poros (Black & Lee, 1973). Os valores obtidos, nestes ensaios, para o parâmetro $A = \Delta U / \Delta \sigma_1$, de Skempton, na rotura, constam nos Quadros 5.38 e 5.86.

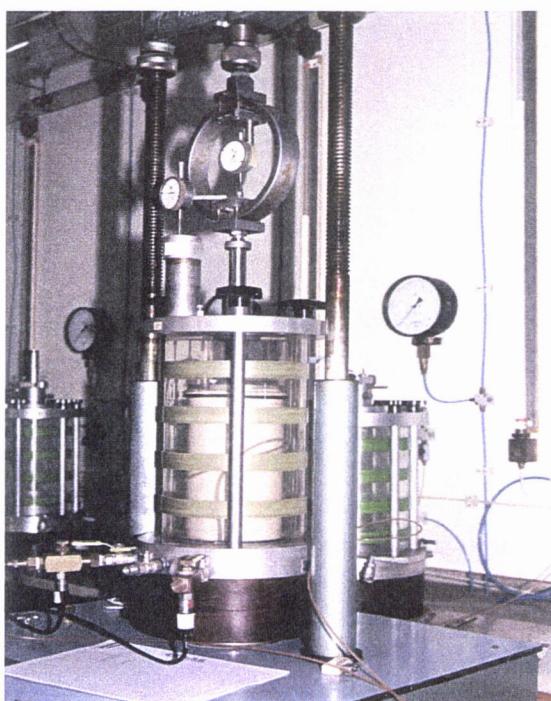


Figura 2.9 – Ensaio de compressão triaxial.

No caso dos solos não saturados, tanto o ar como a água estão presentes nos poros, e a medição das tensões intersticiais apresenta certas dificuldades e requer algumas considerações adicionais devido ao efeito da tensão superficial ou capilaridade. Considerações práticas sobre métodos para medir a tensão intersticial do ar e da água são propostas por Bishop & Blight (1963).

A velocidade de deformação imposta na fase de corte foi de 0,2 mm/min. As tensões confinantes (σ'_c) na fase de corte, foram iguais às da fase de consolidação para as 3 câmaras e foram 50, 100 e 200 KPa, respectivamente.

O critério de rotura utilizado foi o de máxima tensão de desvio. Os gráficos respeitantes aos ensaios triaxiais realizados, nomeadamente, as curvas ‘tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) versus deformação axial (ϵ_a)’ e as respectivas envolventes de rotura, constam no Capítulo 5.

No caso dos ensaios CIU, foram realizadas leituras na fase de consolidação, que permitiram obter dados para estimar o valor do coeficiente de permeabilidade (k). Os valores dos

parâmetros de resistência, em termos de tensões efectivas e tensões totais, assim como, o módulo de deformabilidade tangente inicial (Eti), Duncan & Chang (1970), constam nos quadros das secções acima mencionadas.

2.4.2.4 – Ensaios de compressibilidade

Para determinação dos parâmetros de compressibilidade dos solos residuais, em laboratório, o ensaio edométrico tem sido amplamente utilizado. A escolha deste ensaio, para o estudo das características de deformabilidade, apresenta vantagens relativamente a outros ensaios (principalmente aos ensaios *in situ*), tais como, a simplicidade de execução, economia e bom controlo das condições de humidade e das tensões aplicadas.

No ensaio edométrico aplica-se uma tensão vertical à amostra (daqui a designação de compressão unidimensional) e impede-se a deformação no sentido horizontal (daí o nome de compressão confinada). Assim, a partir da deformação axial é fácil obter a deformação volumétrica, porque a única variável é a altura.

O ensaio edométrico goza de grande aceitação porque o estado de tensão no anel simula com bastante fidelidade situações reais, que se encontram com certa frequência na prática. Este ensaio também é conhecido como ensaio de consolidação, devido a continuar a ser muito utilizado para estudar o fenómeno da consolidação. A maior dificuldade experimental é devida ao atrito lateral, porque se desenvolvem tensões tangenciais entre a amostra e o anel; este facto impede que a totalidade da carga axial aplicada superiormente seja transmitida à parte inferior da amostra, devido ao atrito, sendo este, normalmente desprezado. Com o intuito de minimizar o desenvolvimento dessas tensões de corte, as superfícies cilíndricas dos anéis de cravação do ensaio, foram previamente pinceladas com um óleo lubrificante fino.

No total, realizaram-se 24 ensaios edométricos, 20 dos quais em amostras indeformadas. Estas amostras foram obtidas pela cravação dos anéis biselados do edómetro, nos blocos de solo residual recolhidos nos locais seleccionados. Na preparação das amostras deformadas, houve o cuidado em preservar as características físicas *in situ*, nomeadamente, teor em água natural e densidade. Os ensaios realizaram-se em aparelhos de consolidação do modelo WF24251, com células de anel fixo e possibilidade de drenagem em ambas as faces do provete. Os anéis utilizados tinham 20 mm de altura e, 50 e 100 mm de diâmetro, sendo este último o mais utilizado (16 amostras).

Na realização dos ensaios seguiram-se os procedimentos gerais descritos nas normas: BS1377: Part 5 (1990) e ASTM D2435-96. Considerações teóricas e práticas adicionais podem ser consultadas em “Soil Laboratory Testing” editado por Head (1994). De acordo com as referidas normas, o valor médio do diâmetro da partícula de maior dimensão não deve exceder 1/5 da altura do anel. Isto significa que, para uma amostra de 20 mm de altura, partículas com mais de 4 mm de diâmetro, são aceitáveis se, ocorrerem no solo ocasionalmente.

Os provetes, depois de devidamente instalados na célula edométrica, foram submetidos a tensões verticais que variaram entre 1,5 e 1500 KPa nas amostras maiores e 14,6 e 3600 KPa nas amostras menores. Cada escalão de carga teve a duração de 24 horas, no fim do qual a tensão foi duplicada até atingir a tensão máxima desejada, após a qual, se procedeu ao escalão de descarga, permitindo assim calcular o índice de expansibilidade (C_s).

Para a determinação dos parâmetros de consolidação primária, utilizaram-se as seguintes equações (Terzaghi e Peck, 1967):

- índice de compressibilidade: $C_c = - \Delta e / \Delta \log \sigma'_v$ (2.9)

- coeficiente de compressibilidade: $a_v = - \Delta e / \Delta \sigma'_v$ (2.10)

- coeficiente de compressibilidade volumétrica: $m_v = - a_v / (1 + e_i)$ (2.11)

- índice de expansibilidade: $C_s = \Delta e / \Delta \log \sigma'_v$ (2.12)

em que: e_i - o índice de vazios inicial; Δe - a variação do índice de vazios inicial para o respectivo incremento de tensão σ'_v .

Para o cálculo do coeficiente de consolidação (c_v), utilizou-se o método de ajustamento da raiz quadrada do tempo (Lambe, 1960), cuja determinação se faz pela seguinte equação:

- $c_v = 0,848 h^2 / t_{90}$ (2.13)

em que: h - a espessura média por superfície de drenagem para o respectivo incremento de carga; t_{90} - o tempo correspondente a 90 % da consolidação primária, para o respectivo incremento de carga.

Com base nos valores dos parâmetros calculados anteriormente, foi ainda possível determinar o coeficiente de permeabilidade a partir da equação:

- $k = c_v m_v \gamma_w g$ (2.14)

sendo: γ_w - o peso específico da água; g - a aceleração da gravidade.

A tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p), foi avaliada pelo método de Casagrande (1936). Trata-se de um método gráfico bastante utilizado, e satisfatório quando a curva de compressão exibe uma quebra nítida.

As curvas de compressibilidade, índice de vazios (e) versus logaritmo da tensão efectiva vertical ($\log \sigma'_v$), bem como os parâmetros físicos, iniciais e finais, dos provetas submetidos ao ensaio edométrico, e respectivos parâmetros de compressibilidade dos solos estudados são apresentados no Capítulo 5.

CAPÍTULO 3

ENQUADRAMENTO REGIONAL DAS ÁREAS DE TRABALHO

3 – ENQUADRAMENTO REGIONAL DAS ÁREAS DE TRABALHO

3.1 – Preâmbulo

Este capítulo tem como principal objectivo a apresentação das manchas graníticas (s.l.) ou granitóides, que constituem objecto de estudo, sob várias perspectivas. Assim, inicia-se com a localização geográfica dos maciços, seguida dos principais aspectos geomorfológicos e características climáticas. Especial atenção é dada ao contexto geológico-estrutural, principalmente no que diz respeito às formações granítóides (génese, petrografia, cronografia). Finalmente, procede-se à apresentação dos 62 locais de amostragem com a descrição resumida dos respectivos perfis de solos residuais.

As rochas graníticas (s.l.) ou granitóides, constituem um grupo de rochas petrograficamente diferentes, com composição igual ou semelhante à dos granitos, apresentando texturas faneríticas ou microfaneríticas.

Não existe actualmente um consenso para a definição de rochas graníticas, pois o conceito varia um pouco consoante a formação específica do autor. Contudo, neste trabalho, entende-se por granitóides as rochas plutónicas que na classificação de Streckeisen (1967), possuem quantitativos modais de quartzo compreendidos entre 20 e 60 %. Assim, o termo granítóide inclui os granitos (s.s.), os granodioritos e os tonalitos ou quartzodioritos. Esta definição, está aliás, em consonância com as designações adoptadas por diversos investigadores ibéricos, deste grupo de rochas, no livro “Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico”, editado por Bea *et al.* (1987).

No presente trabalho, são excluídas as rochas intrusivas filonianas, tais como filões aplito-pegmatíticos e pórfiros graníticos, devido à pequena representação espacial (geometria linear associada a pequenas espessuras) e à importância pontual que os caracteriza.

3.2 – Localização geográfica

Os locais onde se desenvolveu o presente trabalho, situam-se no Alentejo, que é por sua vez, a maior unidade geográfica de Portugal, limitada a norte pelo rio Tejo e a sul pela região algarvia, a este e a oeste faz fronteira com Espanha e o Oceano Atlântico, respectivamente.

Este estudo incide sobretudo, sobre todas as massas graníticas aflorantes a sul do rio Tejo (Fig. 3.1), mais concretamente, sobre os solos resultantes da sua alteração. Para o efeito, seleccionaram-se 16 manchas de solos residuais de granitóides, perfazendo um total de 3249 Km² em área aflorante (Cap.2). A região estende-se no sentido longitudinal desde o Complexo Eruptivo de Nisa, simultaneamente o mais setentrional (39° 30' de latitude N) e o de maior extensão (700 Km²), até ao Maciço Granítico de Pias, o mais meridional (38° de latitude N). No sentido latitudinal, temos o Tonalito de Montemor-o-Novo (8° 20' de longitude W) e o Granito de Elvas (7° 10' de longitude W) nos extremos ocidente e oriente, respectivamente. Os maciços eruptivos distribuem-se numa área sensivelmente rectangular (110 Km x 180 Km), na qual foi feita o reconhecimento de campo, correspondendo a cerca de 20 % da mesma.

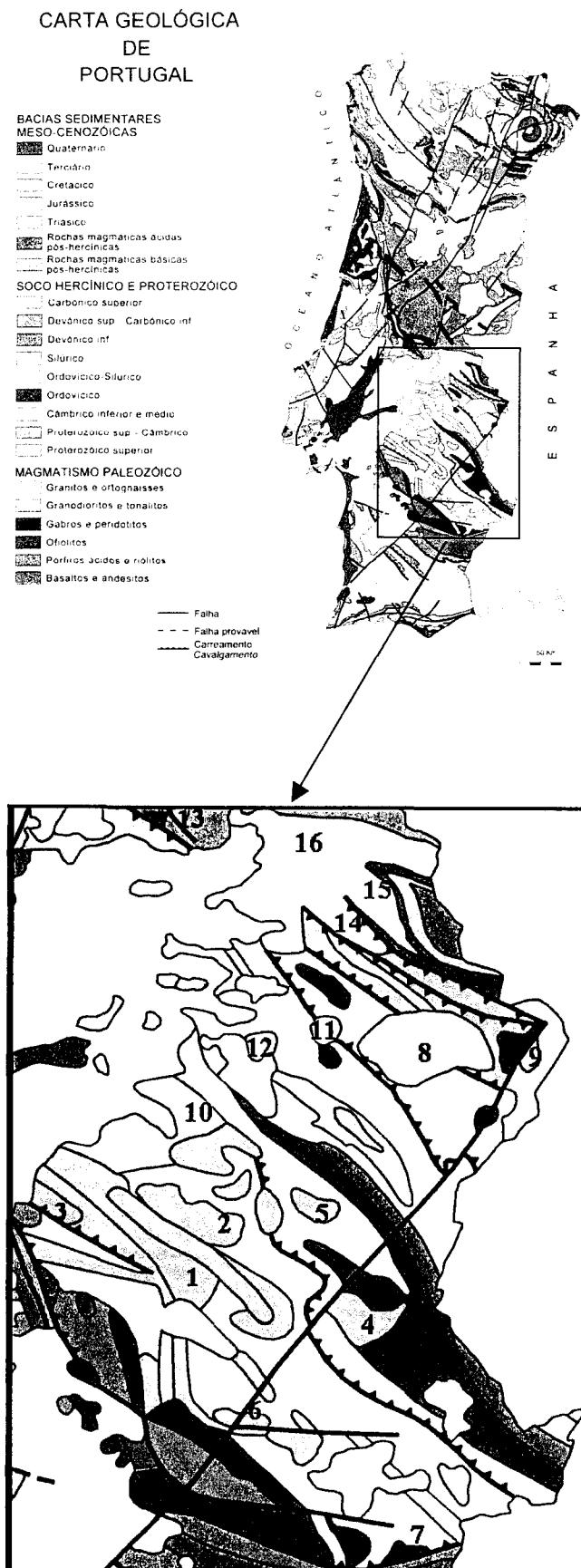


Figura 3.1 – Os maciços granítóides a sul do Tejo. A região em estudo, no quadro geográfico e geológico de Portugal Continental, (adaptado da Carta Geológica de Portugal simplificada; IGM, 1999).

Legenda:

- 1 - Maciço eruptivo de Évora
 - 2 - Maciço eruptivo de Arraiolos
 - 3 - Maciço eruptivo de Montemor-o-Novo
 - 4 - Maciço eruptivo de Reguengos
 - 5 - Maciço eruptivo do Redondo
 - 6 - Complexo granítóide da Vidigueira
 - 7 - Maciço granítico de Pias
 - 8 - Maciço granítico de St.ª Eulália
 - 9 - Maciço granítico de Elvas
 - 10 - Maciço granítico do Vimieiro
 - 11 - Maciço granítico de Fronteira
 - 12 - Maciço granítico de Ervedal
 - 13 - Maciço granítico do Gavião
 - 14 - Maciço granítico de Portalegre
 - 15 - Maciço granítico de Carreiras
 - 16 - Complexo eruptivo de Nisa
- (A localização dos números corresponde à das localidades que deram nome aos maciços estudados).

A região abrange os distritos de Portalegre, Évora e Beja, estando os corpos graníticos implantados junto a cidades e vilas importantes, tais como: Évora, Portalegre, Elvas, Arraiolos, Montemor-o-Novo, Castelo de Vide, Marvão, Nisa, Monforte, Fronteira, Redondo, Vidigueira, Viana do Alentejo e Reguengos de Monsaraz. Os acessos às referidas povoações são garantidos por rodovias de grande importância como a A6 (Marateca-Elvas) e o IP2 (Portalegre-Évora-Beja), que atravessam a região nas direcções, W-E e N-S, respectivamente, para além de numerosas estradas nacionais e camarárias, referenciadas em 3.6 (descrição dos locais de amostragem).

A área em estudo abrange parte da zona SE da Carta Geológica de Portugal à escala 1:500 000 (Fig. 3.5), correspondendo grosso modo à folha 6 à escala 1:200 000, ainda em preparação. Por este motivo o reconhecimento de campo foi apoiado, essencialmente, pela cartografia geológica existente à escala 1:50 000 e, pela preciosa colaboração do Professor Doutor Francisco Gonçalves, sob forma de visitas guiadas aos locais de interesse.

3.3 – Geomorfologia

A caracterização geomorfológica incidiu sobretudo na identificação das principais formas de relevo da região que abrange os maciços graníticos em estudo, pois a análise dessas formas permite estudar a sua génese e, por vezes, a das formações em que aparecem, uma vez que estão directamente relacionadas com a estrutura, tectónica e litologia da região. Por outro lado, os fenómenos geodinâmicos, dos quais se destacam os processos de erosão dos solos e rochas por parte dos agentes (água, temperatura, vento, etc.), associados à topografia dos terrenos, desempenham um papel importante na formação dos solos residuais e nas respectivas propriedades químicas, mineralógicas, físicas e geotécnicas.

Sem grandes relevos (72 % da área de Portugal corresponde a altitudes inferiores a 400 m), do ponto de vista geomorfológico, o território português patenteia contraste flagrante entre as regiões setentrional e meridional, cuja separação se faz pelo rio Tejo, ou, mais exactamente, pelos relevos da Cordilheira Central, orientada na direcção ENE – WSW (Teixeira, 1981). As montanhas, planaltos elevados, vales profundos e relevos vigorosos, concentram-se no norte do país onde ficam 95 % das áreas de altitude superior a 400 m, contrastando com as terras baixas da região meridional de Portugal, caracterizada por peneplanícies de cota média pouco elevada e depressões extensas (Ribeiro *et al.*, 1991). Convém referir que 62 % da área desta parte do território é formada por terrenos de altitude inferior a 200 m; as formações de altitude inferior a 400m ocupam 97 % da área da região; apenas, de longe em longe, se destacam relevos raros e afastados - os terrenos com altitude acima de 700 m representam, somente, 0,2% da área e, os terrenos com altitude entre 400 a 700 m apenas 2,8 % - tais como a Serra de S. Mamede (1027 m) e a Serra de Ossa (649 m), (Ribeiro *et al.*, 1991), na região em estudo.

As principais características geomorfológicas de Portugal Meridional são devidas às duas extensas bacias do Tejo e do Sado e à vasta peneplanície que se estende para leste e para sul e que constitui a maior unidade geomorfológica de Portugal. Mas este estudo não abrange as referidas bacias nem a área a sul do granito de Pias, sensivelmente à latitude de Beja. Quase no limite geomorfológico das bacias, as rochas mais antigas começam a aparecer, por baixo da cobertura Terciária (Fig. 3.1). A extremidade NE da Bacia do Tejo passa à peneplanície de Nisa, que se prolonga para o sul através de todo o Alentejo, cortando sempre a estrutura antiga. Trata-se de uma extensa peneplanície, várias vezes retocada, invadida nas orlas por

diversas transgressões marinhas e fossilizada por depósitos detriticos continentais, pertencentes a épocas muito diversas. A vasta peneplanície do Alentejo é portanto poligénica (Ribeiro *et al.*, 1991).

Estudos geomorfológicos da região, propriamente ditos, há dois: a Serra de S. Mamede (Feio & Almeida, 1980) e a Serra de Ossa (Feio, 1983). Estão publicadas notas geomorfológicas nas Notícias Explicativas das Cartas Geológicas do Redondo (Feio *in* Carvalhosa *et al.*, 1987), Reguengos (Martins *in* Carvalhosa *et al.*, 1991) e Arraiolos (Martins *in* Carvalhosa, 1999). Os aspectos essenciais sobre o relevo do Alentejo podem ser revistos em Feio (1951) e Feio & Martins (1993). Este autor distingue a peneplanície do Baixo Alentejo, extensa e una, da peneplanície do Alto Alentejo, que se desenvolve, essencialmente, a norte da Serra de Portel. Ribeiro *et al.* (1991), explicam que as diferenças de resistência das rochas e as dobras apertadas da estrutura hercínica, justificam suficientemente as ondulações do Alto Alentejo, alongadas segundo a estrutura hercínica. A dependência das formas de relevo em relação à estrutura hercínica, mostra-se claramente na Serra de S. Mamede.

Percorrendo a região de norte para sul, destacam-se em seguida os aspectos geomorfológicos referenciados na Figura 3.2.

- A *Serra de S. Mamede*, situada na fronteira luso-espanhola, um pouco a sul do Tejo, junto a Portalegre, levanta-se até 1027 m e está completamente rodeada pela peneplanície, situada a cerca de 350-400 m no lado sul, algo mais no lado norte da serra. A parte ocidental da montanha é constituída por granitos e a parte oriental por xistos com intercalações de quartzito (3.5.1). No entanto, o *granito de Marvão* ocorre a 700 m de altitude, a NNE da povoação com o mesmo nome (Duarte *et al.*, 2000). Há contraste nítido entre a parte granítica, onde existem superfícies bem conservadas, apesar de um rejuvenescimento importante e, a parte xistosa, onde a dissecação é muito mais intensa e as superfícies faltam (Feio & Almeida, 1980). Na parte granítica observam-se duas vastas aplanações, cujas posições testemunham o levantamento da montanha: i) a rechã de Portalegre, a 400 – 500 m de altitude, formada pelo *granito de Portalegre*, que domina a peneplanície por um ressalto de uma centena de metros, certamente de origem tectónica, por vezes vigoroso, mas mal conservado; ii) a plataforma de Alvarrões, que corresponde grosso modo ao *granito de Carreiras*, separada da rechã anterior por uma escarpa de falha vigorosa, cujo desnível corresponde a cerca de 230 m (Feio & Martins, 1993).

Na extensa superfície de erosão circundante, é possível individualizar pequenas superfícies. As zonas mais arrasadas situam-se nas séries xistentas, sobretudo, nos metassedimentos Precâmbricos onde se instalaram rochas graníticas orientadas, igualmente niveladas com eles. Os calcários do Câmbrico constituem, em geral, planaltos, como o de Vila Boim que é o mais importante (Fig. 3.2). Os maciços graníticos, incluindo os de natureza subvulcânica (St.^a Eulália, Carrascal, Fronteira e Ervedal), estão também arrasados, apresentando-se as superfícies de erosão ligeiramente mais elevadas do que nas séries xistentas (Gonçalves, 1971).

- *A peneplanície entre Crato e Nisa*. A SW da Serra de S. Mamede, logo a norte do Crato, a peneplanície desenvolve-se a cerca de 300 m de altitude; mais para norte, na área de Alpalhão, (*granito de Alpalhão e Gafete*), está-se num local com muito boa conservação da superfície topográfica desenvolvida a cerca de 320 m. A peneplanície estende-se assim até à região de Nisa, bem conservada no *granito de Nisa*, a altitudes entre 300 e 310 m (Feio & Martins, 1993). A paisagem granítica apresenta como forma típica de erosão, nos granitos

hercínicos (3.5.2.2), belos exemplares de penedos pedunculados que sobressaem de frequentes caos de blocos (Ribeiro *et al.*, 1965).

- Na região do Gavião, localizada a SW de Nisa, destaca-se da paisagem de terras baixas pertencentes à peneplanície de Nisa e à bacia do Tejo, uma série de elevações orográficas onde se inclui o **granito de Gavião** a leste do Complexo Xisto-Grauváquico. Esta área, caracteriza-se por relevo acidentado e, é cortada por densa rede de linhas de água pertencentes a duas bacias hidrográficas: a NW, a do rio Tejo e seus afluentes da margem esquerda; a SE, a ribeira de Sor e seus tributários.

- ***A peneplanície e os relevos residuais a SE de Alter do Chão.*** A sul do Crato, povoação implantada nos granitos, surge a área de Alter do Chão, onde existe grande diferenciação petrográfica que conduziu a uma diversidade de cotas em que é difícil definir a posição da peneplanície. Na região de Fronteira, os interflúvios indicam a aplanação a 240 – 260 m com descida gradual para a bacia terciária do Tejo (Feio & Martins, 1993). O **maciço granítico de Fronteira** encontra-se quase totalmente arrasado. Contudo, destacam-se, pontualmente, afloramentos, onde são visíveis formas de erosão em caos de blocos, aspecto típico e comum das paisagens graníticas. As altitudes médias do maciço oscilam entre 200 e 220 m, sendo a mínima 192 e a máxima 238 m (Palácios, 1976).

- Caminhando para oeste encontra-se o **maciço eruptivo de Ervedal**. As altitudes variam entre 140 m, no leito da ribeira de Avis, e 251 m, a NW de Saianda. No maciço eruptivo predominam as superfícies aplanadas e colinas suavemente arredondadas resultantes do arrasamento sofrido. A rede hidrográfica é de tipo rectangular e, existem caos de blocos que, sendo abundantes em alguns locais, desaparecem completamente em extensas zonas onde as rochas eruptivas sofreram intensa meteorização e consequente arenização (Joaquim, Ladeira & Coelho, 1972).

- Seguindo 20 Km para leste, sensivelmente à mesma latitude, desenvolve-se a grande mancha de **granitos de Monforte – St.ª Eulália** que apresentam uma aplanação, embora ondulada, com cotas entre 280 m e 320 m. Mais para leste, a área deprimida da grande albufeira do Caia e proximidades (cerca de 250 – 200 m, no fundo do vale), é cortada por importantes acidentes tectónicos (Feio & Martins, 1993).

- ***O planalto de Vila Boim – Vila Fernando – Elvas***, encontra-se a sul do maciço anterior, com altitudes variáveis, correspondendo a diferenciações petrográficas, de onde sobressaem diversos relevos residuais, mas em regra da ordem de 420 – 450 m. No entanto, a natureza das rochas não explica só por si a posição alta do planalto em relação a toda a peneplanície, porque aquele termina a norte do paralelo de Vila Fernando; os calcários estendem-se muito para além dele, a confirmar que, além do factor litológico, houve também elevação tectónica (Feio & Martins, 1993). Na parte leste, o planalto está mais baixo, talhado em gabros, mas também dissecado, como consequência da proximidade do degrau que dá para a bacia sedimentar de Badajoz, que passa um pouco a leste de Elvas. O **granito de Elvas** ocorre exactamente entre o planalto e a referida bacia, ou seja, numa zona de declive suave a leste de Elvas, com cotas que variam entre 230 e 190 m (Gonçalves *et al.*, 1970).

Apesar de não estarem directamente relacionadas com os maciços granítoides em estudo, existem pelo menos três unidades morfológicas que pela sua importância e, por estarem enquadradas na região, merecem referência.

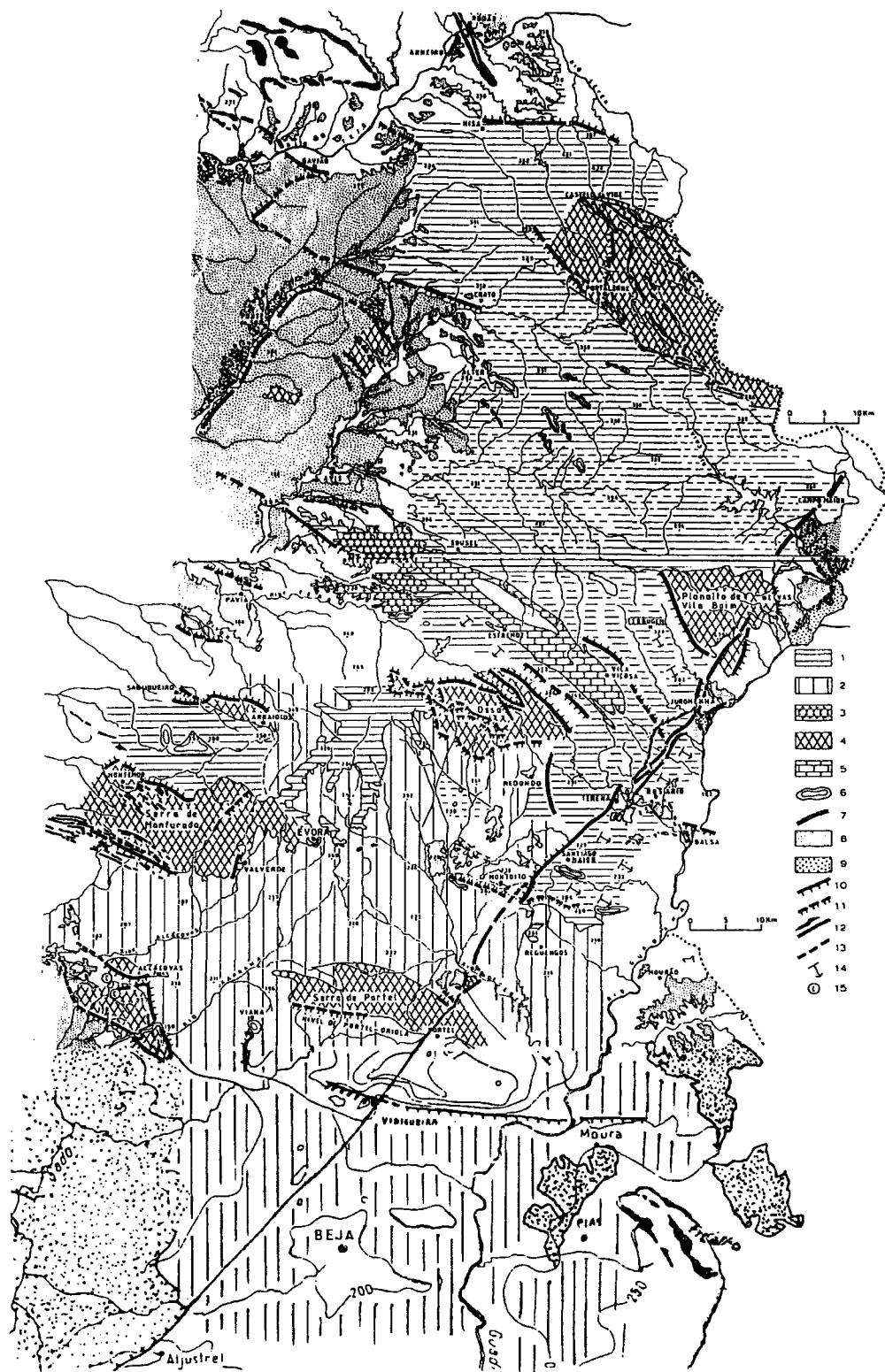


Figura 3.2 – Principais formas de relevo da área estudada: 1. peneplanicie do Alentejo (posição alta); 2. peneplanicie do Alentejo (posição baixa); 3. superficie da Casa Branca e Cano; 4. compartimentos levantados; 5. maciço calcário de Estremoz; 6. relevos de dureza; 7. cristas correspondentes a filões e impregnações de rochas duras (quartzitos, lítitos, etc.); 8. cobertura terciária; 9. terraços; 10. escarpas de falha; 11. escarpas de falha prováveis; 12. sistema de falhas associado ao grande filão dolerítico do Alentejo; 13. alinhamentos de vales de fractura; 14. superfícies balançadas ou flexuradas; (adaptado de Feio, 1951; Feio & Martins, 1993).

i) O *maciço calcário de Estremoz*, apresenta uma superfície topográfica bem desenvolvida e horizontal que se eleva a 440 m de altitude, e pontualmente a 500 m, a SE, S, SW e W dos maciços graníticos de Ervedal, Fronteira, St.^a Eulália e Elvas, respectivamente. Este maciço é um grande anticlinório, que aflora com forma lenticular, tem 37 Km de comprimento na direcção WNW – ESE e cerca de 6 Km de largura máxima, em frente a Estremoz. O maciço calcário, em conjunto, eleva-se 50 a 100 m acima das formações xistosas circundantes. A faixa de mármore que circunda o maciço funciona como rocha mais branda e está quase sempre bem aplanada, podendo a superfície atingir 400 m, junto a Borba. Em pormenor, o relevo do maciço calcário é complexo, desde aplanações a vários níveis, uma escarpa de falha e, no bordo sul, um conjunto de colinas de relevo vigoroso. Estes elementos foram reconhecidos e descritos, em pormenor, por Feio (1983).

ii) A *Serra de Ossa*, a sul do maciço calcário, é um relevo importante, formado por lombas arredondadas e não por cristas vivas, que atinge 653 m em S. Gens e 642 m no Castelo, e exibe uma morfologia complexa. É, fundamentalmente, constituída por dois alinhamentos de xistas siliciosos, separados por um fosso tectónico, e por um maciço de rochas metamórficas diversas (Formação de Ossa), aplanado na parte superior, designado por compartimento de Pia do Lobo – Évora-Monte (Feio *in* Carvalhosa *et al.*, 1987). Este relevo é limitado a NE por uma grande escarpa de falha, que tem na parte mais alta, um comando da ordem de 180 m (Feio, 1983).

iii) A *Crista do Redondo*. Cerca de 2 Km a leste do Redondo, a peneplanície é atravessada por uma crista de direcção N – S, que se desenvolve, em curva muito suave, por cerca de 8 Km de comprimento; apesar de altura modesta (30 a 60 m acima da peneplanície próxima), o declive das vertentes é vigoroso, atingindo frequentemente 25 %. Gonçalves *et al.* (1974), referem que o relevo em crista resulta de um enriquecimento de quartzo, dentro de uma faixa de xistas siliciosos do Silúrico, provavelmente relacionado com importante acidente tectónico.

- A peneplanície abrangida pela Carta Geológica do Redondo, apresenta irregularidades resultantes das diferenças de comportamento das rochas que a compõem. Assim, nas manchas de granodioritos e/ou quartzodioritos do *maciço eruptivo do Redondo*, a superfície está muito bem conservada, mas mais baixa que as rochas mais duras; existe em regra um ressalto, da ordem de 30 m, muito nítido, 3 Km a leste de S. Miguel de Machede, na estrada para o Redondo. Enquanto que nas rochas eruptivas a superfície é unida, quase perfeita, nos paragnasses, micaxistas e metagrauvaques tem as características do relevo do xisto, com incisão de pequenas mas numerosas linhas de água, que criam um relevo em montículos irregulares. Tudo indica que os granodioritos e quartzodioritos, se meteorizam com mais facilidade, libertando elementos finos, fáceis de evacuar e, rebaixando deste modo, a superfície por igual; enquanto que as outras rochas se alteram menos, são mais impermeáveis, e, atacadas sobretudo pela erosão linear dos cursos de água (Feio *in* Carvalhosa *et al.*, 1987).

Tomando como referência as aplanações nos granodioritos, a altitude da peneplanície varia pouco. No sentido S - N, situa-se a 250 – 270 m na área de S. Miguel de Machede, e a norte desta povoação a 270 – 300 m; mais a leste, no meridiano do Redondo, a sul da vila, a 250 – 260 m; e a norte da vila volta para 270 – 300 m. Na direcção E – W não há praticamente diferenças (Feio *in* Carvalhosa *et al.*, 1987). Por outro lado, a cota da superfície de erosão aumenta para norte (300 – 320 m), junto a Évora-Monte, onde se localizam os pontos de amostragem pertencentes ao *maciço eruptivo de Arraiolos*.

- *As colinas de Arraiolos.* Trata-se de um conjunto de colinas vigorosas, embora de alturas modestas, de forma aproximadamente oval, atinge 399 m no castelo de Arraiolos, no topo da vila situada na extremidade leste; enquanto a aplanação envolvente talhada nos quartzdioritos, *maciço eruptivo de Arraiolos*, está a 300 m do lado sul e a 250 m do lado norte. O relevo é marcado a norte pela escarpa bem marcada de Santana do Campo, de natureza tectónica. Esta escarpa estabelece a passagem do nível alto da peneplanície de Évora (300 – 340 m), para o compartimento onde corre o rio Divor (240 – 250 m) cuja superfície inclina para a bacia do Tejo (Feio & Martins, 1993).

A oeste de Arraiolos, encontra-se o fosso tectónico de Sabugueiro que constitui uma depressão com fundo plano a 200 m de altitude, limitado do lado SW por uma escarpa de falha nos granitos (Martins in Carvalhosa, 1999), o granito de Sabugueiro, que faz parte do *maciço granítico do Vimieiro*. Este elemento morfotectónico está associado à falha de Ciborro, que se prolonga para SE até à localidade de Gafanhoeira e origina um desnível de 80 m entre o fundo da depressão de Sabugueiro e o retalho da aplanação de Sempre-Noiva. Por seu turno, a já referida escarpa de Santana do Campo, constitui um abrigo rectilíneo, com desnível de 80 m, a norte das colinas de Arraiolos, de alinhamento E – W, mas rumo para SE a norte de Arraiolos, esbatendo-se junto da Barragem do Divor. A escarpa define limites geométricos no relevo que não coincidem com contactos litológicos. A NW de Arraiolos, os granitos tanto surgem em posição elevada, na área do v.g. Almargem (343 m), como em posição baixa (270 – 280 m) em todo o compartimento de Santana do Campo, a norte da escarpa (Martins in Carvalhosa, 1999).

Grande parte do *maciço granítico do Vimieiro*, encontra-se representado na Carta Geológica de Pavia. Na área que se estende entre o bordo oriental do mapa e a estrada de Pavia para Arraiolos, nota-se um grande desenvolvimento do substrato. De SE para NW as cotas descem, observando-se 360 m no v.g. Arruda a SE do Vimieiro, 254 m no v.g. Touro a W do Vimieiro, 198 m no v.g. Barrocal entre Vimieiro e Pavia e 191 m no v.g. S. Miguel a E de Pavia. A topografia é relativamente aplanada mas com duas zonas mais recortadas pelas linhas de água: uma a E e NE do Vimieiro e outra a N e NW de S. Gregório. A zona montanhosa da Aldeia da Serra a NW de S. Gregório termina a N por um degrau de cerca de 100 m devido a uma falha E – W, ao passo que a vertente sul desce de modo mais suave. O extremo SW do mapa, de certo modo peneplanizado, encontra-se muito recortado por numerosas linhas de água, pertencentes à bacia da ribeira do Divor (Zbyszewski *et al.*, 1980).

Em suma, toda a região de Arraiolos, abrange uma área de cabeceiras de redes hidrográficas, pertencentes a três bacias: a parte E e SE é drenada pelo rio Degebe e pela ribeira de Machede, que pertencem à bacia do Guadiana, os sectores N e W escoam para o Tejo e, para S é drenada pelo rio Xarrama e por tributários da ribeira de Alcáçovas, que fazem parte da bacia hidrográfica do Sado. Existe assim, nesta região, uma competição de drenagem entre os afluentes do Guadiana, Tejo e Sado. Esta particularidade geográfica reflecte-se nas características do relevo, principalmente no seu arrasamento imperfeito, e nas formas dos vales dele resultantes (Martins in Carvalhosa, 1999).

- A *Serra de Monfurado* é um relevo entre Montemor-o-Novo e Valverde. Entre as colinas de Arraiolos e a Serra de Monfurado estende-se vasta área, a cotas da ordem de 320 m. Esta aplanação, um tanto rejuvenescida, está talhada principalmente em quartzdioritos, pertencentes ao *maciço eruptivo de Arraiolos* e, junto à serra, pertencentes à parte norte do *maciço eruptivo de Évora*, correspondendo, mais precisamente, às amostras colhidas nos taludes de escavação da A6 e Pomarinho, esta junto a Valverde (secção 3.6). A serra constitui

um maciço levantado cerca de 150 – 200 m acima da peneplanície, com cerca de 20 Km de comprimento entre Valverde e Montemor. Em Valverde, uma escarpa de 100 – 120 m limita o maciço na frente voltada para E; o Castelo do Geraldo está a 334 m de altitude e a Serra Pedrosa a 341 m, em contraste com a peneplanície a 230 – 240 m. O relevo é formado por xistos que também se estendem até à peneplanície, embora a maior parte desta, seja talhada nos granitóides. A escarpa, um pouco adiante, toma a direcção ESE – WNW, passa junto de Santiago do Escoural e prolonga-se por 10 Km para NW. O ponto mais alto da Serra de Monfurado tem 424 m de altitude, contrastando com a altitude (230 – 240 m) da peneplanície na base (Feio & Martins, 1993).

A povoação de Montemor-o-Novo situa-se na extremidade W da serra e em posição destacada sobressai a colina do castelo, devido ao forte encaixe do rio Almansor que lhe contorna o flanco sul. Os limites do relevo são nítidos nos quadrantes voltados a N e NW, mas esbatem-se gradualmente para W. Na extremidade NW da serra, à saída da povoação de Montemor para Lavre, encontra-se outro degrau com orientação N – S, com 50 m de desnível, que limita a Serra de Monfurado da peneplanície talhada nos afloramentos de rochas granitóides e gnaisses migmatíticos (Martins *in Carvalhosa et al.*, 1994). Os afloramentos de granitóides que se desenvolvem a NW de Montemor, a cota próxima de 200 m, correspondem ao **quartzodiorito de Montemor-o-Novo**.

- *A peneplanície na região de Évora.* Nalguns locais, em especial na zona de Évora, observam-se duas posições da peneplanície, uma mais baixa a sul da cidade (cerca de 250 m) e outra mais alta a norte (cerca de 300 m), (Feio & Martins, 1993). A separação faz-se aproximadamente pelo paralelo da cidade; a peneplanície que está a sul é interrompida por relevos modestos. A W da cidade, são os contrafortes do relevo de Montemor – Valverde, que chegam até ao “Alto de S. Bento” (364 m); a natureza das rochas que o constituem, quartzodioritos e granitos porfiróides, deve ter contribuído também para a sua conservação (Carvalhosa *et al.*, 1969). O morro arredondado de Évora (310 m) está separado dos relevos anteriores e relaciona-se com a dureza das rochas, gnaisses, ou seja, deve corresponder a um relevo residual. Para E da cidade, encontram-se relevos de xisto que culminam, a cerca de 280 – 290 m, numa superfície plana, embora dissecada, que se observa, por exemplo, na estrada para o Redondo, depois de passar o rio Degebe. Esta superfície encontra-se 30 a 40 m acima da peneplanície a S de Évora. Pode-se tomar como referência para a peneplanície bem conservada nesta região, a área a 10 Km para S e SE da cidade, centrada no aeródromo; a altitude é de 240 – 250 m e está talhada sobretudo em rochas eruptivas, granodioritos e quartzodioritos, (Feio & Martins, 1993), pertencentes ao **maciço eruptivo de Évora**.

Nota-se a diferença entre a superfície talhada nas rochas eruptivas, mais regular e que parece rebaixar-se lentamente por arenização, e as zonas talhadas nos gnaisses e migmatitos, onde é rugosa; notam-se também pequenas diferenças de altitude entre os dois tipos de superfície, da ordem dos 20 m nesta área, e que se observa em muitos locais, por exemplo no acesso para a barragem de Montenovo a SE de Évora. A SW de Évora a peneplanície encontra-se ainda melhor conservada, como na grande extensão de granodioritos do Monte das Flores (259 m). Para SSW, na direcção de Aguiar e Viana do Alentejo, a superfície de erosão está menos bem conservada. No maciço granítico de Aguiar – S. Bartolomeu do Outeiro, nota-se um abaixamento na direcção E – W, desde 378 m (v.g. Serpa) a E de S. Bartolomeu a W de Aguiar (220 m), passando por 247 m no v.g. de Cabeças Gordas, a ENE de Aguiar, como se pode comprovar na folha 40-C de Viana do Alentejo (Carvalhosa *et al.*, 1972). O rebaixamento da superfície, verificado para SW, deve-se à maior densidade e importância da rede hidrográfica ligada ao Sado (Carvalhosa *et al.*, 1994).

■ Área de Reguengos de Monsaraz. Nas proximidades da Vila de Reguengos, distinguem-se sobretudo relevos de dureza vigorosos, como a Serra das Pedras (333 m), a Serra de Motrinos (305 m) e o Relevo de Monsaraz; e a peneplanície em posição alta (260 m) e baixa (210 m), (Feio & Martins, 1993). Outras unidades importantes são a Depressão de Montoito que ocupa a parte central da Carta 40-B de Reguengos de Monsaraz, e o Grande Filão Dolerítico do Alentejo com orientação NE – SW (Martins in Carvalhosa *et al.*, 1991). O nível baixo da peneplanície desenvolve-se de forma muito regular nas rochas granítóides de Reguengos e S. Manços. Nos afloramentos granítóides, pertencentes ao maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz, encontra-se sempre rebaixada, cerca de 60 m, em relação às formações metamórficas envolventes, apesar de nestas a densidade da rede hidrográfica e a dissecação do relevo serem mais marcados. Este comportamento diferencial observa-se muito bem no contacto entre as duas formações nas estradas Reguengos – Santiago Maior e Reguengos – Corval – Baldio. A depressão de Montoito é uma área abatida, limitada do lado E por uma escarpa de 30 m que acompanha o Filão Dolerítico (Martins in Carvalhosa *et al.*, 1991), e onde se encontra o granodiorito da Vendinha (211m).

Relevos do Baixo Alentejo

■ A Serra de Portel (421 m), é interpretada por Feio (1951) como um grande *horst* de orientação geral E – W, que mede 20 Km de largura máxima e cerca de 50 Km de comprimento, e que separa as superfícies do Alto Alentejo e Baixo Alentejo. Trata-se de um relevo tectónico, composto por elementos de diferentes idades, que derivam de sucessivas deformações na peneplanície, geradas pela reactivação de vários acidentes, entre os quais se destaca a falha da Vidigueira. A escarpa de falha Vidigueira – Moura constitui importante elemento morfológico, que se eleva 150 – 200 m acima da peneplanície, atravessando-a desde as proximidades da Bacia do Sado até ao Guadiana, mas sem interromper completamente os compartimentos que ficam a norte, Superfície de Évora, e a sul, Superfície de Beja (Feio, 1951; Silveira, 1990).

O **Complexo granítóide da Vidigueira** aflora na parte SW da Serra de Portel, sendo interceptado pela escarpa da Vidigueira, que nesta região se atenua consideravelmente (o seu comando não excede 50 m entre Vila Alva e Vila de Frades), atingindo o relevo mais baixo (200 – 220 m); é também cortado pelo grande acidente tectónico Odemira – Portel de direcção SW – NE (Feio, 1951; Carvalhosa, 1967; Carvalhosa *et al.*, 1972). Toda a área do complexo foi muito afectada por acidentes tectónicos e fracturação implícita; as formas de relevo resultantes são essencialmente um ondulado suave que sobe no sentido SE – NW e alguns blocos arredondados de grandes dimensões, resultantes de disjunção esferoidal soltos sobre as superfícies arenizadas ou envolvidos por solo residual granítico, visíveis nos perfis expostos, (ver fotografia do perfil onde foi colhida a amostra 74, na secção 3.6).

O comportamento diferencial das rochas face à erosão, está bem patente nesta região, como nas anteriormente referidas. As rochas duras, tais como quartzitos e outras rochas siliciosas, formam de maneira geral cristas salientes. Os xistos impermeáveis, pouco resistentes à erosão linear, permitem a formação de vales abruptos e linhas de água encaixadas. As rochas verdes são brandas e alteram-se facilmente; encontram-se quase sempre situadas em terrenos baixos, em vales largos. Os granitos originam solos arenosos; a sua resistência à erosão linear e a permeabilidade são maiores do que nos xistos, pelo que apresentam rede de drenagem menos desenvolvida (Carvalhosa, 1967).

Finalmente, o **maciço granítico de Pias**, pertence a uma extensa, mas por vezes estreita, faixa que se estende de forma irregular a E da Vidigueira, passando por Pedrogão, Pomares, Pias, Fontes, até SE de Serpa, ao longo de aproximadamente 70 Km. Compreende rochas relativamente resistentes à erosão, mas como afloram em pequenas áreas dispersas ao longo de considerável extensão, não chegam por isso, a resultar num relevo bem diferenciado (Feio, 1951). Este maciço insere-se na peneplanície do Baixo Alentejo, a sul da escarpa da Vidigueira e Serra de Portel, que segundo Birot *et al.* (1948), corresponde a uma superfície de erosão facetada, mas cujos ângulos entre facetas são tão pequenos, que se pode considerar como uma superfície de aplanação poligénica, também designada por Superfície de Beja (Feio, 1951; Carvalhosa *et al.*, 1970; Silveira, 1990), que nesta região tem uma altitude de cerca de 200 m, cortando, indiferentemente vários tipos de formações geológicas. O maciço granítico é atravessado pelo rio Guadiana, a SE de Pedrogão. O Guadiana encaixa-se profundamente, mais de 100 m, quer na região da serra, quer na peneplanície, desenhandando meandros amplos (Carvalhosa *et al.*, 1970).

3.4 – Características climáticas

Entre os diversos elementos climáticos ou meteóricos, a **precipitação** e a **temperatura**, constituem sem dúvida, os factores que maior responsabilidade têm tanto na fissuração e desagregação física das rochas, como nos fenómenos químicos que alteram os minerais e, consequentemente, os que mais contribuem para a quantidade e qualidade dos solos resultantes da meteorização das rochas. No entanto, importa referir a existência de outros elementos climáticos e respectivas variações correlativas que, embora em menor escala, podem cooperar, directa ou indirectamente, na alteração das rochas e solos, tais como: humidade relativa, insolação, evaporação, vento, nebulosidade, etc.. A própria cobertura vegetal de uma região depende estreitamente do clima e, pode indirectamente promover ou inibir os processos de alteração actuantes nos maciços, através do aumento de reactividade química ou diminuindo a escorrência superficial e, consequentemente, a susceptibilidade à erosão dos solos e das rochas.

O clima de Portugal continental é mediterrânico e é considerado uma raridade; segundo Feio (1991), corresponde a 1,5 a 2 % da superfície das terras emersas do Mundo. A descrição dos climas e sua distribuição, encontra-se em tratados e manuais referidos por autores como Köppen, Thornthwaite, Trewartha, Estienne & Godard, Peguy, Yiers e Strachler. A originalidade do clima português e a sua evolução ao longo do ano, depende principalmente da posição marginal de Portugal em relação ao Atlântico, numa latitude subtropical (Martonne, 1953; Ribeiro *et al.*, 1988). Apesar das pequenas dimensões do país, são nítidos os contrastes climáticos entre o norte e o sul, o litoral e o interior; acentuadamente húmido nas regiões litorais do norte e do centro, e seco e quente nas terras do interior transmontano e nas províncias meridionais.

A diferenciação regional resulta, fundamentalmente, da latitude, da distância ao mar e da altitude. Com efeito, o Sul de Portugal recebe muito menos precipitação, porque as depressões do Atlântico Norte não causam ali chuvas na maior parte do ano. No Norte de Portugal, a precipitação não desce a menos de 1000 mm (média anual), com um número de dias de chuva superior a 105. Por exemplo, no Porto, chove em quase metade dos dias do ano. No Sul de Portugal, só as serras de S. Mamede e Monchique, costumam receber 1000 mm. Nas grandes planícies do Alentejo, a altura da precipitação fica abaixo de 700 mm e o número de dias com precipitação é inferior a 100. Se se considerarem secos, os meses em que se verificam menos

de 30 mm de precipitação, pode dizer-se que o Norte de Portugal apresenta 2 meses secos, enquanto que o Sul apresenta 3 a 6 (Lautensach *in* Ribeiro *et al.*, 1988).

Se o contraste Norte – Sul é marcante, as diferenças entre o litoral e o interior não o são menos, tanto a nível da precipitação e humidade relativa, como em relação aos aspectos térmicos. O gradiente térmico devido ao grau de continentalidade pode ser considerável ($2,37^{\circ} / 100\text{Km}$), calculado por Lautensach em 1932 *in* Ribeiro *et al.* (1988), entre Lisboa e Évora, desprezando a diferença de altitude.

Na divisão de Portugal em províncias climáticas (Lautensach, *in* Ribeiro *et al.* 1988), a maior parte das estações dos distritos de Portalegre e Évora insere-se na Província do Alto Alentejo e, a região a sul da Serra de Portel corresponde à Província Continental do Sul (estação de Beja). Pelos gráficos termo-pluviométricos referentes a 5 estações climatológicas (Figura 3.3), correspondentes ao período 1951–1980 (INMG, 1991), confirma-se o carácter mediterrânico do clima no Alentejo. A este clima associa-se a noção de temperatura média elevada, Verão longo, quente e sem chuva e, Inverno moderado, com valores de precipitação atmosférica baixos (Daveau, 1977 e Ribeiro, 1987 *in* Ribeiro *et al.*, 1988; Feio, 1991).

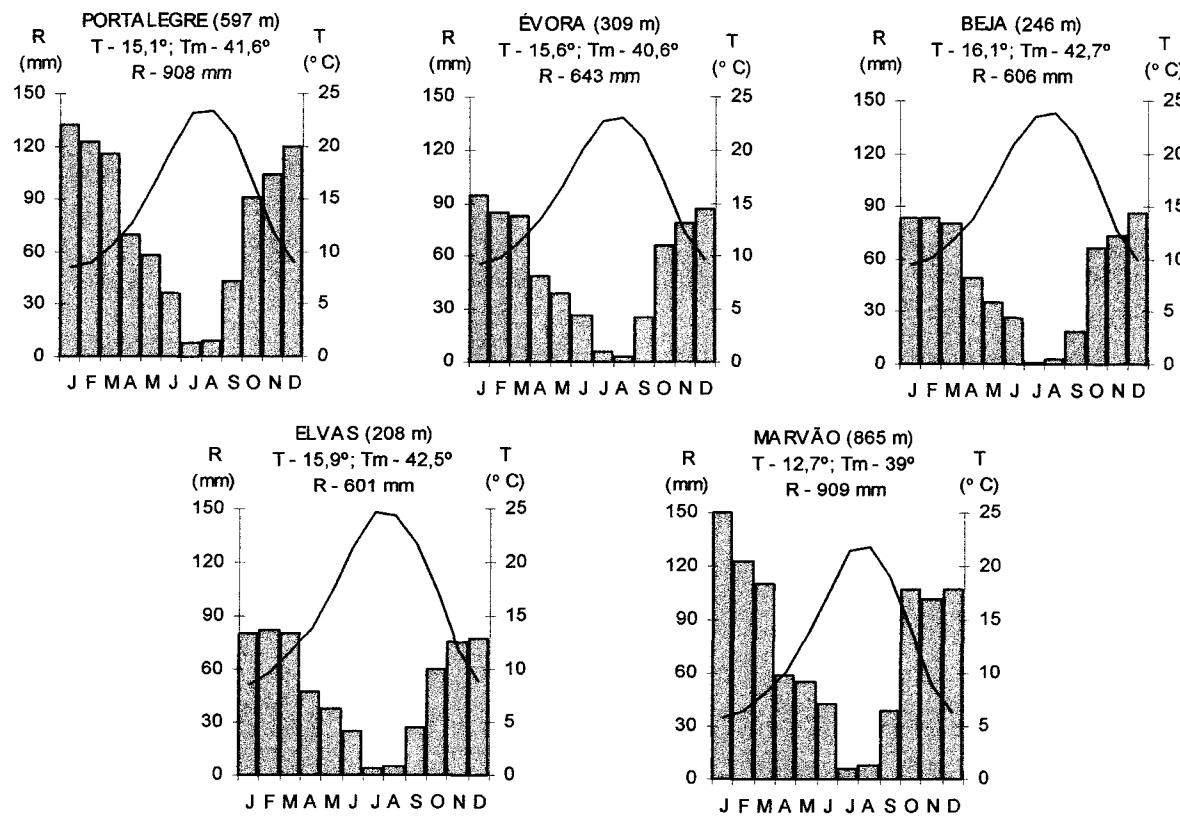


Figura 3.3 – Gráficos termo-pluviométricos obtidos a partir de registos de 5 Estações Climatológicas do Alentejo, correspondentes a 1951-1980. As colunas indicam os valores da precipitação média mensal em mm; R – precipitação média anual. A curva corresponde aos valores da temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$); T – temperatura média anual; Tm – temperatura máxima anual.

Relativamente aos gráficos (Figura 3.3), salientam-se, no entanto, algumas particularidades. Pouca variação relativamente às temperaturas médias mensais, acentuando-se as diferenças

nos valores máximos e médios anuais, onde prevalece o grau de continentalidade térmico. Por seu turno, a diferenciação pluviométrica regional é evidente, controlada, primeiro pela disposição geral do relevo, segundo pela distância ao mar, e terceiro pela latitude, como se pode confirmar pelos dados de precipitação média anual, obtidos, para o mesmo período de tempo, nos postos udométricos correspondentes às zonas dos maciços interceptados por este estudo (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Valores de precipitação média anual (R) obtidos em estações udométricas referentes às áreas em estudo, no período 1951-1980, e respectiva altitude do local (Hs).

Estação	R (mm)	Hs (m)	Estação	R (mm)	Hs (m)	Estação	R (mm)	Hs (m)
Marvão	909	865	Montemor	726	235	Reguengos	573	210
Portalegre	908	597	Escoural	889	275	Pte.Mourão	577	170
Gavião	876	281	Évora	643	309	Viana Ale.	727	230
Nisa	705	300	Redondo	612	315	Vidigueira	617	190
Fronteira	610	253	Monforte	593	275	Pedrogão	574	140
Vimieiro	609	253	Stº Eulália	520	237	Serpa	524	190
Arraiolos	698	350	Elvas	601	208	Beja	606	246

Entre as várias classificações climáticas existentes, seleccionou-se a Classificação de Köppen, pela simplicidade e larga difusão a nível mundial (Ferreira, 1950; Reis *et al.*, 1987; Ribeiro *et al.*, 1988; Feio, 1991). De acordo com a referida classificação quantitativa, baseada nos valores médios da temperatura do ar, na quantidade de precipitação e, na sua distribuição conjunta pelos meses do ano, ao Alentejo Oriental atribui-se o sub-tipo **Csa**; o significado desta nomenclatura simbólica é o seguinte:

C – *clima mesotérmico* (ou temperado) *húmido*: a temperatura média do ar no mês mais frio do ano está compreendida entre 0° e 18°;

s – *estação seca no verão*: a quantidade de precipitação no mês mais seco do semestre quente é inferior a 1/3 da do mês mais chuvoso do semestre frio, e inferior a 30 mm;

a – *verão quente*: a temperatura média do ar no mês mais quente do ano é superior a 22°.

Esta classificação está de acordo com a de **clima mediterrânico ou subtropical seco** (Trewartha, 1943 *in* Feio, 1991).

Outros factores directamente relacionados com os elementos climáticos influenciam a meteorização das rochas. Torna-se útil realçar o facto das *amplitudes térmicas diurnas e anuais* serem das maiores do país no Alentejo Oriental. No interior, o termómetro sobe frequentemente acima de 40° C no mês mais quente (Julho/Agosto) e a humidade relativa pode ser inferior a 10 %, enquanto que a temperatura no mês mais frio (Janeiro/Fevereiro) pode descer até -6° C. As amplitudes térmicas diurnas podem variar de 17° C no Verão a 9° C no Inverno (Elvas) e, a amplitude anual é em média 21°, à tarde. A forte insolação estival é aqui a razão principal dos contrastes térmicos acentuados que caracterizam este lugar, ao mesmo tempo meridional e continental (Daveau *in* Ribeiro *et al.*, 1988).

O *tipo de precipitação* é caracterizado pela intensidade instantânea, a persistência e a consequente repartição da precipitação, e que resultam em grande parte, da influência do relevo. Os dados obtidos em udómetros, durante décadas, mostram que as chuvas diárias mais copiosas, estão, em geral, ligadas aos relevos regionalmente mais destacados mas,

principalmente através do impacto das massas de ar de origem meridional (Daveau, 1972 *in* Ribeiro *et al.*, 1988). Ao aproximarem-se dos obstáculos orográficos, as massas de ar húmido vindas do Sul, acumulam-se e sofrem uma forte impulsão vertical. Até as baixas colinas da região de Évora, são suficientes para provocar uma recrudescência de chuvas muito fortes. Devido à sua grande capacidade higrométrica, o ar tropical marítimo, originário da região oceânica situada a SW de Portugal, é capaz de provocar verdadeiros “dilúvios” (Daveau *in* Ribeiro *et al.*, 1988).

Mas a **irregularidade do tempo** no território é evidente e, no Alentejo interior, um período de seca longo pode ser interrompido por uma precipitação ocasional, mas forte, o que favorece imenso a erosão, e o transporte dos lixiviados, dos solos, já de si fragilizados por grandes oscilações térmicas.

Os factores locais, designadamente a topografia, a exposição ao sol e aos ventos, a natureza e revestimento do solo, contribuem para a criação dos climas locais (microclimas), por vezes com diferenças apreciáveis entre pontos relativamente próximos. Apesar da escala de estudo na compreensão das diferenciações climáticas, não é possível desprezar a influência dos **microclimas** na evolução da alteração dos maciços pertencentes a esses locais. Destacam-se as formas de relevo, constituídas por montanhas e colinas, cujo clima é significativamente diferente das regiões circunvizinhas. As partes mais elevadas apresentam condições climáticas diversas das registadas nos sopés, com cambiante, em geral, mais atlântica, enquanto os vales mais baixos e abrigados podem apresentar aspectos continentais, próprios da região onde se situa a serra (Daveau *in* Ribeiro *et al.*, 1988). Como exemplo, tem-se o caso da Serra de S. Mamede, cujas encostas, abrigam nas suas imediações, os baixos planaltos do Alto Alentejo, das influências continentais; assim se explica a amplitude térmica relativamente fraca que caracteriza o clima da estação de Portalegre.

3.5 – Aspectos geológicos

3.5.1 – Contexto geológico - estrutural

A região enquadra-se no Maciço Ibérico (MI) ou Hespérico, assim denominado o extenso afloramento de rochas de idade proterozóica e/ou paleozóica que formam parte da ossatura central e ocidental da Península Ibérica (Ribeiro *et al.*, 1979; Silva, 1997). A tendência generalizada para um levantamento regional e/ou erosão observados desde o Pérmico, induziu a uma ausência natural de cobertura sedimentar, situação que se exceptua apenas em algumas bacias sedimentares controladas tectonicamente (Chaminé, 2000).

À escala megascópica é identificada uma zonalidade condicionada pela individualização de sectores com características paleogeográficas, tectónicas, plutónicas e metamórficas distintas, que se dispõem alinhadas segundo direcções estruturais dominantes. A divisão entre as principais zonas é feita por acidentes maiores com continuidade para o ramo Norte do Arco Ibero – Armórico (Silva, 1989; Pereira, 1999).

Situada na parte Nordeste do Alentejo, a área estudada integra maioritariamente a Zona de Ossa Morena (ZOM) e, com menor representação, o Bordo Sudoeste da Zona Centro Ibérica (ZCI), (Fig. 3.4 b). Estas zonas correspondem às unidades geológicas do Soco Hercínico da Península Ibérica, segundo as divisões zoneográficas para ela definidas (Lotze, 1945; Julivert *et al.*, 1974; Ribeiro *et al.*, 1979; Oliveira *et al.*, 1992a), (Fig. 3.4 a). A zona de transição entre

os domínios setentrionais da ZOM e a ZCI caracteriza-se pela existência de três estruturas de importância regional: a Zona de Cisalhamento de Portalegre – Esperança (ZCPE), a Megaestrutura de Crato – Arronches – Campo Maior e a Megaestrutura de Assumar (Pereira, 1999). O limite norte da ZOM faz-se, pois, ao longo de uma importante zona de cisalhamento varisca que afecta a fronteira paleogeográfica meridional do Ordovícico da ZCI transgressivo sobre o soco Precâmbrico da ZOM (Pereira & Silva, 1995; 1997), ao qual se encontram associados fenómenos de magmatismo importantes.

Zona Centro Ibérica – ZCI

Do ponto de vista paleogeográfico, assinala-se, nesta zona, a discordância do Quartzito Armórico (Ordovícico inferior) sobre a sequência de tipo “flysch”, denominada Complexo Xisto-Grauváquico (Proterozóico superior a Câmbrico). Isto implica a presença de uma fase de deformação sarda que é, no entanto, de natureza epirogénica (Ribeiro *et al.*, 1979). A Formação do Quartzito Armórico, que no bordo Sudoeste da ZCI (Fig. 3.4 a), também é conhecido por Formação da Serra do Brejo (Cooper *et al.*, 1982), é constituída essencialmente por quartzitos e siltitos com intercalações arcósicas e conglomeráticas na base (Oliveira *et al.*, 1992b). A ocorrência de arcoses na base da sucessão, nomeadamente em Fortios e Castelo de Vide, sugere a proximidade de regiões graníticas em fase de erosão (Pereira, 1991). À Serra de S. Mamede, incluída simultaneamente no bordo SW da ZCI e na zona NE da região estudada, corresponde o sinclinal com o mesmo nome, de que se destacam na paisagem, as cristas quartzíticas de Marvão e Sr.^a da Penha, pertencentes ao Quartzito Armórico, aqui bem representado. A este sobrepõe-se, estratigraficamente, uma sequência xistenta do Silúrico, constituída por xistos grafitosos e liditos (Oliveira *et al.*, 1992b); seguida por uma formação de idade devónica, em que constam calcários dolomíticos, xistos argilosos e arenitos. Toda esta sequência litoestratigráfica assenta discordantemente sobre o Grupo das Beiras do Complexo Xisto-Grauváquico (xistos negros ou acinzentados argilosos com bancadas gresosas e grauvacóides), que aflora em grande escala a norte do Maciço granítico de Nisa, circundando o Maciço granítico de Gavião (Fig. 3.5). A orla de contacto do CXG com o Maciço granítico de Nisa, compreende, externamente, uma faixa de xistos mosqueados, e na zona de metamorfismo mais intenso, corneanas pelíticas e quartzpelíticas (Ribeiro *et al.*, 1965; Fernandes *et al.*, 1973).

Na ZCI o metamorfismo regional é plurifacial, intimamente ligado ao nível das intrusões granítóides (Ribeiro *et al.*, 1979). O plutonismo representado por granítóides inclui três grupos principais de corpos intrusivos: i) ante-orogénicos, associados ao estiramento do soco Precâmbrico e à génesis das bacias centro-ibéricas no Paleozóico inferior; ii) sinorogénicos; iii) tardi-orogénicos, relativamente à formação da cadeia Varisca (Ferreira *et al.*, 1987). Existem condicionantes tectónicas próprias da ZCI, que imprimem um cunho particular à tipologia dos granitos: a existência de suturas pré-hercínicas, resultantes da evolução do Fosso Centro-Ibérico e, de suturas hercínicas profundas, condicionaram a distribuição espacial de grandes massas granítóides (Begonha, 1989). O magmatismo sinorogénico da ZCI compreende sobretudo granítóides da série alcalina e da série calco-alcalina (secção 3.5.2.2), estando as rochas básicas muito subordinadas (Ribeiro *et al.*, 1979). O plutonismo granítico do Paleozóico inferior é relativamente escasso em Portugal, comparado com o período orogénico que se lhe seguiu (Pinto *et al.*, 1987). Na ZCI, este tipo de plutonismo ocorreu preferencialmente em alinhamentos situados nos seus bordos S e W (secção 3.5.2.1), embora alguns granitos gnáissicos e ortognaisses considerados deste período sejam visíveis em pontos mais afastados do seu limite com a ZOM (Ferreira *et al.*, 1987).

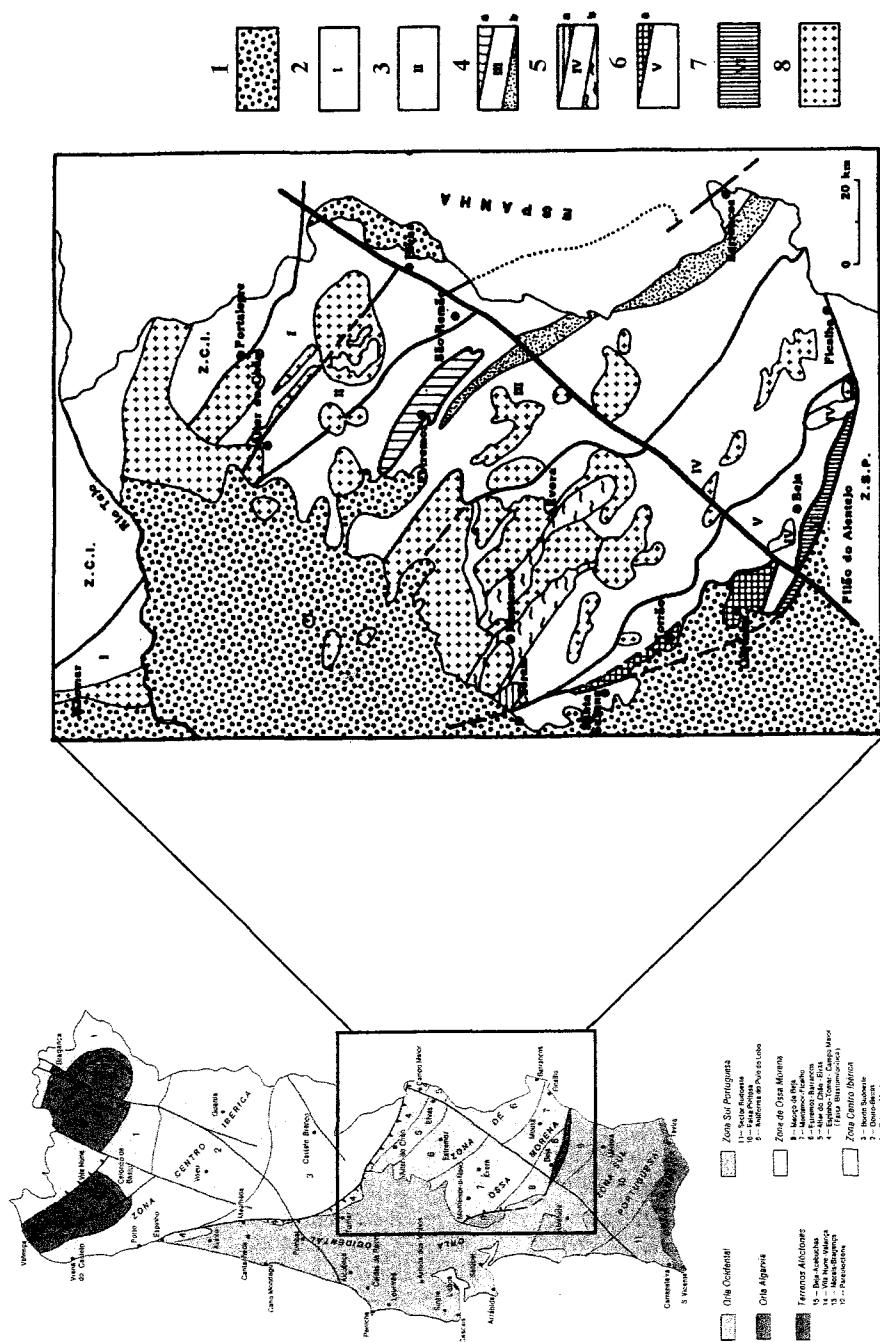


Figura 3.4 - a) Unidades tectono-estratigráficas do território português (adaptado de Oliveira *et al.*, 1992a). b) Subdivisão da ZOM em domínios segundo Oliveira *et al.* (1991): 1 – Cobertura sedimentar terciária; 2 – Faixa Blastomilonítica; 3 – Sector de Alter do Chão - Elvas; 4 – Sector de Estremoz - Barrancos, (a - Anticlinal de Estremoz e b - Sinclinal de Terena); 5 – Sector de Montemor - Ficalho, (a - Sinclinal de Cabrela e b - Séries proterozóicas migmatizadas); 6 – Maciço de Beja (a- Sub-sector de Santa Suzana - Cdivelas); 7 – Ofiolito de Beja - Acebuches; 8 – Granitoídes indiferenciados.

Zona de Ossa Morena – ZOM

Na ZOM foram definidas diferentes subdivisões, já que é possível individualizar sectores com registo estratigráfico, magmatismo, e metamorfismo peculiares (Apalategui *et al.*, 1990; Oliveira *et al.*, 1991). De forma a permitir uma visão global das variações laterais de fácies desta extensa e complexa unidade geoestrutural, é vantajoso abordar a ZOM no contexto desses domínios tectono-estratigráficos (Fig. 3.4 a). Assim tem-se de Norte para Sul:

Faixa Blastomilonítica (4) – Este domínio com orientação NW – SE, fica situado no bordo setentrional da ZOM junto do limite com a ZCI. É sobretudo caracterizado pela presença de formações metamórficas, extremamente deformadas, sob condições de médio a alto grau de metamorfismo, constituídas essencialmente por rochas gnáissicas derivadas de rochas vulcânicas e anfibolitos (Quesada *et al.*, 1990). Múltiplos acidentes de componente cisalhante e cavalgante afectam estas formações proterozóicas, sendo por vezes acompanhadas de rochas hiperalcalinas e maciços granítóides, como por exemplo o “Granito de Portalegre” (Oliveira *et al.*, 1991). Fazem parte da sequência estratigráfica deste domínio: **i) Formação de Campo Maior** (Oliveira *et al.*, 1991); **ii) Série negra** (Gonçalves, 1971; Gonçalves & Fernandes, 1973; Ribeiro *et al.*, 1979); **iii) Formação de Urra** (Gonçalves & Fernandes, 1973), (Fig. 3.5).

Alter do Chão – Elvas (5) – O limite norte deste domínio com a Faixa Blastomilonítica faz-se através do cavalgamento de Alter do Chão, enquanto que o seu limite sul corresponde ao carreamento da Juromenha (Araújo, 1995). Entre as formações aflorantes, de idade câmbrica inferior – câmbrica média (Gonçalves, 1981/82; Oliveira *et al.*, 1991), destacam-se: **i) Formação Carbonatada**, predominantemente dolomítica (Carvalho & Carvalhosa, 1982; Oliveira *et al.*, 1991, 1992b), tendo sido a área aflorante parcialmente ocupada pelo complexo plutónico de Alter do Chão, estando por isso, as rochas em grande parte transformadas em corneanas cárnicas (Gonçalves & Fernandes, 1973); **ii) Formação de Vila Boim**, constituída, essencialmente, por uma alternância de arenitos, xistos e grauvaques do tipo “flysch” (Gonçalves, 1971; Oliveira *et al.*, 1991); **iii) Complexo Vulcano-Sedimentar de Terrugem**, constituído por uma sequência terrígena de xistos, psamitos, grauvaques, siltitos e raros carbonatos, que têm intercalados vulcanitos ácidos traquíticos e micro-graníticos, basaltos alcalinos e rochas peralcalinas extrusivas (Gonçalves, 1978; Oliveira *et al.*, 1992b; Ribeiro *et al.*, 1992); **iv) Formação de Fatuquedo**, com xistos, grauvaques, arenitos e conglomerados (Oliveira *et al.*, 1992b). Segundo Araújo (1995), as formações pertencentes a este domínio apresentam grau metamórfico baixo. No entanto, verifica-se que intrusões de rochas granítóides (maciços de St.ª Eulália, Fronteira e Crato) originam nas formações metassedimentares orlas de metamorfismo de contacto, representadas por corneanas diversas (pelíticas, quárzicas e cárnicas) e xistos mosqueados (Gonçalves *et al.*, 1975).

Estremoz – Barrancos (6) – Neste sector, limitado a norte pelo carreamento da Juromenha e a sul pelo carreamento de St.º Aleixo da Restauração, justifica-se a individualização de um subdomínio, correspondente ao **Anticlinal de Estremoz**, com base em critérios fundamentalmente paleogeográficos (Oliveira *et al.*, 1991; Araújo, 1995). Deste fazem parte: i) Formação de Mares (Proterozóico sup.); ii) Formação dolomítica (Câmbrico inf.); iii) Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonatado de Estremoz (Ordovícico); iv) Xistos Negros do Silúrico (Oliveira *et al.*, 1992b), cuja litoestratigrafia se pode observar na legenda da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 500 000 (Fig. 3.5).

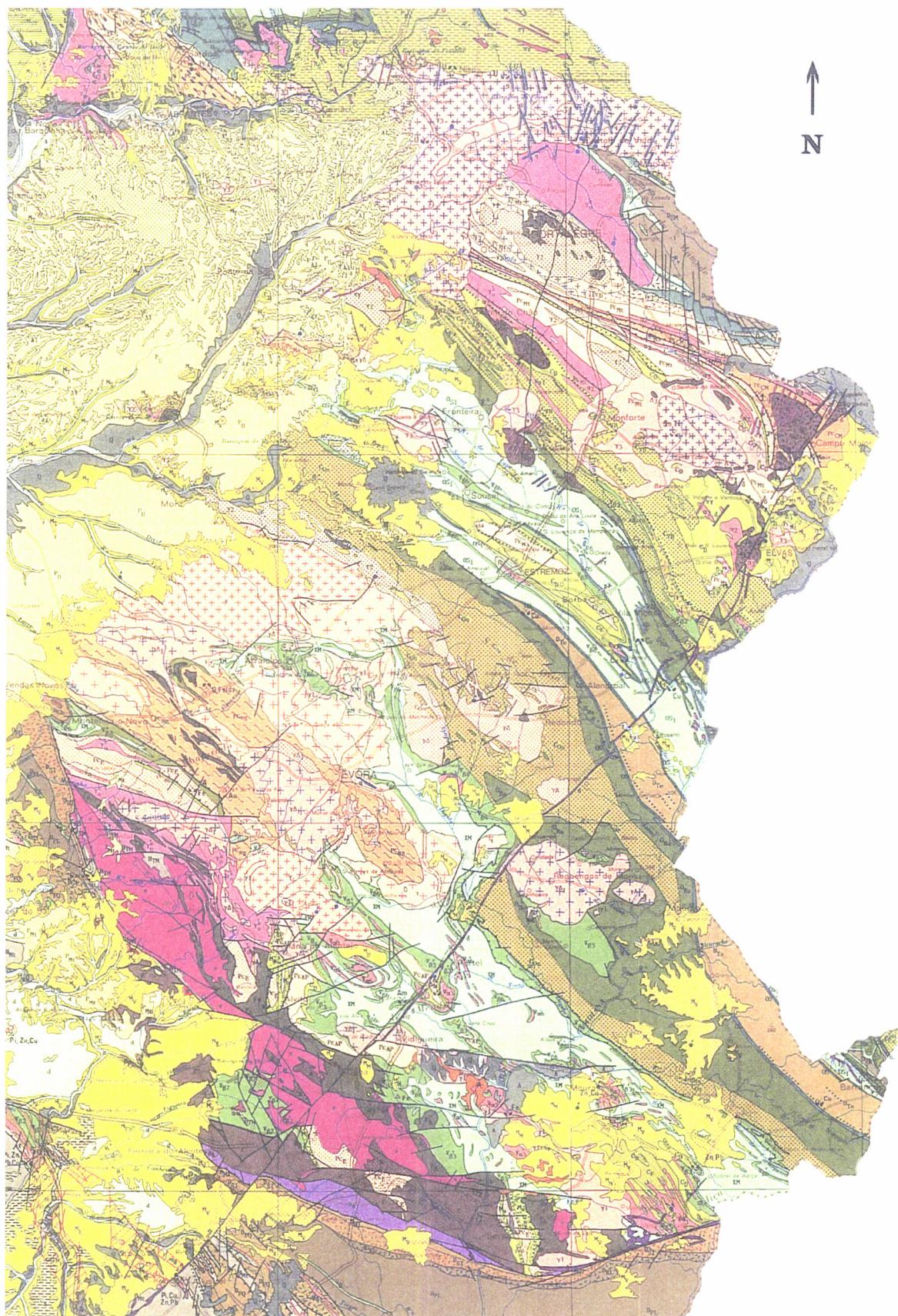
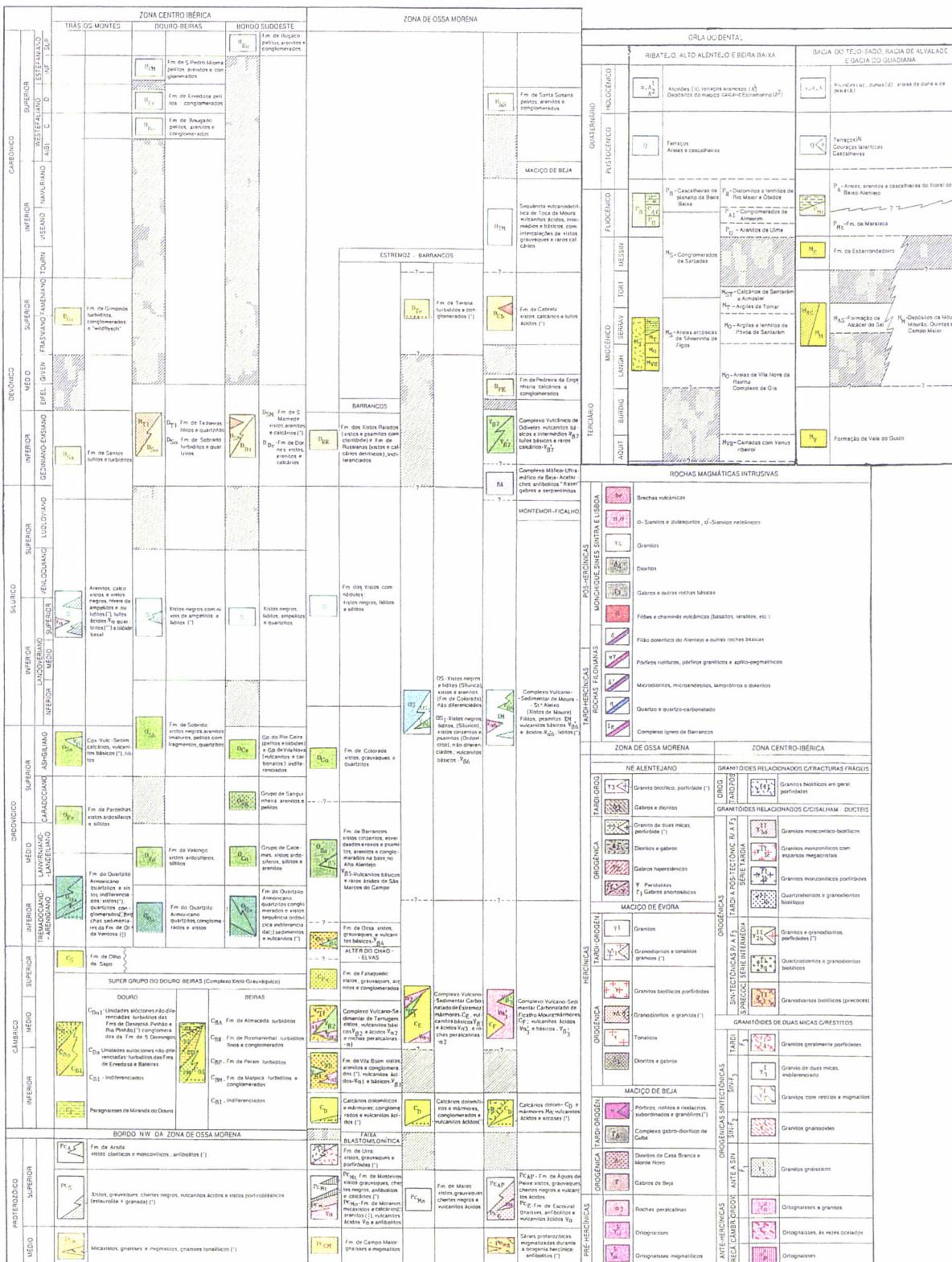


Figura 3.5 – Enquadramento geológico dos maciços granítóides em estudo, à escala 1/ 900 000 (excerto da Carta Geológica de Portugal; Oliveira *et al.*, 1992a).

LEGENDA:



A seguir descreve-se, muito sucintamente, a sucessão litoestratigráfica correspondente ao sector Estremoz – Barrancos: **i) Formação de Ossa**, a mais antiga, é constituída por uma série de xistos e psamitos, tornando-se em direcção a NW (Serra de Ossa), mais rica em grauvaques (Oliveira *et al.*, 1991, 1992b); **ii) Formação de Barrancos** – composta por xistos roxos, finos, micáceos e, xistos cinzento esverdeados (Oliveira *et al.*, 1991; Araújo, 1995); para leste, os xistos verdes, são atingidos por metamorfismo de contacto pelo maciço granítico de St.^a Eulália que aflora nas proximidades, derivando em alguns locais, em corneanas e xistos mosqueados (Gonçalves & Coelho, 1974); **iii) Formação de Colorada**, constituída principalmente, por arenitos, psamitos micáceos, quartzitos, siltitos e pelitos do Ordovícico médio – Silúrico inferior (Oliveira *et al.*, 1991, 1992b); **iv) Formação de Xistos com nódulos** (Silúrico), xistos negros carbonosos, lítitos e siltitos; **v) Formação de Xistos Raiados** (Devónico inf.), alternâncias milimétricas de xistos e psamitos laminados; **vi) Formação de Xistos de Russianas** (Devónico inf.), xistos e calcários detriticos, indiferenciados; **vii) Formação de Terena** (Devónico sup.), aflora ao longo de um extenso sinclinal com orientação NW-SE, e é constituído, principalmente, por uma sucessão turbidítica, tipo “flysch”, e intercalações de conglomerados (Oliveira *et al.*, 1991; 1992b).

As intrusões de rochas granítóides (maciços de Ervedal, Fronteira, Redondo e Reguengos de Monsaraz), produzem orlas de metamorfismo, com formação de corneanas e xistos mosqueados, nalguns pontos cobertos por depósitos recentes (Gonçalves *et al.*, 1975).

Montemor – Ficalho (7) – A este sector corresponde a seguinte sequência litoestratigráfica simplificada: **i) Séries Proterozóicas Migmatizadas** durante a orogenia hercínica que afloram nas imediações dos maciços de Évora e Montemor-o-Novo; **ii) Formação do Escoural** (Proterozóico sup.), englobando gnaisses, anfíbolitos e metavulvanitos ácidos, aflorantes junto ao granodiorito do Escoural; **iii) Formação de Águas de Peixes** (Proterozóico sup.), com xistos negros e grauvaques (nos anticlinais de Viana – Alvito, Portel, Vidigueira); **iv) Formação Dolomítica** (Câmbrico inf.), com calcários dolomíticos, mármores, vulcanitos ácidos e arcoses (junto a Viana do Alentejo e Serpa); **v) Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonatado de Moura – Ficalho** (Câmbrico méd. a sup.), metavulcanitos ácidos e básicos, aos quais se associam sedimentos carbonatados e mármores; **vi) Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura – St.^o Aleixo (Xistos de Moura)**, (Ordovícico sup. – Silúrico inf.) formado maioritariamente por xistos luzentes, filitos e psamitos, lítitos e vulcanitos básicos e ácidos (Oliveira *et al.*, 1991; 1992b).

É notório, pelas formações aflorantes no campo, que o domínio de Montemor – Ficalho se encontra muito mais deformado e metamorfizado que o de Estremoz – Barrancos. O sector de Montemor – Ficalho é o mais extenso da ZOM e no qual se inserem grande parte dos maciços granítóides, que neste estudo se designam genericamente por maciços de Évora, Arraiolos, Vimieiro, Montemor-o-Novo; estando o maciço da Vidigueira cortado pela grande falha do Alentejo (NE-SW), a sudeste da qual se encontra o maciço granítico mais a sul de Portugal – o granito de Pias (Fig. 3.5).

O sector mais meridional da ZOM designa-se por **Maciço de Beja (8)** e contacta a SW os sectores que enquadram os granítóides envolvidos neste estudo. Trata-se de um complexo plutónico-vulcânico, com mais de 100 Km de comprimento, de forma alongada e arqueada, entre Vendas Novas e Serpa (Figuras 3.4 e 3.5). O limite entre a ZOM e a ZSP (Zona Sul Portuguesa) é considerado por muitos autores o cavalgamento de Ficalho. O Maciço de Beja não inclui nenhuma mancha de solo residual granítico (s.l.), pelo que se dispensa a sua

descrição neste estudo. No entanto, destaca-se no maciço, a parte básica, ou seja, o Complexo Gabro-Diorítico de Beja e, a parte ácida, formada pelos Pórfiros de Baleizão – Alcáçovas.

Quanto ao magmatismo sinorogénico da ZOM, o qual se encontra intimamente associado à tectónica, estratigrafia e metamorfismo, verifica-se a existência de aspectos muito particulares que o distinguem consideravelmente das zonas vizinhas do Maciço Ibérico (Ribeiro *et al.*, 1979; Carretero *et al.*, 1990). Nesta zona as rochas graníticas (s.l.) constituem maciços, de forma geral, orientados segundo NW-SE, com alongamento paralelo às estruturas hercínicas (Gonçalves, 1971; Carretero *et al.*, 1990). Estes corpos ígneos ácidos, globalmente designados por granitóides, abundam a NE da ZOM, preferencialmente instalados em formações da Faixa Blastomilonítica, (Fig. 3.4), de composição mais alcalina, onde existe uma zona de transição para a ZCI; mais para SW salientam-se as grandes extensões de rochas de composição calcocalcina, (tonalitos, granodioritos e granitos, principalmente dos maciços de Évora, Arraiolos, Vimieiro, Redondo e Reguengos de Monsaraz); no extremo sul da ZOM, predominam as intrusões básicas (gabros e dioritos), (Ribeiro *et al.*, 1979; Silva, 1989).

Depósitos de cobertura

Na região seleccionada, são algumas as formações cenozóicas que contactam, servindo de cobertura parcial, os corpos intrusivos identificados. Salientam-se os conglomerados, arenitos, areias e argilas do Pliocénico, da Beira Baixa, (Zbyszewski *et al.*, 1981), que cobrem a oeste a grande mancha granítica do maciço de Nisa (Fig. 3.5). Mais para sul destaca-se a Formação terciária do Vale do Guizo, pertencente à Bacia do Tejo e Guadiana (Carta Geológica de Portugal, na escala 1:500 000), e que bordeja a oeste da região estudada, as formações da ZOM, cobrindo parcialmente alguns maciços granitóides, tais como o de Montemor-o-Novo, Vimieiro, Ervedal, Fronteira e, Aldeia da Mata, no bordo SW do maciço de Nisa, e ainda parte do complexo granitoide de Elvas. Nesta formação predominam as cascalheiras e arenitos argilosos com calhaus mal rolados (Zbyszewski *et al.*, 1980; Gonçalves *et al.*, 1970). É de assinalar que, na dependência dos maciços graníticos, ocorrem, por vezes, sedimentos detriticos de carácter arcósico.

Por sua vez os Depósitos de Moura, Mourão e Campo Maior, cobrem parcialmente os maciços granitóides situados a SE, como o de Pias e Reguengos de Monsaraz. Trata-se de um complexo de idade miocénica, formado pelo conjunto de três níveis estratigráficos concordantes, petrográficamente distintos, que são do topo para a base: i) Calcários lacustres esbranquiçados; ii) Depósitos detriticos grosseiros, com arenitos de grão grosso e cimento argiloso intercalado com lenticulas conglomeráticas de tonalidade avermelhada; iii) Arenitos de grão fino, com cimento argilo-margoso e tonalidades esverdeadas e amareladas (Carvalhosa *et al.*, 1970).

Os depósitos quaternários ocorrem sob forma de aluviões em pequenas manchas dispersas nos rios e ribeiras que drenam a região e, são constituídos, na sua maioria, por cascalheiras, saibros, e areias de diferentes calibres mais ou menos argilosas (Carvalho & Carvalhosa, 1982). Os depósitos pliocénicos, são muito reduzidos e geralmente de origem torrencial (provenientes da erosão de depósitos miocénicos e pliocénicos). Constituem terraços fluviais, na sua maioria, nas imediações dos rios Guadiana, Caia e afluentes do Tejo; são formados, principalmente, por cascalheiras, seixos mal rolados e areias argilosas, podendo estar

associado algum saibro (Carvalho & Carvalhosa, 1982). A composição petrográfica dos seixos é diferente, de acordo com a natureza do substrato local.

3.5.2 – As rochas graníticas (s.l.) a sul do Tejo

As rochas ígneas de composição ácida e intermédia ocupam larga extensão no território português, incluindo a província do Alentejo. São rochas, em grande parte, intrusivas nas formações precâmbricas e paleozóicas, muitas vezes, discordantes (Teixeira & Gonçalves, 1980). Quanto à natureza petrográfica, distinguem-se dois tipos: granitos alcalinos e, granitos e rochas afins de natureza calco-alcalina (Capdevilla *et al.*, 1973; Ribeiro *et al.*, 1979; Teixeira & Gonçalves, 1980; Ribeiro, 1984).

As diferentes mineralogias dos granitóides resultam, sobretudo, das quantidades relativas dos minerais constituintes: quartzo, feldspato potássico, plagioclase e micas, e também, do tipo de plagioclase e feldspato potássico. A presença de plagioclase com maior ou menor percentagem de molécula albítica e de diferentes quantitativos de quartzo está essencialmente ligada ao quimismo e ao processo de consolidação do magma (Begonha, 1989). Nos granitos, o quantitativo de feldspatos alcalinos (feldspatos potássicos e albite) é superior ao da plagioclase mais cállica (feldspato alcalino $> 1/3$ feldspato total) mas nos granodioritos e tonalitos o feldspato dominante é a plagioclase mais cállica (feldspato alcalino $< 1/3$ feldspato total).

No que respeita à textura dos granitóides, verifica-se estar relacionada com o tipo e dimensão dos plutões. Como é sabido, em plutões graníticos de dimensão mais reduzida há uma tendência para predominarem texturas de grão mais fino, enquanto em plutões de dimensões maiores o tamanho dos grãos é maior. Por seu turno, o tamanho dos maciços depende dos períodos de deformação tectónica existentes na altura da sua implantação. Fases de descompressão facilitam, normalmente, a intrusão de plutões maiores, cujo arrefecimento é mais lento, ocorrendo o inverso quando a implantação se dá em fase de compressão da crista (Begonha, 1989).

Já no que se refere à génese dos granitóides em geral, não existe, actualmente, consenso. Desta forma, são propostas na bibliografia da especialidade, diversos modelos e classificações incluídas em trabalhos, tais como: Mundry (1968); Oen (1970); Clark (1970); Albuquerque (1971, 1978); Capdevilla *et al.* (1973); Ribeiro *et al.* (1979); Pitcher (1979); Priem *et al.* (1970, 1982); Pinto (1979, 1983); Ribeiro, 1984; Neiva (1981, 1983, 1984, 1985, 1987); Pereira (1987); Ferreira *et al.* (1987); Pinto *et al.* (1987); Carretero *et al.* (1990). Também subsiste alguma controvérsia relativamente à idade (período de instalação) dos granitóides. Os dados geocronológicos correspondentes a diversos granitóides do Maciço Hespérico, (baseados quer em estudos geoquímicos ou mineralógicos, critérios estruturais, observações de campo, ou por processos radiométricos - geocronologia isotópica), são apresentados por autores como: Neiva (1944); Teixeira (1945, 1978); Schermerhorn (1956); Oen (1958, 1970); Sluijk (1963); Boorder (1965); Mendes (1967/1968); Priem *et al.* (1970); Ribeiro (1974); Pinto (1979); Ribeiro *et al.* (1979); Pinto *et al.* (1987).

Das diferentes terminologias usadas para classificar os granitóides, uma das mais utilizadas é o posicionamento da idade de implantação dos corpos intrusivos relativamente à orogenia hercínica. Assim, neste trabalho, adoptou-se, simplesmente, as designações de granitóides: i) ante-hercínicos; ii) hercínicos e iii) tardi-hercínicos.

3.5.2.1 – Granitos ante-hercínicos

Os granitos anteriores ao ciclo de orogenia hercínica ou varisca, (pré-orogénicos – Ferreira *et al.*, 1987), envolvem um conjunto de rochas com diferenças de composição, de génesis e de período de instalação (Carretero *et al.*, 1990) e podem ser reconhecidos, considerando essencialmente as suas relações geométricas, texturais e mineralógicas (Ferreira *et al.*, 1987). A instalação das rochas graníticas ante-hercínicas parece estar relacionada com a fase sarda da orogenia caledónica (Teixeira, 1978; Teixeira & Gonçalves, 1980). O plutonismo granítico ante-hercínico desenvolveu-se preferencialmente nas imediações da zona de sutura entre a ZCI e ZOM (Ferreira *et al.*, 1987; Pinto *et al.*, 1987; Ribeiro *et al.*, 1992).

Dentro da região estudada, o conjunto de rochas conhecidas pela designação “Granitos tectonizados de Portalegre” (Gonçalves, 1971; Fernandes *et al.*, 1973; Gonçalves *et al.*, 1973), aflora ao longo de uma extensa área, localizado na Faixa Blastomilonítica, sendo o único anterior à orogenia hercínica. Este maciço forma uma mancha de grandes dimensões que, provavelmente, ainda se prolongará sob os depósitos terciários situados no bordo NE do granito de Nisa que o intruiu (Ribeiro *et al.*, 1992), (Fig. 3.5). A tectonização dos granitos relaciona-se com a fase principal da orogenia hercínica (Teixeira e Gonçalves, 1980), de que resultou a gnaissificação deste, às vezes milonitização (Gonçalves, 1971; Teixeira, 1978, 1981; Chacón, 1974 *in* Carretero *et al.*, 1990).

Estas rochas pré-hercínicas inserem-se neste trabalho porque, para além de derivarem de granitos cuja composição mineralógica mantiveram, embora apresentem aspectos gnáissicos ou de transição, apresentam espessuras de solos residuais consideráveis (secção 3.6). Com base no seu aspecto estrutural e recristalizações, Fernandes *et al.* (1973), classificaram-nos a uns como granitos gnaissóides e a outros como ortognaisses. Dentro dos primeiros consta o **Maciço granítico de Portalegre** e os segundos incluem o **Maciço granítico de Carreiras**, assim designados neste estudo.

Ao **Maciço granítico de Portalegre** pertencem rochas de natureza alcalina, porfiróides de grão grosseiro, biotíticas, bastante tectonizadas. Apresentam textura cataclástica, diferindo dos ortognaisses pela deformação dos elementos constituintes da rocha ser mais fraca. Assim os feldspatos ocorrem intensamente caulinizados e sericitizados, mas raramente distorcidos; as biotites apresentam algum estiramento e extensões ondulantes; o quartzo mantém indícios de forte tectonização, ocorrendo fracturado e recristalizado, com fortes extinções ondulantes, frequentemente granulado (Fernandes *et al.*, 1973). Para além deste tipo específico de granito que deu origem ao solo residual estudado (secção 5.15), existem nas imediações variações texturais, constituídas por granitos gnaissóides, não porfiróides, de grão médio a fino, biotíticos, com granodioritos e dioritos associados, da estrutura subvulcânica do Carrascal (Fernandes *et al.*, 1973).

O **Maciço granítico de Carreiras**, abrange os ortognaisses alcalinos, biotíticos, derivados de granitos, porfiróides de grão grosseiro, médio ou fino, e não porfiróides de grão grosseiro a médio e fino. Sendo estes últimos os que produzem maiores quantidades de solos residuais, sobre os quais incidiu o estudo (secção 5.16). Estas rochas constituem o afloramento sobre que assentam os terrenos ordovícicos, a leste (Fig. 3.5). Macroscopicamente têm sempre aspecto orientado, gnáissico, às vezes ocelado, apresentando sempre textura cataclástica (Fernandes *et al.*, 1973). Os minerais essenciais são quartzo, micropertite, microclina, albite, biotite e moscovite; como minerais acessórios aparecem raros cristais de zircão e minerais negros de ferro; os minerais secundários são sericite, caulinite, raramente clorite e alguns

óxidos e hidróxidos de ferro. Os minerais evidenciam aspectos de forte tectonização: o quartzo apresenta extinções ondulantes fortes; os feldspatos mostram-se bastante caulinizados e intensamente sericitizados; a biotite ocorre em pequenos agregados pseudomórficos; a moscovite parece resultar, frequentemente, da moscovitação dos feldspatos e da descoloração das biotites (Fernandes *et al.*, 1973).

3.5.2.2 – Granitos hercínicos

O magmatismo sinorogénico é principalmente constituído por granitóides e algumas rochas mais básicas subordinadas (Ferreira *et al.*, 1987) A distribuição dos maciços graníticos (s.l.) contemporâneos da orogenia hercínica está aproximadamente relacionada com a posição das bacias carbónicas, segundo um alinhamento NW-SE (Carretero *et al.*, 1990). A grande maioria dos granitóides, nomeadamente da região em estudo, estão ligados ao ciclo hercínico. A instalação de grande parte dos granitóides hercínicos no intervalo 275-375 Ma relaciona-se com duas importantes fases de compressão e duas importantes fases de distensão (Pinto *et al.*, 1987). O magmatismo granítóide hercínico teve assim origem na bordadura da ZOM com a ZCI há cerca de 370-380 Ma e ocorreu durante um período de 120 Ma, com carácter pulsante e episódios de actividade ígnea mais importantes. Pinto *et al.* (1987) evidenciam o carácter polifásico e bimodal do plutonismo hercínico na ZOM. A sul do Tejo predominam as associações calco-alcalinas, aumentando o carácter básico à medida que se caminha para a parte meridional da ZOM.

Os granitos da série calco-alcalina são considerados de origem mais profunda que os alcalinos, estes de origem essencialmente crustal e em regime de colisão (Pereira, 1987 *in* Begonha, 1989), enquanto que para os granitóides calco-alcalinos se aceita que são provenientes de diferenciação magmática a partir do manto, provavelmente por fusão seca da base da crosta e mistura de materiais básicos, em geral, sempre associados (Ribeiro, 1983). Assim, os granitos calco-alcalinos, de origem basi ou infracrustal, são por vezes designados por granitos híbridos, e em geral, são de instalação tardia (Capdevilla *et al.*, 1973).

O **Complexo Eruptivo de Nisa** – CEN (Ribeiro *et al.*, 1995), abrange um conjunto de rochas graníticas que afloram, em forma de arco, no topo NE da região estudada, com grande expressão regional (Fig. 3.5). Os corpos ígneos que o integram apresentam alguma variação de fácies e são vulgarmente designados por granitos de Nisa, Gafete, Alpalhão, Quareleiros, Marvão e Aldeia da Mata, entre os mais importantes e, intruem no contacto entre a ZCI e ZOM (Solá *et al.*, 1998). Assim, enquanto o ramo NE intrue em terrenos tipicamente definidos como pertencentes à ZCI (Complexo Xisto-Grauváquico ante-ordovícico), o ramo SW está instalado em terrenos paleozóicos da ZOM (Pereira *et al.*, 1998), envolvendo na parte côncava do arco as rochas graníticas tectonizadas do “Granito de Portalegre”. O CEN metamorfiza todo o encaixante, cortando todos os corredores de cisalhamento, em especial a Zona Porto-Tomar-Badajoz-Cordoba (ZCPTBC), (Moreira, 1994), pelo que se deduz que a sua intrusão se processou na parte final da 3^a fase de deformação hercínica, à qual se ajusta bem a idade média de 295 ± 5 Ma (pelo método K-Ar) das suas moscovites e biotites (Pereira *et al.*, 1998). Desta forma é considerado tardí a pós-orogénico, incluindo esta classificação todos os granitóides que se instalaram no Carbónico terminal e no Pérmico, ainda controlados pela tectónica, mas segundo um modelo diferente do dos granitóides sinorogénicos (Ferreira *et al.*, 1987).

A fácie predominante corresponde ao granito de Nisa (secção 5.17), calco-alcalino, de duas micas, predominantemente biotítico, em geral de grão muito grosseiro e com fenocristais de feldspato. Pode apresentar algumas variações de fácie, de grão menos grosseiro, com fenocristais mais pequenos e mais raros, ou com mais abundância de moscovite (Ribeiro *et al.*, 1965; Fernandes *et al.*, 1973; Gonçalves *et al.*, 1973). Do ponto de vista mineralógico, destacam-se como minerais essenciais: quartzo, oligoclase, albite-oligoclase, albite, microclina-pertite, microclina, biotite e moscovite. Como minerais acessórios possui apatite, zircão, andaluzite, silimanite, cordierite, turmalina, minerais negros de ferro e raramente espinela. Os minerais secundários são a caulinite, sericite, calcite, clorite, esfena, leucoxena, rútilo acidular, pirite, óxidos e hidróxidos de ferro (Fernandes *et al.*, 1973). O quartzo ocorre quase sempre fracturado com extinção ondulante, por vezes acentuada. Os feldspatos encontram-se geralmente caulinizados e sericitizados. A biotite altera-se muitas vezes para clorite, com exsudação de rútilo acidular e de esfena; habitualmente apresenta halos pleocróicos envolvendo cristais de zircão, de apatite ou pontuações negras. A moscovite, geralmente de origem metassomática, resulta da alteração dos feldspatos, da andaluzite, e mesmo da biotite (Ribeiro *et al.*, 1965; Fernandes *et al.*, 1973).

Os granitos de Gáfete e Alpalhão, definem um alinhamento interno no CEN, suavemente arqueado e grosseiramente orientado NE-SW (Fig. 3.5), ocupando o segundo, com várias manchas isoladas, o núcleo desta estrutura (Moreira, 1994; Ribeiro *et al.*, 1995). O granito de Gáfete é alcalino, bastante homogéneo do ponto de vista textural, de cor clara, de granularidade fina a média, rico em moscovite. Ao microscópio apresenta como minerais essenciais: quartzo, microclina, microclina-pertite, albite, albite-oligoclase, oligoclase, moscovite e biotite. Os minerais acessórios são: apatite, zircão, esfena, minerais de ferro negros e rútilo acidular. Entre os minerais secundários constam: caulinite, sericite, calcite, clorite, esfena, minerais do grupo do epídoto, óxidos e hidróxidos de ferro. Os feldspatos ocorrem caulinizados e sericitizados, sendo a moscovitização, por vezes, intensa, e a cloritização das biotites varia de fraca a intensa (Fernandes *et al.*, 1973).

O granito de Alpalhão, constitui uma fácie bastante homogénea, de granularidade fina, biotítica (Ribeiro *et al.*, 1995; Solá *et al.*, 1998). Trata-se de um granito alcalino, por vezes com tendência monzonítica, onde se encontram instaladas várias pedreiras para exploração de rocha ornamental. Como minerais essenciais contém quartzo, albite-oligoclase, albite, microclina, biotite e moscovite. Entre os minerais acessórios identificam-se andaluzite, zircão, apatite, silimanite e turmalina. Como minerais secundários observa-se caulinite, sericite, clorite, esfena e rútilo acidular. Os feldspatos ocorrem sempre alterados, predominando a caulinização (bastante intensa) em relação à sericitização e à moscovitização (Fernandes *et al.*, 1973).

O granito de Marvão aflora no extremo NE do CEN, e contacta com os terrenos paleozóicos do sinclinal de Portalegre, que metamorfiza (Perdigão *et al.*, 1976). Trata-se de um granito calco-alcalino de grão grosseiro, com grandes fenocristais de feldspato, de duas micas, sendo estas predominantemente biotíticas. A composição mineralógica é semelhante à do granito de Nisa (Perdigão *et al.*, 1976) e do ponto de vista químico também é muito próximo deste (Ribeiro *et al.*, 1995; Solá *et al.*, 1998; Duarte *et al.*, 2000). De salientar que os feldspatos potássicos ocorrem muito caulinizados e um tanto sericitizados. Nas plagioclases, também muito alteradas, predomina a sericitização e, raramente, podem dar origem à calcite. A biotite apresenta halos pleocróicos, escuros, envolvendo cristais de zircão (Perdigão *et al.*, 1976).

No extremo NW da região estudada, na margem esquerda do rio Tejo, aflora uma mancha granítica de pequenas dimensões, o *Maciço granítico do Gavião* (secção 5.14). Na verdade, estas rochas fazem parte do maciço granítico de Belver-Gavião que se implantou nas formações xisto-grauváquicas ante-ordovícicas, sendo os contactos com os terrenos encaixantes, na maior parte, de natureza mecânica (Zbyszewski *et al.*, 1981), aflorando o granito de Belver na outra margem do rio Tejo, já fora da área abrangida por este estudo. Estas rochas de natureza calco-alcalina, apresentam quase sempre textura gnáissica, porque sofreram forte cataclase. A deformação dos cristais é bastante pronunciada, dando origem a fracturação, torsão, alguma granulação e extinção ondulante. A foliação tem orientação equivalente à xistosidade regional hercínica, (Zbyszewski *et al.*, 1981).

Este maciço é constituído por granitos de grão médio, de duas micas, predominantemente moscovíticas. Ao microscópio estão presentes: quartzo, microclina-pertite, plagioclase (albite-oligoclase e oligoclase), moscovite e biotite. Acessoriamente, ocorrem a apatite, zircão, rútilo, clorite, sericite e minério opaco. A presença comum de fenoclastos de feldspatos associados a grãos de quartzo, está possivelmente relacionada com a heterogeneidade da granularidade da rocha (Zbyszewski *et al.*, 1981). A composição química deste granito é referenciada na secção 4.2, assim como as composições de outras rochas, analisadas neste estudo, pertencentes aos restantes maciços rochosos.

*

A interceptar os três domínios mais setentrionais da ZOM, destacam-se os maciços graníticos de estrutura concêntrica de St^a. Eulália, Fronteira e Ervedal, segundo alinhamento tectónico E – W (Gonçalves, 1971). Os três maciços circunscritos e alóctones, possuem características comuns, o que leva a pensar que são contemporâneos, e que possuem história genética e modo de implantação semelhantes (Gonçalves & Coelho, 1970; Palácios, 1976). Utilizando a geocronologia absoluta (método do Rb/Sr), foi atribuída ao granito de St^a. Eulália, a idade de 281 ± 12 Ma (Mendes, 1967/1968), portanto pertencentes a uma fase tardia a pós-hercínica.

O *Maciço granítico de St^a. Eulália* (secção 5.9), é um corpo granitoide, com área aflorante próxima dos 500 Km², grosseiramente elíptico e discordante com as estruturas hercínicas (Gonçalves, 1957; 1958; 1971). O também designado Complexo Plutónico de Monforte - St^a. Eulália (CPMS), intrui formações do Proterozóico e do Paleozóico inferior dos dois domínios mais setentrionais da ZOM: Faixa Blástomilonítica e Sector de Alter do Chão – Elvas (Lopes *et al.*, 1998). A variação radial de fácies que o caracteriza, permite atribuir-lhe a designação de complexo anelar, ainda que a passagem de uns anéis a outros se proceda, muitas vezes, de forma contínua e gradual. O aspecto anelar e simetria bilateral, entre outros fenómenos, evidencia o carácter subvulcânico da intrusão (Gonçalves *et al.*, 1970; 1972; 1975; Gonçalves, 1971; Lopes *et al.*, 1998). Da bordadura para o centro do maciço, podem distinguir-se granitos róseos com textura granular média a grosseira, biotíticos, sucedendo-se um conjunto de granitos cinzentos com tendência monzonítica, que apresentam sucessivamente texturas porfiróide, granular média e granular fina (Oliveira, 1975).

Nos granitos róseos envolventes, de grão médio a grosseiro dominante (do tipo Monforte e Barbacena), verifica-se o predomínio de feldspatos alcalinos em relação às plagioclases. A microclina é abundante, associada ou não a pertite, a ortose é menos abundante. A plagioclase típica é a albite, por vezes, oligoclase-albite, ao contrário dos granitos acinzentados do núcleo do maciço, nos quais a oligoclase predomina. As lamelas de biotite são frequentes, por vezes, parcialmente transformadas em clorite. A cor rosada destes granitos, é devida

fundamentalmente à natureza das inclusões de hematite e outros óxidos de ferro presentes nos cristais de feldspato e quartzo (Gonçalves *et al.*, 1972; 1975).

Nos granitos acinzentados, as composições calco-alcalinas predominam. O granito porfiróide de grão médio a fino, biotítico (do tipo St^a. Eulália), apresenta como minerais principais a plagioclase (oligoclase) em cristais euédricos e quase sempre zonados. A microclina, presente em menor quantidade, parece ter resultado de fenómenos tardios de microclinização dos feldspatos preexistentes. A biotite é o mineral máfico mais abundante, parcialmente cloritizada sob a forma da variedade penina. A moscovite também está presente, mas mais escassa.

Devido ao seu interesse económico, existem numerosas pedreiras instaladas no Maciço granítico de St^a. Eulália (Gonçalves, 1971). Entre os diversos trabalhos que contribuíram para o conhecimento do maciço com vista à sua exploração como rocha ornamental, salienta-se: Gonçalves *et al.* (1991, 1992); Lopes & Lopes (1996); Lisboa *et al.* (1997); Lopes & Gonçalves (1997); Lopes *et al.* (1997). A caracterização geoquímica e considerações petrogenéticas aprofundadas constam em Lopes (1989) e Lopes *et al.* (1990; 1998).

O *Maciço granítico de Fronteira*, de menores dimensões (secção 5.12), constituído, essencialmente, por granitos monzoníticos, biotíticos. Circunscrito, pós-tectónico e, intrusivo nos xistos do Câmbrico e Silúrico, originou neles uma orla de metamorfismo de contacto, constituída por xistos mosqueados. A SW, encontra-se coberto, em parte, por depósitos do Paleogénico e Neogénico, indiferenciados (Gonçalves *et al.*, 1975; Palácios, 1976). Epizonal e possivelmente subvulcânico (Gonçalves, 1971), pode ser enquadrado nos granitóides tardios, da série híbrida, gerados por mistura de produtos de anatexia seca de material crustal com magmas básicos (Capdevilla *et al.*, 1973).

O aspecto das rochas é bastante homogéneo em todo o maciço. Trata-se de granitos de grão médio, leucocráticos, biotíticos, com feldspato branco e quartzo abundante. Nalguns locais, especialmente na periferia do maciço, a granularidade torna-se um pouco mais grosseira, atingindo às vezes, ligeiro carácter porfiróide. A composição mineralógica assenta essencialmente em: quartzo, xenomórfico e com extinção ondulante; feldspato potássico, xenomórfico a hipidiomórfico (microclina e pertite); plagioclase (o mineral mais abundante), com zonamento simples ou múltiplo, idiomórfica a hipidiomórfica; biotite idio a hipidiomórfica, permite atribuir certa zonalidade, mais ou menos concêntrica, ao maciço. Os minerais acessórios apresentam-se, em geral, subordinados à biotite com halos, e constituem pequenas inclusões de minerais opacos, zircão e apatite (Palácios, 1976).

As transformações secundárias mais significativas são, a cloritização das biotites e a saussuritização das plagioclases. Assim, a alteração da biotite, que se inicia geralmente ao longo dos planos de clivagem, origina, principalmente, clorite, epídoto, esfena, rútilo acicular e minerais opacos. A alteração muito intensa das plagioclases, que atinge de preferência o núcleo dos cristais, produz minerais argilosos, sericite, epídoto e calcite. A alteração dos feldspatos alcalinos, quando existente, é pouco intensa e atinge de preferência a componente sódica das pertites (Palácios, 1976).

O *Maciço eruptivo de Ervedal*, de forma arredondada (secção 5.13), é intrusivo nos terrenos do Silúrico, (Sector Estremoz-Barrancos da ZOM), (Fig. 3.4 b), a oeste do de Fronteira, e está parcialmente recoberto por sedimentos cenozóicos da bacia terciária do Tejo (Joaquim *et al.*, 1972). Trata-se de um maciço circunscrito, em virtude dos contactos e limites bem definidos,

discordante em relação ao quadro encaixante e auréola de metamorfismo de contacto acentuada. Pequenos satélites destas rochas, dispõem-se em torno do maciço (Gonçalves *et al.*, 1975). Esta formação engloba tipos petrográficos diversificados, desde granitos calco-alcalinos, alcalinos a sub-alcalinos, quartzomonzonitos, sienitos e monzonitos (Joaquim *et al.*, 1972). No entanto, os granitos de grão médio a grosseiro, calco-alcalinos, biotíticos, são as rochas mais abundantes. Do ponto de vista mineralógico, refere-se: o quartzo, que é abundante em cristais de dimensões variadas, com inclusões minúsculas frequentes; a plagioclase, em cristais euédricos, apresenta-se frequentemente zonada; a micropertite e a microclina, são constituintes vulgares nestas rochas, apresentando-se quer em cristais bem desenvolvidos, quer de dimensões aproximadamente iguais às das plagioclases. O único mineral máfico, desta variedade de granitos, é a biotite, em pequenas palhetas cloritizadas, ou não, e que apresenta alguns halos pleocróicos. O estudo microscópico revelou também que os feldspatos se encontravam parcialmente alterados (Joaquim *et al.*, 1972). Na secção 4.2 é apresentada a composição química das amostras analisadas.

O *Maciço granítico de Elvas*, de pequena dimensão (secções 2.1 e 5.10), aflora a leste de Elvas, recortando e metamorfizando, a norte e a oeste, os calcários câmbricos e, a leste, os xistos do Precâmbrico. A sul, está coberto em grande extensão, pelos depósitos cenozoíticos da bacia do Guadiana. Este maciço hercínico estende-se para lá do rio Guadiana, como comprovam sondagens efectuadas em Porto Xico (Gonçalves *et al.*, 1970). Apesar da reduzida dimensão, o maciço apresenta diversidade mineralógica, e textural: granito de grão médio a grosseiro, alcalino, rico em albite; granito com duas micas, granularidade média, com microclina e plagioclase pertitizada; granito cataclástico, moscovítico, com granularidade média a fina, com quartzo, microclina e albite (Gonçalves *et al.*, 1970). Na periferia, onde foram colhidas as amostras de solos residuais, os granitos manifestam tendência calco-alcalina, biotíticos de grão médio a grosseiro, podendo mesmo em certos locais, passar a rochas mesocratas (granodioritos horneblêndicos e biotíticos). O feldspato potássico está ligeiramente pertitizado; a plagioclase (andesina), por vezes, é zonada; existem grandes concentrações de horneblenda e biotite (com ou sem clorite), epídoto e esfena; os óxidos de ferro e apatite são raros (Gonçalves *et al.*, 1970).

Devido ao carácter predominantemente silicioso das formações precâmbricas e paleozóicas encaixantes, as intrusões graníticas, dos maciços referidos anteriormente, originam extensas orlas de metamorfismo de contacto representadas por corneanas de diferente natureza (quárticas, pelíticas, cálcicas e anfibolíticas) e xistos mosqueados (Gonçalves, 1971; Gonçalves *et al.*, 1970; 1975).

*

O *Maciço granítico do Vimieiro* abrange uma área relativamente grande (secções 2.1 e 5.11), de forma alongada, com orientação geral E-W, delimitada aproximadamente pelas povoações de Vimieiro, Pavia, S. Gregório, Gafanhoeira, Brotas, Ciborro e Sabugueiro (Fig. 3.5). Trata-se, geralmente, de granitos grosseiros, porfiróides, biotíticos, de composição calco-alcalina, frequentemente associados a pegmatitos (Zbyszewski *et al.*, 1980). Na sua globalidade, este maciço revela a existência dum a distribuição zonal das fácies petrográficas, assim como das variações químico-mineralógicas e estruturais. Assim a alcalinidade dos granitóides do maciço cresce da periferia para o centro; as rochas de composição tonalítica passam a granitos, por intermédio dos granodioritos (Carvalhosa, 1999). As estruturas hercínicas dos domínios Estremoz-Barrancos e Montemor-Ficalho, da ZOM, são cortados por esta intrusão. Nos seus limites não apresenta auréola de contacto e está quase sempre tectonizado (deformação de tipo ruptura), devido a falhas ou possíveis efeitos de protoclase. Os contactos

a norte, com os gnaisses, e a sul, com várias formações, são de natureza mecânica. Do lado NW são parcialmente cobertos pelos depósitos terciários da bacia do Tejo (Zbyszewski *et al.*, 1980). Quanto à idade destes granitóides, as observações meso e microscópicas mostram claramente, tratar-se de intrusões ante-cinemáticas relativamente à 2^a fase de deformação hercínica (Carvalhosa & Zbyszewski, 1994; Carvalhosa, 1999), o que não está de acordo com os dados geocronológicos que atribuem uma idade de 253-280 Ma, para o granito de Pavia (Mendes, 1967/1968 *in* Zbyszewski *et al.*, 1980).

A principal fácie petrográfica, onde estão instaladas algumas pedreiras (Lopes & Gonçalves, 1997) e que apresenta maiores espessuras de solos residuais, corresponde ao granito de duas micas, predominantemente biotítico, com textura hipidiomórfica granular, por vezes com vestígios de cataclase, com megacristais de feldspato potássico branco ou rosado. O feldspato alcalino é a microclina ou microclina-pertite em cristais sub-automórficos. A plagioclase é a oligoclase cállica, por vezes zonada e envolvida por mirmequite. O quartzo pode originar lâminas de cristais engrenados devido à recristalização posterior à deformação. A moscovite, por vezes, parece substituir a biotite. Esta última é castanha e fortemente pleocróica. Os restantes constituintes presentes são apatite, zircão, sericite, caulino, rútilo, clorite e albite (secundária), (Zbyszewski *et al.*, 1980). A fracturação do maciço é uma constante, principalmente do lado oeste, o que favorece a alteração superficial muito desenvolvida a partir das diaclases para o interior da rocha (Lopes & Gonçalves, 1997).

*

Os maciços eruptivos de Arraiolos, Évora e Montemor-o-Novo, assim designados nesta dissertação, correspondem a um conjunto de rochas, essencialmente de natureza intermédia, que se enquadra no sector Montemor-Ficalho da ZOM (Fig. 3.4 b). São constituídos por diversos afloramentos granitóides, predominantemente quartzodioríticos e granodioríticos, raramente com granitos, ocorrendo estes somente no maciço de Évora. Os corpos ígneos estão distribuídos segundo alinhamentos magmáticos de direcção NW-SE, paralelos às estruturas hercínicas, como é comum na ZOM (Carretero *et al.*, 1990), (Fig. 3.5), são considerados globalmente de idade carbónica (Teixeira, 1978; Carretero *et al.*, 1990) e, foram atingidos na sua maior parte pela 2^a fase de deformação hercínica, pelo que apresentam normalmente alguma gnaissosidade (Carvalhosa, 1983).

O **Maciço eruptivo de Arraiolos** estende-se da região de Arraiolos até perto de Nossa Sr^a de Machede a NE de Évora, numa extensão considerável (secções 2.1 e 5.3), ocorrendo manchas mais pequenas nos arredores de Igrejinha e Évora-Monte (Fig. 3.5). Este maciço é maioritariamente de composição tonalítica, bastante homogéneo na região do Divor, mas noutras regiões (Igrejinha, Azaruja, Évora-Monte), associam-se a granodioritos (“quartzodioritos e granodioritos gnáissicos” *in* Carvalhosa *et al.*, 1987). A fácie mais representativa é o quartzodiorito (tonalito), de grão médio, não porfiróide, com gnaissosidade ligeira patente. São rochas constituídas essencialmente por quartzo, plagioclase (andesina), horneblenda verde e biotite. Acessoriamente encontram-se zircão, esfena, apatite, rútilo, feldspato potássico (intersticial) e mirmequite. O tamanho dos minerais, os teores em anortite e a zonagem das plagioclases, assim como as proporções relativas dos máficos, são susceptíveis de variar grandemente dentro dos maciços. O quartzo, em cristais xenomórficos, apresenta-se com extinção ondulante; a plagioclase (36 - 40 % An), com geminação polissintética, apresenta zonagem frequente. Quanto aos máficos, ressalta-se a existência de anfíbola (em prismas isolados ou agregados); a biotite (em lamelas ou agregados lamelares), podendo estar cloritizada com produção de rútilo e algum epidoto. A fácie granodiorítica é

bastante comum e revela a seguinte associação mineralógica: quartzo, microclina, plagioclase (oligoclase e andesina), biotite, apatite, zircão e opacos (Carvalhosa, 1999).

As rochas dos afloramentos deste maciço encontram-se habitualmente deformadas, com gnaissosidade mais ou menos pronunciada. A cataclase é comum nestas rochas, e parece reforçar o alinhamento original dos minerais; origina extinção ondulante, fragmentação e granulação do quartzo e de algum feldspato; nos máficos produz dissociação e reorientação; as micas tornam-se flexuosas e esfarrapadas (Carvalhosa, 1999).

No *Maciço eruptivo de Évora*, predominam, ao contrário do que se verifica no maciço de Arraiolos, as rochas granítoides sem orientação preferencial dos seus componentes mineralógicos, tendo habitualmente composição granodiorítica, quartzodiorítica e, mais raramente, granítica. Distribuem-se por várias manchas, constituindo vasto maciço, bastante heterogéneo, que se estende desde a mancha de Stª. Sofia a NW, até às manchas de Monte do Trigo e Aguiar a SE (Fig. 3.5). As diversas manchas granítoides são, circunscritas, cortando a xistosidade dos metassedimentos e, às vezes, a foliação dos gnaisses. O alongamento destas manchas é, regra geral, paralelo à direcção da tectónica regional (Carvalhosa *et al.*, 1969).

As rochas pertencentes a este complexo granítóide, têm composição mineralógica e textura variáveis. As rochas de granularidade grosseira parecem ser mais recentes do que as restantes, de grão médio a fino, embora pertencendo todas ao mesmo ciclo de granitização. Os tipos petrográficos identificados constituem uma série de rochas de grande amplitude: quartzodioritos e granodioritos porfiróides de grão grosseiro e médio ou, não porfiróides de grão médio a fino; granito porfiróide de grão grosseiro ou médio (no Barroco) e, não porfiróide de grão fino (em Courela do Matias e Rebaldia), (Carvalhosa *et al.*, 1969).

Do ponto de vista mineralógico, pode dizer-se que nas rochas de natureza quartzodiorítica, um factor constante e dominante é a presença de horneblenda, com ou sem biotite; os feldspatos alcalinos (incipientes nos tonalitos), fazem-se representar por microclina e, mais raramente, por ortoclase nos granitos e granodioritos; as plagioclases variam por ordem decrescente de basicidade, da andesina intermédia (40 % An) até à oligoclase ácida, raramente ocorre albite (Carvalhosa *et al.*, 1969). Segundo estes autores, a variedade petrográfica, pode dever-se a uma microclinização correspondente a uma fase de granitização em que predominam os fenómenos metassomáticos. Estes traduzem-se na substituição por corrosão das plagioclases, na formação de auréolas mirmequíticas, no aparecimento de texturas pecílicas com quartzo goticular, etc. A par com estas transformações é possível encontrar a substituição da horneblenda pela biotite ou moscovite, estando a clorite a substituir, profusamente, a biotite.

O *Maciço eruptivo de Montemor-o-Novo*, consiste num afloramento quartzodiorítico de forma oval (secção 5.4), encaixado nos migmatitos, prolongando-se ainda sob a cobertura terciária da bacia do Tejo a NW e, segundo Carvalhosa (1983), de provável origem anatética. As rochas, devido à deformação sofrida, apresentam lineação e, muitas vezes, foliação. Observações efectuadas no contacto com os metassedimentos, permitiram verificar que a implantação deste maciço eruptivo teve lugar entre as duas fases principais de dobramento hercínico (Carvalhosa *et al.*, 1994).

As rochas tonálicas deste maciço são, fundamentalmente, de grão médio, por vezes grosseiro, sendo a sua textura hipidiomórfica - granular e orientada. Quanto à composição mineralógica destas rochas, predominantemente biotito-horneblêndicas, refere-se: quartzo;

plagioclase (30 – 40 % An) subeuédrica e zonada; biotite pleocróica (podendo substituir a horneblenda) e horneblenda. Acessoriamente, podem conter feldspato potássico, apatite, zircão, esfena, ilmenite e óxidos de ferro. Como produtos de alteração, podem ocorrer epídoto, clorite e sericite (Carvalhosa *et al.*, 1994).

*

Pertencentes ao domínio de Estremoz-Barrancos da ZOM, constam ainda os maciços eruptivos do Redondo e de Reguengos de Monsaraz (Fig. 3.4 b). Na opinião de Carvalhosa *et al.*, (1987), as rochas granítoides da região, atendendo à composição calco-alcalina, associação estreita com rochas básicas, características mineralógicas (e.g. plagioclase zonada) e abundância de encraves, parecem ter origem profunda, talvez, infracrustal.

O *Maciço eruptivo do Redondo* (secções 2.1 e 5.6), está essencialmente representado por dois grandes afloramentos de rochas granodiorítico – quartzdioríticas: a mancha do Redondo, de maiores dimensões, e a NW desta, a mancha de S. Miguel de Machede, com menor representação espacial e de natureza mais básica (Fig. 3.5). Trata-se de maciços intrusivos, alongados e concordantes com as estruturas regionais. Segundo Carvalhosa *et al.* (1987), a instalação do maciço ter-se-ia dado num período interfásico em relação ao pico do metamorfismo, ou seja, sin-F2 a tardi-F2.

Do ponto de vista petrográfico, predominam os granodioritos, passando frequentemente a tonalitos. São rochas de grão médio, com textura hipidiomórfica granular, constituídas essencialmente por: quartzo, em cristais xenomórficos, com extinção ondulante, parcialmente recristalizado em agregados lenticulares paralelos à lineação; plagioclase, subidiomórfica a idiomórfica, zonada, de composição variável desde oligoclase (28 % An) a andesina (34 – 46 % An); biotite, flexuosa; horneblenda e feldspato potássico (microclina, intersticial ou em megablastos). Acessoriamente, ocorrem esfena, apatite, zircão, clorite, sericite, epídoto (resultante da saussuritização da plagioclase), calcite e mineral opaco. Nos tipos mais tonalíticos, a plagioclase é mais cálcea, dando-se simultaneamente, enriquecimento de anfíbola (horneblenda verde), pelo que as rochas podem ser essencialmente biotíticas ou biotito-horneblêndicas (Carvalhosa *et al.*, 1987).

No maciço ocorrem, subordinadamente, diferenciações básicas, dioritos e raramente gabros. As rochas, encontram-se, habitualmente, deformadas, os minerais reorientam-se ou recristalizam parcialmente, conferindo a estes granítoides textura gnáissica mais ou menos orientada.

Relativamente ao *Maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz* e seus satélites, e de acordo com Carvalhosa (1983) e Carvalhosa & Zbyszewski (1991), a intrusão é de idade carbónica, tardi a pós-tectónica, e instalou-se ao nível dos xistos da Formação de Barrancos, dando origem a auréola de metamorfismo de contacto. Ao contrário do maciço do Redondo, as rochas deste maciço não patenteiam deformação significativa, excepto próximo dos contactos, onde adquirem, às vezes, textura gnáissica, devido a cataclase (Carvalhosa, 1967).

Nos afloramentos, os granodioritos estão intimamente associados aos quartzdioritos, sendo frequente a alternância de fácies, dificultando a identificação dos seus limites, no campo. Os granodioritos, de grão médio, com textura hipidiomórfica granular, são constituídos sobretudo por: quartzo; plagioclase (andesina, 32 – 34 % An) em cristais euédricos ou subeuédricos, por vezes, zonados; elementos máficos, horneblenda e biotite, que associadas, podem originar fenocristais; e mais ou menos feldspato potássico. Trata-se de granodioritos horneblendo-

bióticos, que podem conter acessoriamente, mirmequite, apatite, zircão e esfena; como minerais secundários ocorrem a sericite, clorite e epídoto (Carvalhosa & Zbyszewski, 1991). Com o aumento de anfíbola e andesina, estas rochas passam a ter a composição de tonalitos que contêm, principalmente: quartzo, plagioclase intermédia (por vezes zonada), horneblenda comum e biotite. Como minerais acessórios ocorrem apatite, zircão, óxidos de ferro e titânio (Carvalhosa & Zbyszewski, 1991).

O *Maciço eruptivo da Vidigueira* (secção 5.7), é um complexo tardí a pós-hercínico, constituído essencialmente, por quartzodioritos e granodioritos acompanhados, pontualmente por granitos e gabros (Carvalhosa *et al.*, 1972; 1994). O maciço é envolvido por formações precâmbricas, constituídas essencialmente por micaxistas, gnaisses e quartzitos negros (a S e W) e por xistos sericito-cloríticos do Silúrico (a E), (Silva, 1990), pertencentes ao complexo vulcão – sedimentar de Moura (Xistos de Moura) do sector Montemor-Ficalho da ZOM (Figuras 3.4 e 3.5). Este maciço, de forma alongada, é cortado transversal e obliquamente pela importante falha da Vidigueira de orientação E – W e pela grande falha tardí-hercínica do Alentejo (NE – SW), acidentes tectónicos que se julga terem contribuído para a heterogeneidade textural e composicional do maciço (Carvalhosa *et al.*, 1970).

Do ponto de vista petrográfico, o complexo granítóide inclui rochas que vão desde o quartzodiorito de grão médio a fino cinzento escuro, a granodiorito de grão médio cinzento claro, passando por granito de grão médio a grosseiro, por vezes porfiróide, róseo. A composição mineralógica mais frequente é a seguinte: andesina (40 % An), horneblenda verde, biotite e quartzo. Entre os restantes minerais contam-se: oligoclase (25 – 30 % An), feldspato potássico, apatite, zircão, clorite, calcite, esfena, epídoto, sericite, argila caulinítica e óxidos e hidróxidos de ferro. O granodiorito apresenta, essencialmente, a seguinte composição: plagioclase (oligoclase – andesina), micropertite, microclina, quartzo, biotite e horneblenda verde (Carvalhosa *et al.*, 1970). Com o aumento da componente ácida, e a contribuição dos minerais félscicos, nomeadamente feldspato alcalino e quartzo, ocorre o granito, por vezes, róseo. A análise química de uma rocha deste tipo consta na secção 4.2. Considerações químicas e mineralógicas adicionais, relacionadas com rochas deste complexo granítóide, podem ser consultadas em Silva (1990).

Finaliza-se a descrição sumária dos maciços granítóides a sul do Tejo, com o *Maciço granítico de Pias* (secção 5.8), o mais meridional de Portugal. A este maciço, correspondem vários afloramentos graníticos separados entre si pela cobertura de depósitos terciários (Fig. 3.5). Este maciço é alongado, está alinhado com megaestruturas tardias, mas em desarmonia com os terrenos encaixantes, é acompanhado normalmente de auréola de metamorfismo de contacto (Carvalhosa, 1992). Estes granitos, segundo Araújo (1992), seriam sin-F3, porque afloram ao longo de um núcleo de um antiforma suave de 3^a fase, encontrando-se afectados por um sistema de desligamentos com orientação E – W, que se desenvolveu no final desta fase hercínica ou varisca.

O maciço é constituído por granitos de grão médio, essencialmente bióticos, por vezes porfiróides com pequenos fenocristais. A estrutura é hipidiomórfica granular, o quimismo é calco-alcalino, e a composição mineralógica principal é a seguinte: microclina – pertite, oligoclase (20 – 25 % An), quartzo e biotite. Entre os minerais acessórios contam-se: mirmequite, moscovite, apatite, esfena, clorite, sericite, óxidos de ferro e, raramente, turmalina e anfíbola (Carvalhosa *et al.*, 1970).

3.6 – Descrição dos locais de amostragem

O perfil de alteração clássico, desde o solo maduro até à rocha sã, tem sido largamente discutido e submetido a pesquisa minuciosa em muitas partes do mundo (Brand & Phillipson, 1985). No seio de uma camada de solo mais grosso pode haver diferenciação causada pela lixiviação e desidratação. Por outro lado, os perfis de solos residuais mais finos, são tipicamente estruturados num nível essencialmente siltoso, sobrejacente a um horizonte intermédio rico em argila, que geralmente se encontra muito fissurado, apresentando aspecto compartmentado (Carvalho, 1991). A macro-estrutura dos solos residuais varia bastante de local para local, pelo que se torna necessário o adequado registo de cada perfil, baseado em metodologias de descrição disciplinadas, mas possibilitando a anotação das características peculiares.

No que respeita aos solos residuais graníticos (s.l.) do Alentejo, sobre os quais incide este estudo, não se distinguem, nos perfis de alteração, horizontes diferenciados, porque a sua maioria evidencia um significativo controle estrutural, que condiciona o ambiente de meteorização. São as fracturas que ocorrem em direcções aleatórias, e, muitas vezes, segundo direcções aproximadamente ortogonais, que contribuem para a meteorização diferencial da qual resulta, em última análise, e frequentemente, blocos de dimensões consideráveis de rocha sã ou mais ou menos alterada no seio de solo residual. Nos cortes onde não é visível a presença de descontinuidades, a variabilidade, quando notada, das propriedades macroscópicas (cor, textura, fábrica, etc.), verifica-se tanto na horizontal como na vertical. Por outro lado, as singularidades existentes não eram em número e dimensão suficiente, por forma a considerar zonas significativamente heterogéneas dentro do mesmo perfil. Pelas razões expostas, e porque não se detectou anisotropia inerente a estes solos, teve-se a preocupação, na metodologia de amostragem preconizada (Cap. 2), em seleccionar os locais onde a estrutura do maciço se apresentava relativamente homogénea.

Os procedimentos para a descrição dos perfis, têm sido desenvolvidos por uma larga variedade de organizações, e constam nos manuais práticos. Para situações particulares, os métodos podem ser adaptados ou acrescentados consoante os objectivos. Os detalhes para casos específicos podem ser referenciados e mais tarde aprofundados. A metodologia utilizada neste trabalho, não se espera que esteja completa, mas serviu de base de trabalho para a maioria dos casos. Pode ser aumentada ou reduzida consoante o contexto. Assim, para a descrição dos diferentes locais de amostragem, decidiu-se registar os aspectos factuais seguintes:

- N – número da amostra;
- G – localização geográfica exacta, acessos;
- F – formação geológica a que pertence; folha da Carta Geol. de Port. à esc. de 1: 50 000;
- L – tipo litológico de origem; descrição macroscópica da rocha;
- S – solo residual (cor, textura, “*fabric*”, estrutura, consistência, densidade, humidade, etc.);
- P – características do perfil;
- O – espessura do solo orgânico superficial;
- AI – colheita de amostras indeformadas;
- R – colheita de rocha sã e/ou alterada;
- E – profundidade de cravação dos extractores;
- C – execução de ensaios penetrométricos no campo.

Procedeu-se ao registo fotográfico dos 62 locais onde se colheram amostras, mas, por conveniência de espaço, apenas se apresentam imagens dos perfis mais representativos.

3.6.1 – Maciço eruptivo de Évora

N – Amostra nº 1 (Figura 3.6)

G – Monte das Flores; EN 380 Évora – Alcáçovas (Km 91,150); pedreira nº 31 da Carta de Materiais do Distrito de Évora - CMDE (JAE, 1980a).

F – Rochas eruptivas de idade hercínica, tardi-orogénicas; Folha 40-A de Évora.

L – Granodiorito de grão médio, equigranular, cinzento claro; são visíveis grãos de feldspato, predominantemente calco-alcalino, cristais anédricos de quartzo, micas e hornblenda.

S – Areia bem graduada, com silte e algum cascalho, cinzenta; solo ligeiramente plástico, densidade média devido a um bom arrumo dos grãos; solo residual ‘jovem’, apresentando-se pouco lixiviado, pouco friável e humidade relativamente baixa na altura da colheita.

P – No local da colheita, o solo apresenta 7 m de espessura sobrejacente a cerca de 1 m de rocha alterada sobre o maciço rochoso são.

O – Aproximadamente 10 cm de espessura de solo orgânico.

AI – Não foi possível a colheita de amostras indeformadas devido à fraca coesão entre partículas.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – Extractores cravados a 4 m de profundidade.

N – Amostra nº 2

G – Pomarinho; EN 380 Évora – Alcáçovas (Km 87,200); pedreira nº 30 da CMDE.

F – Rochas eruptivas de idade hercínica, tardi-orogénicas; Folha 40-A de Évora.

L – Quartzodiorito de grão médio, de aspecto homogéneo, predominantemente biotítico, cinzento; distinguem-se cristais de quartzo anédricos, plagioclase, biotite e horneblenda; rocha de textura hipidiomórfica granular.

S – Areia bem graduada, com silte e algum cascalho, cinzenta; solo não plástico, densidade média, ligeiramente húmida (perfil virado para Norte) e fácil de colher.

P – Espessura do solo residual inconstante, com um valor máximo de 5 m; a alteração é controlada pelas diaclases; blocos no seio do talude vertical do solo.

O – Aproximadamente 10 cm.

R – Colheita de rocha sã e alterada; a espessura exposta de rocha alterada é de 20-30 cm.

E – Extractores cravados a 3 m de profundidade.

N – Amostra nº 5 (Figura 3.6)

G – Fiúza; EN 114 Montemor-o-Novo - Évora (Km 181,350); pedreira nº 28 da CMDE.

F – Rochas eruptivas de idade hercínica, tardi-orogénicas; Folha 40-A de Évora.

L – Granodiorito de grão médio a fino, biotítico, cinzento; com menos quartzo e mais feldspato que as rochas que deram origem aos solos das amostras 1 e 2.

S – Areia siltosa, cinzenta clara; solo não plástico, de porosidade elevada, friável e muito fácil de colher; pouco húmido.

P – A espessura do solo residual é cerca de 8 m; pouca rocha alterada.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas para os ensaios mecânicos laboratoriais.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – Extractores cravados a 6 m de profundidade.

N – Amostra nº 60 (Figura 3.6)

G – A6–Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Montemor-o-Novo – Évora (Km 12,350).

F – Complexo eruptivo do Maciço de Évora.

L – Quartzodiorito de grão médio a fino, cinzento.

S – Areia grossa siltosa, castanha amarelada; o tom escuro do solo deve-se à presença significativa de minerais ferromagnesianos e à menor quantidade de quartzo e feldspato, relativamente às amostras da mesma mancha.

P – O talude de escavação tem aproximadamente 10 m de espessura de solo residual homogéneo, onde ocorrem, por vezes, blocos de rocha sã envolvidos por uma capa de alteração inferior a 10 cm; a rocha altera-se com facilidade, facto de que resultam espessuras grandes de solo com aspecto homogéneo, com uma certa humidade, mas a transição entre rocha sã e solo residual é rápida, praticamente não existe rocha alterada.

O – Não há solo orgânico, já tinha sido removido; no entanto, na periferia, onde se manteve a topografia original, a sua espessura não ultrapassava os 10-15 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

R – Colheita de rocha sã.

E – 8 m.

N – Amostra nº 61

G – A6–Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Montemor-o-Novo – Évora (Km 15,325).

F – Complexo eruptivo do Maciço de Évora.

L – Granodiorito de grão médio a fino, cinzento, com pouco quartzo.

S – Areia bem graduada com silte, castanha amarelada; solo de grão médio a fino, friável e macio; não plástico e pouco húmido.

P – O talude de escavação apresenta uma espessura de 10 m de solo residual exposta; o material é homogéneo, ocorrendo esporadicamente blocos rochosos arredondados.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

E – 6 m.

N – Amostra nº 62

G – A6–Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Montemor-o-Novo – Évora (Km 16,175).

F – Complexo eruptivo do Maciço de Évora.

L – Granito de grão médio a fino, biotítico, cinzento claro.

S – Areia média siltosa, amarela acinzentada; solo de baixa plasticidade e elevada porosidade, pouco húmido, mas muito fácil de colher.

P – Talude de escavação subvertical com 6 m de espessura de solo residual exposta.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

E – 4 m.

N – Amostra nº 83

G – Barragem de Montenovo; talude de escavação da estrada de acesso à barragem, que intercepta, a 16 Km de Évora, a EN 256 Évora - Reguengos de Monsaraz.

F – Rochas eruptivas granítoides do Maciço de Évora.

L – Quartzodiorito de grão médio, de aspecto homogéneo, biotítico, cinzento escuro, devido à presença de minerais ferromagnesianos.

S – Areia média a fina, siltosa, cinzenta escura; solo de baixa plasticidade, densidade média, friável e muito húmida.

P – Talude de escavação com espessura de 8 m de solo residual por 30 m de largura exposta; o material é homogéneo, ocorrendo esporadicamente descontinuidades ‘reliquia’.

O – Aproximadamente 15 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

E – 5 m.

C – Realizaram-se ensaios penetrométricos: DPL, DPSH e SPT.

N – Amostra nº 87

G – Escoural; escavação a 6 Km na EM 535 no sentido Escoural – S. Cristovão.

F – Rochas eruptivas granítoides do Maciço de Évora.

L – Granodiorito de grão médio, equigranular, cinzento.

S – Areia siltosa, cinzenta acastanhada; solo micáceo, macio, com poucos grãos de quartzo; solo de baixa plasticidade, densidade média e um pouco húmido.

P – Talude de escavação cuja espessura de solo residual varia entre 6 e 8 m; o material é homogéneo relativamente à cor e à textura.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

R – Colheita de rocha sã.

E – 4 m.

N – Amostra nº 88

G – Aguiar; EN 254 Évora – Viana do Alentejo (Km 73,400); saibreira nº 44 da CMDE.

F – Granito calcio-alcalino, de idade hercínica; Folha 40-C de Viana do Alentejo.

L – Granito de grão médio a grosseiro, não porfiróide, de duas micas, com tons que variam de rosa a cinzento amarelado.

S – Areia grossa a fina, bem graduada, com seixo e silte, cinzenta amarelada; os grãos de quartzo e feldspato, angulosos, ainda conservam as suas propriedades originais (cor, dureza, forma, etc.); o solo apresenta-se denso, pouco friável, dificultando a colheita.

P – O talude de escavação apresenta uma espessura de 2 m de solo residual; é difícil a distinção entre solo residual e maciço rochoso sem a ajuda de instrumentos como o martelo.

R – Colheita de rocha sã.

E – 1m.

3.6.2 – Maciço eruptivo de Arraiolos

N – Amostra nº 8

G – Azaruja; EN 90 Évora - Estremoz (Km 267,300); saibreira nº 28 da CMDE.

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico; Folha 36-C de Arraiolos.

L – Tonalito de grão médio, cinzento.

S – Areia siltosa, cinzenta amarelada; solo essencialmente quartzoso, de baixa plasticidade, poroso, mas de difícil colheita devido às ligações relativamente fortes entre partículas.

P – Perfil com 6 m de altura de solo exposto; não se distingue rocha alterada.

O – Aproximadamente 10 cm.

E – 4 m.

N – Amostra nº 34

G – Évoramonte 1; talude da EN 18 a 30 Km de Évora; saibreira nº 20 da CMDE.

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico; Folha 36-D do Redondo.

L – Granodiorito de grão médio, cinzento, gnaissico.

S – Areia siltosa, castanha; o solo mantém a estrutura da rocha-mãe.

P – Talude de escavação com altura superior a 10 m; vestígios de rocha pouco alterada.

E – 2 e 10 m.

N – Amostra nº 36

G – Évoramonte 2; intercepção da EN 18 com a EN 372-1; saibreira nº 13 da CMDE.

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico, (granodioritos e quartzodioritos associados, gnaissoides); Folha 36-D do Redondo.

L – Granodiorito de grão médio a fino, cinzento, gnaissico.

S – Areia siltosa, castanha clara; solo não plástico, apresentando uma certa humidade.

P – Saibro granodiorítico com 5 m de espessura exposta; vestígios de rocha alterada.

O – Aproximadamente 5 cm.

E – 3 m.

N – Amostra nº 37

G – Évoramonte 3; talude da EN 18 junto à intercepção com a A6.

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico, (granodioritos e quartzodioritos gnaissicos); Folha 36-D do Redondo.

L – Tonalito gnaissico de grão grosso.

S – Areia bem graduada com silte, cinzenta acastanhada; solo compacto escuro com nódulos argilosos disseminados; de difícil colheita.

P – Talude de escavação com altura de 4 m de solo visível.

O – Aproximadamente 10 cm

E – 2 m.

N – Amostra nº 44

G – Arraiolos; talude de escavação a 5 Km de Arraiolos na EN 370 Évora – Arraiolos.

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica; Folha 36-C de Arraiolos.

L – Quartzodiorito de grão médio, cinzento escuro.

S – Areia siltosa, castanha amarelada (cor de ferrugem) e com alguns nódulos brancos; o solo húmido, fácil de colher, apresenta-se ligeiramente húmido.

P – Perfil de solo com cerca de 4 m de espessura visível; solo homogéneo sem horizontes diferenciados e passa rapidamente para rocha sã, não se observando rocha alterada.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã.

E – 2 m.

P – DPL, DPSH e SPT.

N – Amostra nº 63

G – A6 – Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Évora - Estremoz (Km 28,250).

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico.

L – Granodiorito de grão médio, cinzento.

S – Areia grossa a fina, castanha amarelada com manchas esbranquiçadas; o solo é não plástico e friável.

P – Mancha de empréstimo com 4 m de altura visível; perfil heterogéneo na cor, textura e densidade, exibindo variabilidade lateral e vertical.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 2 m.

N – Amostra nº 64

G – A6 – Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Évora - Estremoz (Km 20,800).

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico.

L – Granodiorito de grão médio a grosso, gnaissico, cinzento.

S – Areia grossa, siltosa, castanha amarelada a esbranquiçada; o solo é não plástico, de densidade baixa e muito friável (fácil de colher).

P – Talude de escavação com 8 m de altura visível de solo heterogéneo.

O – Aproximadamente 5 cm.

E – 4 m.

N – Amostra nº 65

G – A6 – Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Évora - Estremoz (Km 29,700).

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico.

L – Granodiorito de grão médio a grosso, cinzento.

S – Areia grossa a fina, bem graduada, com silte, amarela acastanhada com nódulos brancos; o solo é não plástico, permeável, pouco húmido e friável.

P – Talude de escavação com 5 m de espessura de solo homogéneo, visível.

R – Colheita de rocha sã e rocha alterada (esta, de um nível com 0,5 m de espessura).

E – 3 m.

N – Amostra nº 66 (Figura 3.6)

G – A6 – Autoestrada Marateca-Elvas/Sublanço Évora - Estremoz (Km 31).

F – Complexo granítóide de Arraiolos, de idade hercínica, orogénico.

L – Granodiorito associado a quartzodiorito de granularidade variável, cinzentos.

S – Areia grossa, castanha amarelada a avermelhada; o solo é ligeiramente plástico e friável.

P – Mancha de empréstimo com 8 a 10 m de altura visível; perfil heterogéneo na cor e textura, exibindo variabilidade lateral e vertical.

E – 4 m.

3.6.3 – Maciço eruptivo de Montemor-o-Novo

N – Amostra nº 59 (Figura 3.6)

G – Montemor-o-Novo; EN 114 Montemor-o-Novo – Lavre (Km 158,150); pedreira n.º 17 da CMDE.

F – Tonalitos de Montemor-o-Novo, hercínicos, orogénicos; Folha 35-D de Montemor-o-Novo.

L – Quartzodiorito (tonalito) de grão médio, biotítico, cinzento escuro, com megacristais de feldspato; o maciço apresenta-se bastante fracturado (F₄ do sistema de classificação da S.I.M.R.).

S – Areia argilosa, cinzenta escura com manchas amareladas; solo homogéneo (cor e granularidade), revelando alguma plasticidade; é friável e húmido.

P – A espessura média do solo é de 8 m; o solo residual passa bruscamente para rocha sã.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã.

E – 7 m.

N – Amostra nº 86

G – Monte da Rosenta; EN 4 Montemor-o-Novo – Vendas Novas (Km 73,600); saibreira n.º 24 da CMDE.

F – Tonalitos de Montemor-o-Novo, hercínicos, orogénicos; Folha 35-D de Montemor-o-Novo.

L – Quartzodiorito (tonalito) de grão médio a grosso, cinzento.

S – Areia grossa siltosa, castanha; solo, de aspecto homogéneo, apresentava as partículas fortemente ligadas (cimentadas) entre si, o que, associado à pouca humidade, dificultou a amostragem.

P – A espessura média do solo é de 6 m; o solo residual passa bruscamente para rocha sã.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas em blocos.

R – Colheita de rocha sã; não se verificou rocha alterada .

E – 3 m.

3.6.4 – Maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz

N – Amostra nº 11

G – Talude de escavação ao Km 22 da EN 802 Évora - Reguengos de Monsaraz.

F – Granodioritos e tonalitos associados, hercínicos; Folha 40-B de Reguengos de Monsaraz.

L – Quartzdiorito (tonalito) gnaissico de grão médio, cinzento escuro.

S – Areia siltosa com cascalho, cinzenta escura; solo homogéneo (cor e granularidade), com alguma plasticidade, friável e bastante húmido.

P – Altura do perfil superior a 7 m.

O – Aproximadamente 15 cm.

E – 7 m.

N – Amostra nº 13

G – Vendinha; pedreira activa situada junto à estrada da Vendinha para Montoito (Km 4)

F – Granodioritos e tonalitos associados, hercínicos; Folha 40-B de Reguengos de Monsaraz.

L – Granodiorito gnaissico de grão médio, biotítico, cinzento escuro.

S – Areia siltosa com cascalho, cinzenta; solo quartzoso, homogéneo (cor e granularidade), com alguma plasticidade, pouco friável e difícil de colher.

P – Altura do perfil próxima dos 5 m.

E – 2 m, 3 m e 4 m.

N – Amostra nº 82 (Figura 3.6)

G – Monsaraz; EN 256 Reguengos de Monsaraz – Mourão (Km 36,650); saibreira nº47 da CMDE.

F – Granodioritos e tonalitos associados, hercínicos; Folha 41-C de Mourão.

L – Quartzdiorito (tonalito) de grão médio, cinzento escuro.

S – Areia média a fina com silte, cinzenta clara; solo friável, húmido e ligeiramente plástico.

P – Saibreira com 10 m de altura por 100 largura; perfil heterogéneo (cor e granularidade); a fracturação controla a meteorização; a espessura máxima da rocha alterada é de 50 cm; zona de contacto com outras formações.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 8 m.

C – DPL.

3.6.5 – Maciço eruptivo do Redondo

N – Amostra nº 15

G – Monte Branco da Piedade; EN 381 Redondo - Reguengos de Monsaraz (Km 31,050); pedreira nº 24 da CMDE.

F – Granodioritos e quartzdioritos gnaissicos, hercínicos; Folha 36-D do Redondo.

L – Quartzdiorito (tonalito) de grão médio, cinzento escuro, evidenciando textura gnaissica; os grãos de quartzo e feldspato apresentam-se deformados e as micas ocorrem orientadas.

S – Areia siltosa, cinzenta; solo friável, ligeiramente húmido e de plasticidade média.

P – O perfil com 5 m de altura de solo residual, sobre rocha alterada (0.5 m, no máximo) sobrejacente à rocha sã, apresenta-se heterogéneo (cor e granularidade), ocorrendo muitas bolsadas e lentículas de solos de outros granítoides, assim como numerosos encraves.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 3 m.

N – Amostra nº 16 (Figura 2.5)

G – Calado; EN 254 Redondo – Bencatel (a 3 Km do Redondo, junto ao cruzamento para Alandroal); saibreira nº23 da CMDE.

F – Granodioritos e quartzodioritos gnaissicos, hercínicos; Folha 36-D do Redondo.

L – Granodiorito de grão médio, cinzento.

S – Areia siltosa, cinzenta acastanhada; solo difícil de colher, com grãos fortemente ligados por cimento essencialmente siltoso; não revela plasticidade.

P – Saibreira com 8 m de altura; na base do perfil, predomina o maciço rochoso alterado.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas e parafinadas.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 3 m.

C – DPL.

3.6.6 – Maciço eruptivo da Vidigueira

N – Amostra nº 71

G – Vidigueira 1; saibreira grande junto ao mercado da Vidigueira.

F – Complexo granítóide da Vidigueira.

L – Quartzodiorito (tonalito) de grão médio a fino, cinzento escuro.

S – Areia argilo-siltosa, castanha acinzentada, ocorrendo, por vezes, grãos brancos de feldspato disseminados no solo; solo friável, ligeiramente húmido e com alguma plasticidade.

P – Saibreira com 8 m de altura por 50 largura; perfil relativamente homogéneo.

O – Aproximadamente 10 cm.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E - 6 m.

N – Amostra nº 72

G – Vila de Frades; EN Vidigueira – Alvito; saibreira nº 2 da Carta de Materiais do Distrito de Beja - CMDB (JAE, 1976).

F – Complexo granítóide da Vidigueira.

L – Granito de grão médio a grosseiro, róseo.

S – Areia bem graduada com silte e seixo fino, castanha avermelhada; os grãos de feldspato preservam, na sua maioria, a forma original; solo ripável, fácil de colher, pouco húmido.

P – Saibreira com 8 m de altura por 100 largura; perfil heterogéneo (cor e granularidade), na direcção vertical como na horizontal.

O – Aproximadamente 10 cm.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E - 6 m.

N – Amostra nº 73

G – S. Cucufate; EN 258 Vidigueira – Alvito (Km 11,100); saibreira nº 1 da CMDB.

F – Complexo granítóide da Vidigueira.

L – Granito de grão grosseiro, róseo, ligeiramente porfiróide.

S – Areia bem graduada com silte e seixo fino, castanha avermelhada; solo de grãos grosseiros, angulosos e bastante imbricados, tornando difícil a sua colheita.

P – Saibreira com 6 m de altura e de grande extensão; perfil vertical e homogéneo.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

E – 5 m.

C – DPL e DPSH.

N – Amostra nº 74 (Figura 3.7)

G – Cuba; EN 387 Vidigueira – Cuba (Km 24,100); saibreira nº 4 da CMDB.

F – Complexo granítóide da Vidigueira.

L – Granodiorito de grão médio cinza claro.

S – Areia de grão médio a grosseiro, siltosa, castanha avermelhada; solo friável, pouco húmido e com evidências de alguma plasticidade.

P – Saibreira com 6 m de altura e 60 m de largura; ocorrem, com frequência, blocos de rocha arredondados, com cerca de 1 m de diâmetro, no seio do solo residual.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas

E – 5 m.

N – Amostra nº 75

G – S. Cucufate; EN 387 Vidigueira – Cuba (Km 25,400); saibreira nº 3 da CMDB.

F – Complexo granítioide da Vidigueira.

L – Quartzodiorito cinzento escuro.

S – Areia mal graduada com silte e seixo fino, castanha; solo friável, pouco húmido e com alguma plasticidade.

P – Saibreira com 3 m de altura e 20 m de largura; perfil homogéneo.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

E - 2,5 m.

3.6.7 – Maciço granítico de Pias

N – Amostra nº 76 (Figura 3.8)

G – Pias; EN 255 Moura – Pias (Km 108,200); saibreira nº 16 da CMDB.

F – Granito calcoc-alcalino de Pias; Folha 43-B de Moura.

L – Granito cinzento claro a esbranquiçado de grão médio a grosso, essencialmente biotítico e com tendência porfiróide.

S – Areia siltosa, branca acinzentada; solo fino, com pouco quartzo e bastante friável; solo macio, húmido e com alguma plasticidade.

P – Saibreira com cerca de 6 m de altura e 50 m de largura; perfil vertical e relativamente homogéneo, excepto no que se refere a algumas diaclases relíquia e de veios bastante alterados, que ocorrem rodeados por solo amarelado e húmido, denunciando claramente que a meteorização é controlada pela macro-estrutura.

O – Aproximadamente 20 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 4 m.

C – DPL, DPSH e CPT.

3.6.8 – Maciço granítico de Santa Eulália

N – Amostra nº 17

G – Monforte 1; EN 369 Monforte – Vaiamonte (Km 45,300); saibreira nº 27 da Carta de Materiais do Distrito de Portalegre - CMDP (JAE, 1983a).

F – Granito róseo, alcalino, do Maciço de Santa Eulália; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito equigranular de grão médio a grosso, róseo.

S – Areia mal graduada com silte e cascalho, rósea; solo de grãos grosseiros, na sua maioria de feldspato potássico, angulosos e bastante imbricados, tornando difícil a sua colheita.

P – Saibreira com 4 m de altura, mas de grande extensão; perfil subvertical e homogéneo.

E – 3 m.

N – Amostra nº 18

G – Monforte 2; EN 369 Monforte – Vaiamonte (Km 46,200); pedreira activa da Fidalbor.

F – Granito róseo, alcalino, do Maciço de Santa Eulália; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito equigranular de grão médio a grosso, róseo; maciço pouco fracturado.

S – Areia bem graduada com silte e cascalho, rosa acastanhado; solo de grãos grosseiros, na sua maioria de feldspato, angulosos e bastante imbricados, tornando difícil a sua colheita.

P – Perfil com mais de 10 m de altura, vertical e homogéneo.

E – 6 m.

C – DPL.

N – Amostra nº 19

G – Monforte 3 (Monte do Padre João); EN 18 (IP2) Monforte – Portalegre (Km 198,660); pedreira activa nº20 da CMDP.

F – Granito róseo, alcalino, do Maciço de Santa Eulália; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito biotítico e horneblêndico de cor rosada intensa, determinada pela abundância de feldspato potássico róseo, granulado médio e aspecto homogéneo; textura hipidiomórfica granular, ligeiramente microfracturado.

S – Areia argilosa com cascalho, rosa forte; o solo é essencialmente constituído por grãos grosseiros e angulosos de feldspato róseo, interligados por cimento argiloso plástico .

P – Perfil com cerca de 8 m de altura, vertical e pouco homogéneo, entrecortado por fracturas relíquia afastadas e lenticulas de argila ocasionais.

E – 7 m.

N – Amostra nº 20

G – St^a Eulália 1; EN 246 St^a Eulália – Arronches (Km 59,050); pedreira nº 24 da CMDP.

F – Granito cinzento, calco-alcalino, do Maciço de St^a Eulália; Folha 33-C de Campo Maior.

L – Granito de grão médio a fino, cinzento claro, com muito quartzo, alguma mica (biotite) e pouco feldspato de carácter calco-alcalino; maciço muito fracturado.

S – Areia bem graduada com silte, cinzenta clara; solo residual ‘jovem’ de grão médio, mantém a estrutura original, bastante consolidado e difícil de colher.

P – Perfil com cerca de 3 m de altura, vertical e homogéneo; pouca extensão lateral.

E – 2 m.

N – Amostra nº 43 (Figura 3.8)

G – Chacins; EN 243 St^a Eulália – Campo Maior (Km 185,700); pedreira nº 29 da CMDP.

F – Granito róseo, alcalino, do Maciço de Santa Eulália; Folha 33-C de Campo Maior.

L – Granito equigranular de grão grosso, biotítico, porfiróide, de tonalidade rosada homogénea, com abundância de quartzo e fenocristais de feldspato potássico rosados.

S – Areia siltosa com cascalho, rosa escuro; o solo é essencialmente constituído por grãos grosseiros e angulosos de feldspato róseo e quartzo, muito pouco alterados; apresenta-se bastante poroso porque, praticamente, não existe matriz de ligação.

P – Perfil com cerca de 4 m de altura, e vertical devido à forte imbricação dos grãos.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas em blocos parafinados.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 1 e 2 m.

C – DPL

N – Amostra nº 47

G – Barbacena; junto à estrada de Barbacena - Monforte (Km 2); saibreira nº 46 da CMDP.

F – Granito róseo, alcalino, do Maciço de Santa Eulália; Folha 33-C de Campo Maior.

L – Granito biotítico de cor rosada, determinada pela abundância de cristais de feldspato potássico róseo, granulado grosso e aspecto homogéneo.

S – Cascalho mal graduado com areia e silte, róseo; solo de textura grosseira, herdada da rocha-mãe; o cimento intergranular praticamente não existe; grãos fortemente imbricados.

P – Perfil com cerca de 6 m de altura e de grande extensão lateral (aproximadamente 100 m), vertical e com variações ligeiras na cor e granularidade, distinguem-se fracturas relíquia afastadas, e lenticulas de argila junto à superfície.

O – Aproximadamente 10 cm.

E – 1 e 2 m.

N – Amostra nº 70 (Figura 3.8)

G – St^a Eulália 2; EN 243-1 Barbacena - St^a Eulália (Km 1,500); pedreira nº 27 da CMDP.

F – Granito cinzento, calco-alcalino, do Maciço de St^a Eulália; Folha 33-C de Campo Maior.

L – Granito equigranular de grão médio, cinzento; maciço medianamente fracturado.

S – Areia siltosa, cinzenta amarelada; solo residual ‘maduro’, comportamento granular, coesão fraca, fácil de colher; apresentava-se praticamente seco e sem plasticidade aparente.

P – Perfil com cerca de 4 m de altura, subvertical e homogéneo.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

E – 2 m.

Observações:

i) As amostras 17, 18 e 43 pertencem a solos residuais de excelentes características geomecânicas, e devido à sua representação espacial (existem numerosas saibreiras na região), foram utilizados nos aterros e nas camadas granulares do pavimento da A6, assim como no melhoramento de solos para o IP2.

ii) O granito róseo de St^a Eulália apresenta maiores espessuras de alteração e o solo resultante é mais grosseiro e homogéneo que o solo residual do granito cinzento de St^a Eulália; este, de textura mais fina, apresenta afloramentos de rocha à superfície dos perfis de alteração, sendo os maciços mais fracturados, a meteorização é controlada pelo diaclasamento, e a erosão superficial é mais fácil porque o solo é mais fino e friável.

3.6.9 – Maciço granítico de Elvas

N – Amostra nº 68

G – Padeira; junto ao marco geodésico com o mesmo nome, 3 Km a SE de Elvas.

F – Granito alcalino, hercínico, do Maciço de Elvas; Folha 37-A de Elvas.

L – Granito de grão médio, biotítico, cinzento claro.

S – Areia siltosa, branca acinzentada; solo residual ‘jovem’ de matriz branca, fina, com alguns minerais escuros disseminados; friável, pouco húmido e ligeiramente plástico.

P – Perfil com cerca de 1 m de altura, no talude de escavação; pouca representação espacial.

O – Aproximadamente 10 cm.

R – Colheita de rocha sã.

E – 1 m.

N – Amostra nº 69

G – Torre da Sé; saibreira pequena a 2 Km a SE de Elvas.

F – Granito alcalino, hercínico, do Maciço de Elvas; Folha 37-A de Elvas.

L – Granito de grão médio, biotítico, cinzento.

S – Areia siltosa, cinzenta amarelada ou acastanhada; solo residual ‘maduro’; abundância de grãos de quartzo, friável, pouco húmido e ligeiramente plástico.

P – Perfil com cerca de 1 m de espessura de solo sobrejacente a rocha pouco alterada.

O – Aproximadamente 10 cm.

R – Colheita de rocha sã e pouco alterada.

E – 1 m.

3.6.10 – Maciço granítico do Vimieiro

N – Amostra nº 40

G – Bardeiras; EN 251 Pavia – Vimieiro (Km 92,400); pedreira nº 8 da CMDE.

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Maciço do Vimieiro; Folha 36-A de Pavia.

L – Granito de grão médio, porfiróide, biotítico, cinzento claro; abundância de cristais de feldspato, poucos grãos de quartzo e muito poucos minerais ferromagnesianos.

S – Areia argilosa, cinzenta clara; o solo residual ‘jovem’ é constituído por uma matriz argilosa branca, onde ocorrem disseminadas as partículas mais grosseiras, essencialmente quartzosas; o solo apresenta-se húmido e a matriz é plástica.

P – Perfil com cerca de 5 m de altura, homogéneo na vertical e na horizontal.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 4 m.

N – Amostra nº 41

G – Vimieiro 1; EN 251 Pavia – Vimieiro (Km 92,900); pedreira nº 7 da CMDE.

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Maciço do Vimieiro; Folha 36-A de Pavia.

L – Granito de grão médio a grosseiro, de duas micas, cinzento claro; abundância de cristais de feldspato, poucos grãos de quartzo e poucos minerais ferromagnesianos.

S – Areia siltosa, cinzenta amarelada; o solo residual ‘maduro’, onde as partículas mais finas já tinham sido lixiviadas, predominando os grãos de quartzo mais ou menos arredondados arrumados numa estrutura porosa; material húmido e não plástico.

P – Perfil com mais de 5 m de altura, homogéneo na cor e granularidade.

O – Aproximadamente 50 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 1, 2 e 3 m.

C – DPL

N – Amostra nº 42

G – Vimieiro 2; EN 251 Pavia – Vimieiro (Km 92,900); pedreira nº 7 da CMDE.

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Maciço do Vimieiro; Folha 36-A de Pavia.

L – Granito de grão médio a grosseiro, de duas micas, cinzento claro; abundância de cristais de feldspato, poucos grãos de quartzo e poucos minerais ferromagnesianos.

S – Areia argilo-siltosa, cinzenta clara com algumas manchas amareladas; o solo residual ‘jovem’, menos evoluído que o solo da amostra 41, é constituído por uma matriz argilo-siltosa branca, onde ocorrem

disseminadas as partículas mais grosseiras, essencialmente quartzosas; o solo apresenta-se húmido e com alguma plasticidade; fácil de colher.

P – Perfil com cerca de 2 m de altura, relativamente homogéneo.

R – Colheita de rocha sã.

E – 1 e 1,5 m.

N – Amostra nº 45 (Figura 3.7)

G – S. Gregório; EN 4 Arraiolos - Vimieiro (a 7 Km de Arraiolos); talude de escavação.

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Maciço do Vimieiro; Folha 36-A de Pavia.

L – Granito de grão grosso, porfiróide, de duas micas, cinzento claro.

S – Areia mal graduada com silte e cascalho, predominando o tom cinzento claro; solo com grãos muito grosseiros de quartzo, feldspato e micas brancas; poucos minerais ferromagnesianos; as partículas mais finas possuem alguma plasticidade; solo permeável.

P – Perfil com mais de 10 m de altura e largura superior a 200 m; talude vertical (o solo está bem ‘consolidado’); as variações granulométricas são pouco significativas, mas o perfil apresenta-se bastante heterogéneo quanto à cor, passando por tons: cinzento esbranquiçado, rosado, amarelado e acastanhado.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas sob forma de blocos parafinados.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 8 m.

C – DPL e DPSH.

N – Amostra nº 46

G – Sabugueiro; EM 507 (a 1Km de S. Geraldo); saibreira nº 10 da CMDE.

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Vimieiro; Folha 35-D de Montemor-o Novo.

L – Granito porfiróide de granulado médio, biotítico, de coloração cinzenta com tom levemente rosado determinado pela cor dos fenocristais de feldspato.

S – Areia siltosa, cinzenta clara; os grãos de areia são essencialmente quartzosos porque os cristais de feldspato estavam completamente transformados em material argiloso plástico; o solo encontrava-se húmido e é relativamente fácil de colher com amostradores.

P – Perfil com mais de 4 m de altura e 30 m de largura; perfil homogéneo e relativamente impermeável.

O – Aproximadamente 20 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã .

E – 2 m.

3.6.11 – Maciço granítico de Fronteira

N – Amostra nº 48

G – S. Saturnino; EN 243 Monforte – Fronteira (Km 150,300) ; saibreira nº 36 da CMDP.

F – Granitos calco-alcalinos, com tendência alcalina, de Fronteira; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito de grão médio a grosso, cinzento claro, biotítico, com tendência porfiróide.

S – Areia siltosa, cinzenta clara; solo esbranquiçado, friável, com poucos cristais de quartzo arredondados dispersos numa matriz essencialmente siltosa, resultante da alteração dos feldspatos, com alguma plasticidade; solo bastante permeável e pouco denso.

P – Perfil com cerca de 6 m de altura; talude subvertical da estrada, com material homogéneo interceptado por algumas estruturas relíquia tais como: fracturas e veios pegmatíticos alterados; o solo residual passa rapidamente para rocha sã => ausência de rocha alterada.

O – Aproximadamente 20 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã.

E – 3 e 4,5 m.

C – DPL, DPSH e SPT.

N – Amostra nº 49 (Figura 3.7)

G – Fronteira; EN 243 Monforte – Fronteira (Km 144,610); saibreira nº 35 da CMDP.

F – Granitos calco-alcalinos, com tendência alcalina, de Fronteira; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito de grão médio cinzento claro, biotítico, com tendência porfiróide.

S – Areia siltosa, cinzenta clara; solo esbranquiçado, com poucos cristais de quartzo arredondados dispersos numa matriz essencialmente siltosa, resultante da alteração dos feldspatos, com alguma plasticidade; solo permeável, mas mais consolidado, logo mais difícil de colher, que o solo da amostra 48.

P – Perfil com cerca de 4 m de altura; talude subvertical da estrada, homogéneo; o solo residual passa rapidamente para rocha sã => ausência de rocha alterada.

O – Aproximadamente 20 cm.

E – 1 e 3 m.

Observações: Nos taludes virados a Sul, onde é maior a exposição ao sol, o solo é mais duro, difícil de colher; nos taludes virados a Norte (abrigados da exposição solar), a espessura de solo residual é maior, o solo é mais húmido, mais friável, mais fácil de colher, e possui coberto vegetal mais denso.

3.6.12 – Maciço granítico do Ervedal

N – Amostra nº 51 (Figura 3.7)

G – Ervedal; EN 243 Monforte – Fronteira (Km 129,200); saibreira nº 34 da CMDP.

F – Granito calco-alcalino do Maciço de Eruptivo de Ervedal; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito de grão médio cinzento claro, biotítico.

S – Areia bem graduada com silte, amarela acastanhada; solo com abundância de grãos de quartzo e pouco material fino; comportamento granular, permeável e ligeira plasticidade.

P – Perfil com mais de 10 m de altura; vestígios de rocha alterada; saibreira de grandes dimensões, explorada há mais de 20 anos para o pavimento de estradas municipais devido ao solo possuir boas características geomecânicas.

O – Aproximadamente 5 cm.

R – Colheita de rocha sã.

E – 8 m.

C – DPL.

N – Amostra nº 52

G – Figueira de Barros; talude da estrada municipal junto à ponte para Figueira de Barros.

F – Granito calco-alcalino do Maciço de Eruptivo de Ervedal; Folha 32-D de Sousel.

L – Granito de grão médio cinzento claro, biotítico.

S – Areia bem graduada com silte, cinzenta amarelada; solo com abundância de grãos de quartzo e pouco material fino; comportamento granular, permeável e ligeira plasticidade.

P – Perfil com cerca de 4 m de altura, diferenciado: 0 a 2 m – solo mais evoluído, amarelado, fácil de colher; 2 a 4 m – solo menos evoluído, cinzento, mais estruturado e difícil de colher.

O – Aproximadamente 10 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores a 3 m de profundidade.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 2 e 4 m.

3.6.13 – Maciço granítico do Gavião

N – Amostra nº 84 (Figura 3.7)

G – Gavião 1; saibreira a 1 Km do Gavião, acessível pela EN 118 (IP 2).

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Gavião; Folha 28-C do Gavião.

L – Granito de grão médio, de duas micas, predominantemente moscovítico; maciço bastante alterado e diaclasado, atravessado por filonetes de quartzo branco.

S – Areia grossa siltosa, amarela acastanhada; solo essencialmente quartzoso, de baixa plasticidade; bem estruturado tornando difícil a colheita.

P – Perfil com mais de 10 m de altura e 100 m de largura; grande espessura de solo residual sobre maciço de rocha alterada; não se reconheceram afloramentos de rocha sã.

O – Aproximadamente 15 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha alterada.

E – 5 m.

N – Amostra nº 85

G – Gavião 2; talude de escavação para fundações de um edifício à entrada de Gavião.

F – Granito calco-alcalino, hercínico, do Gavião; Folha 28-C do Gavião.

L – Granito de grão médio, de duas micas, com textura gnaissica.

S – Areia siltosa, amarela acastanhada; solo micáceo, macio, de baixa plasticidade, com alguma humidade e fácil de colher.

P – Perfil com 3 m de altura; solo homogéneo.

E – 2 m.

3.6.14 – Maciço granítico de Portalegre

N – Amostra nº 58 (Figura 3.7)

G – Portalegre; talude de escavação do IP 2 junto ao cruzamento para Portalegre.

F – Granitos tectonizados de Portalegre; Folha 32-B do Portalegre.

L – Granito gnaissico de grão grosso, de natureza alcalina, porfiróide, cinzento amarelado.

S – Areia argilosa, cinzenta avermelhada; solo com grãos de quartzo grosseiros dispersos numa matriz de natureza argilosa, plástica, responsável pela coesão do material.

P – Perfil com 7 m de altura; o solo apresenta alguma variabilidade na textura e cor.

O – Aproximadamente 5 cm.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 5 m.

3.6.15 – Maciço granítico de Carreiras

N – Amostra nº 54

G – Carreiras 1; talude de escavação acessível pela EN 359, a 300 m de Carreiras.

F – Granitos ante-hercínicos, tectonizados, de natureza alcalina, de Carreiras; Folha 28-D de Castelo de Vide.

L – Granito de grão médio a fino, ligeiramente tectonizado, cinzento.

S – Areia siltosa, amarela; solo micáceo, macio, com abundância de finos de baixa plasticidade, húmido e fácil de colher.

P – Perfil com 6 m de altura; solo homogéneo.

O – Aproximadamente 10 cm.

E – 3 e 5 m.

N – Amostra nº 55 (Figura 3.7)

G – Carreiras 2; talude de escavação para as fundações de uma residência, acessível pela EN 246 – Castelo de Vide - Carreiras, a 300 m do centro de Carreiras.

F – Granitos ante-hercínicos, tectonizados, de natureza alcalina, de Carreiras; Folha 28-D de Castelo de Vide.

L – Granito de grão médio a fino, tectonizado, cinzento escuro; no maciço ocorrem fracturas relativamente próximas (F_{3-4}); a rocha alterada é branca amarelada.

S – Areia fina siltosa, branca acinzentada, com alguns grãos de quartzo; solo com abundância de finos de baixa plasticidade, húmido e fácil de colher.

P – Perfil com 5 m de altura; solo homogéneo, mas é interceptado por algumas descontinuidades (diaclasses) relíquia, junto às quais o solo é mais húmido e amarelado; existem blocos de rocha no seio do solo residual.

O – Aproximadamente 20 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 2 e 4 m.

N – Amostra nº 56

G – Miradouro; saibreira junto ao Miradouro na EN 246, a 2 Km de Carreiras.

F – Granitos ante-hercínicos, tectonizados, de natureza alcalina, de Carreiras; Folha 28-D de Castelo de Vide.

L – Granito de grão médio, com abundância de quartzo, tectonizado, cinzento.

S – Areia siltosa, branca acinzentada ou amarelada; solo com abundância de grãos de quartzo fortemente ligados por cimento silicioso, não plástico, resistente e difícil de colher.

P – Perfil com 6 m de altura por 20 m de largura; solo homogéneo.

O – Aproximadamente 20 cm.

E – 5 m.

N – Amostra nº 57

G – M^{te}. Carvalhos; talude de escavação da EN 359 – Marvão-Portalegre a 5 Km de Alvarrões.

F – Granitos ante-hercínicos, tectonizados, de natureza alcalina, de Carreiras; Folha 28-D de Castelo de Vide.

L – Granito de grão médio a fino, tectonizado, cinzento; maciço muito fracturado (F_4).

S – Areia fina siltosa, branca amarelada; solo micáceo, macio, com abundância de finos de baixa plasticidade, pouco húmido, pouco denso, friável e fácil de colher.
P – Perfil com 7 m de altura; solo homogéneo relativamente à cor e textura.
O – Aproximadamente 20 cm.
AI – Colheita de amostras indeformadas em blocos parafinados.
E – 4 m.

3.6.16 – Complexo eruptivo de Nisa

N – Amostra nº 53 (Figura 3.8)

G – Marvão; EN 359 a 2 Km de Marvão; saibreira nº 13 da CMDP.
F – Granito de Marvão, de natureza calco-alcalina; Folha 29-C de Marvão.
L – Granito de grão médio a grosseiro, porfiróide, cinzento claro.
S – Areia grossa siltosa, branca acinzentada ou amarelada; solo com poucos grãos de quartzo, mas por vezes ocorrem ‘fenocristais’ de feldspato completamente caulinizados; algumas biotites, ocorrem dispersas e, quando alteradas, conferem uma auréola ferruginosa à matriz branca; material muito friável, fácil de colher, ligeiramente plástico e pouco húmido.
P – Perfil com mais de 10 m de altura e 80 m de extensão; solo homogéneo.
O – Aproximadamente 10 cm.
AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.
R – Colheita de rocha sã e alterada.
E – 3 e 8 m.
C – DPL, DPSH, SPT e CPT.

N – Amostra nº 77

G – Alpalhão; pedreira a 7 Km de Alpalhão acessível pela EM 529 – Alpalhão - Arez.
F – Granito de Alpalhão, alcalino; Folha 28-D de Castelo de Vide.
L – Granito de grão médio a fino, cinzento, predominantemente biotítico.
S – Areia média a fina, siltosa, cinzenta; solo macio, com finos não plásticos, húmido e fácil de colher; pouco denso.
P – Perfil com mais de 4 m de altura; solo homogéneo na cor e na textura; o controle da meteorização é feito através das diaclases, junto às quais o solo é mais amarelado.
O – Aproximadamente 10 cm.
AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.
R – Colheita de rocha sã e alterada.
E – 4 m.

N – Amostra nº 78

G – Arez; EM 529 – Alpalhão - Arez, a 2 Km de Arez; saibreira nº 10 da CMDP.
F – Granito alcalino de Gáfete; Folha 28-D de Castelo de Vide.
L – Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de tom avermelhado.
S – Silte argilo-arenoso, vermelho acastanhado; solo com grãos de feldspato de 1 a 2 cm de dimensão, completamente alterados, disseminados numa matriz essencialmente argilosa e plástica; solo húmido e relativamente fácil de colher.
P – Perfil com 3 m de altura; solo homogéneo.
O – Aproximadamente 10 cm.
AI – Colheita de amostras indeformadas.
E – 3 m.

N – Amostra nº 79

G – Tolosa; talude de escavação do IP 2, junto ao cruzamento para Comenda.
F – Granito alcalino de Gáfete; Folha 28-D de Castelo de Vide.
L – Granito de grão grosseiro, porfiróide, moscovítico, cinzento claro.
S – Areia siltosa, cinzenta clara; solo micáceo, com grãos de quartzo dispersos e com abundância de finos de baixa plasticidade; húmido e fácil de colher.
P – Perfil com mais de 4 m de altura; solo homogéneo.
O – Aproximadamente 10 cm.
R – Colheita de rocha sã e alterada.
E – 4 m.

N – Amostra nº 80

G – Beirã; EN 359-4 Beirã – Fadagosa (Km 105,400); saibreira nº 9 da CMDP.

F – Granito calcio-alcalino de Stº António das Areias; Folha 29-C de Marvão.

L – Granito de duas micas de grão médio, cinzento.

S – Areia siltosa, branca acinzentada; solo micáceo, macio, com poucos grãos de quartzo e muitas micas brancas grandes; os feldspatos estavam completamente alterados; o solo encontrava-se húmido e não plástico; muito fácil de colher.

P – Perfil com 5 m de altura e 50 m de largura; é notório o controlo dos diferentes ambientes de meteorização pelas diaclases, observando-se, ao redor destas solo amarelado e com aspecto ferruginoso.

O – Aproximadamente 5 cm.

AI – Colheita de amostras indeformadas com amostradores.

R – Colheita de rocha sã e alterada.

E – 4 m.

N – Amostra nº 81 (Figura 3.7)

G – Nisa; EM 525-1 Póvoa e Meadas – Nisa (Km 7,900); saibreira nº 6 da CMDP.

F – Granito monzonítico de Nisa; Folha 28-B de Nisa.

L – Granito porfíróide de grão grosso, de duas micas, predominantemente biotítico, com grandes megacristais de feldspato, de tom rosado devido à presença importante de ortoclase.

S – Cascalho bem graduado, amarelo acastanhado; solo com grãos muito grosseiros e angulosos, conservando o “fabric” da rocha-mãe; o material fino apesar de pouco representativo, apresenta alguma plasticidade; o solo é de difícil colheita devido ao forte imbricamento dos grãos.

P – Perfil com 5 m de altura por 100 m de largura; solo relativamente homogéneo.

R – Colheita de rocha sã (praticamente não existe rocha alterada).

E – 3 m.



Solo 1 - M.^{te} das Flores (Maciço de Évora)



Solo 66 - A6 (Km 31), (Mac. de Arraiolos)



Solo 5 - Fiúza (Maciço de Évora)



Solo 59 - Maciço de Montemor - o - Novo



Solo 60 - A6 (Km 12 + 350 m), (Mac. Évora)



Solo 82 - Monsaraz (Mac. de Reguengos)

Figura 3.6 – Imagens de alguns locais de amostragem de solos residuais de rochas granítóides a sul do Tejo, (continua).



Solo 74 - Cuba (Mac. da Vidigueira)



Solo 84 - Maciço do Gavião



Solo 45 - S. Gregório (Mac. do Vimieiro)



Solo 58 - Maciço de Portalegre



Solo 49 - Maciço de Fronteira



Solo 55 - Maciço de Carreiras



Solo 51 - Maciço do Ervedal

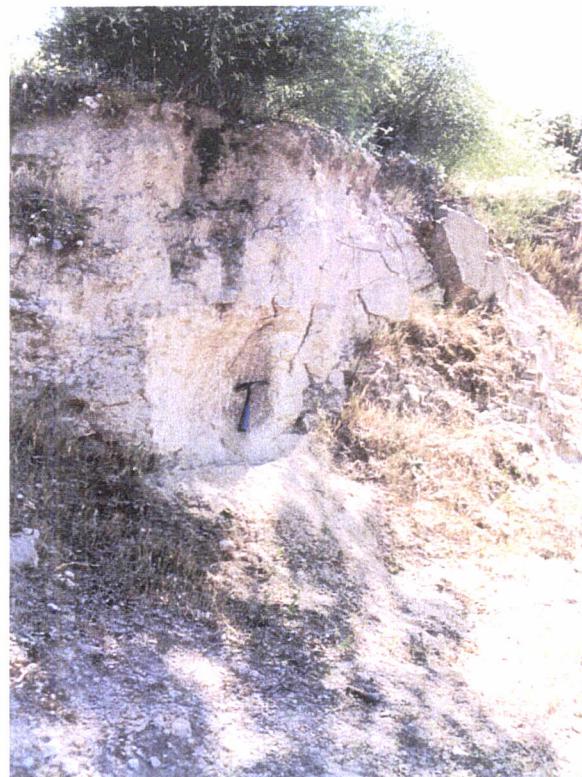


Solo 81 - Maciço de Nisa

Figura 3.7 – Imagens de alguns locais de amostragem de solos residuais de rochas granítóides a sul do Tejo, (continua).



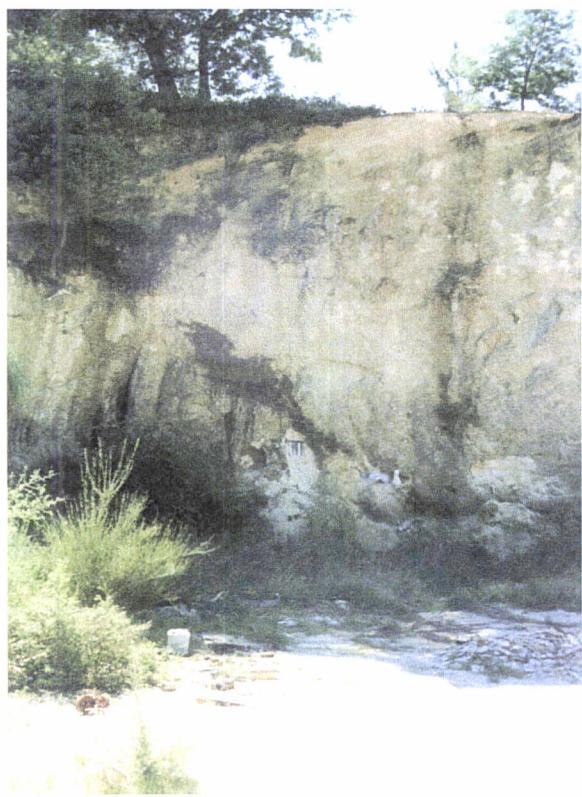
Solo 43 - Chacins (granito rosa de St^a. Eulália)



Solo 70 - Mac. St^a. Eulália (granito cinzento)



Solo 76 - Maciço de Pias



Solo 53 - Marvão (Maciço de Nisa)

Figura 3.8 – Imagens de alguns locais de amostragem de solos residuais de rochas granítóides a sul do Tejo.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

4 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.1 – Introdução

Não é possível fazer-se uma caracterização completa e credível dos solos residuais em estudo, sem o contributo fundamental da análise dos dados químicos, em correspondência com a análise dos dados mineralógicos. A geoquímica e a variação dos teores dos elementos maiores nos perfis de alteração contribui para o conhecimento do tipo e intensidade da meteorização a que determinada rocha foi sujeita. A identificação e semi-quantificação dos produtos de alteração, nomeadamente dos minerais de neoformação sustenta, geralmente, tal interpretação.

A análise da evolução geoquímica dos perfis de meteorização limita-se aos elementos maiores, na maioria dos estudos clássicos, Bonifas (1959), Harris & Adams (1966), Hendricks & Whittig (1968) e Wakatsuki *et al.* (1977). No comportamento geoquímico dos elementos maiores durante a meteorização, de cuja variação se ocupa o presente capítulo, é conhecida a lei de Reiche (1950) segundo a qual “o grupo dos elementos: cálcio, sódio, potássio e magnésio, em conjunto, têm uma mobilidade superior à da sílica, e esta por seu turno tem uma mobilidade superior à dos sesquióxidos: Al_2O_3 e Fe_2O_3 “.

Os estudos de petrogeoquímica recorrem vulgarmente a índices e representações diagramáticas, alguns dos quais de grande potencialidade. Os estudos da alteração de rochas e dos solos residuais respectivos, procuram integrar-se naquela linha geral de pensamento. Depois dos trabalhos clássicos de Polynov (1937) e Goldich (1938), assistiu-se a um grande incremento na investigação sobre a meteorização, confirmada pela quantidade de trabalhos onde se propõem ou se aplicam índices de meteorização químicos e petrográficos, e diagramas interpretativos, dos quais se destacam: Reiche (1943, 1950); Barth (1948); Jackson *et al.* (1948, 1952); Jackson & Sherman (1953); Millot & Bonifas (1955); Keller *et al.* (1955); Leneuf (1959); Short (1961); Krauskopf (1967); Lelong (1967); Ruxton (1968); Jackson (1968); Aires-Barros (1968, 1978); Millot (1970); Parker (1970); Miura (1973); Chesworth (1973, 1975a, 1975b, 1977a, 1977b); Onodera *et al.* (1974); Vogel (1975); Serrano (1979); Kronberg & Nesbitt (1981); Nesbitt & Young (1982); Furtado (1982); Ladeira & Minette (1984a, 1984b, 1984c); Ladeira & Gomes (1986); Miranda (1986); Irfan (1996).

O facto de se terem utilizado neste capítulo vários índices de variação química, é porque uma das finalidades destes índices é a quantificação da intensidade de meteorização. Este objectivo, quando conseguido, tem grande interesse nas suas eventuais aplicações, como por exemplo em geotecnia: quando se pretende que os índices de meteorização funcionem como graus de alteração (Dearman *et al.*, 1978); no estudo de estabilidade de taludes (Deere & Patton, 1971, e Irfan, 1996); em estudos de fundações (Martin, 1977) e, na previsão da alterabilidade das rochas félscicas *versus* rochas máficas (Aires-Barros & Miranda, 1979).

Procura-se que a maioria dos índices de variação química tenham uma evolução ao longo do perfil que identifiquem tendências de evolução da meteorização. Por outro lado, as rochas expostas à meteorização, são constituídas por um número reduzido de minerais, os quais utilizam na sua formação, apenas uns oito elementos químicos essenciais (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg). A proporção de espécies minerais sujeitas à meteorização é aproximadamente: feldspatos (30 %), quartzo (28 %), minerais argilosos e micas (18 %), óxidos de Fe (4 %), piroxenas e anfíbolas (1 %), restantes (19 %); onde os silicatos ocupam, sem dúvida, a posição de maior relevo. Nestes termos, o problema da alteração das rochas reside, em especial, no comportamento dos minerais face aos agentes externos.

Os componentes minerais num solo são indicadores para a determinação do grau de alteração, das alterações químicas prováveis, a prova da sua origem residual, e a extensão de uma possível contaminação (Haseman & Marshall, 1945; Jackson, 1948).

Certos elementos nas rochas ígneas associam-se ou acompanham geoquimicamente alguns outros elementos. É provável que essas associações persistam nos solos que se formaram a partir da alteração daquelas rochas.

A natureza química e mineralógica dos solos residuais reflecte-se, desde o processo de amostragem (maior ou menor facilidade em obter amostras indeformadas), passando pelas características de identificação até às propriedades geotécnicas dos solos, nomeadamente, plasticidade, consistência, expansibilidade, permeabilidade, compressibilidade e resistência.

As propriedades mineralógicas passaram a ser determinadas com frequência, desde que se reconheceu que as mesmas controlam as propriedades geotécnicas das rochas alteradas e dos solos residuais e, o comportamento dos mesmos quando solicitados em obras de engenharia (Vaughan, 1988; Anon, 1990 e Irfan, 1996).

4.2 – Análise química das rochas e respectivos solos residuais

A partir dos materiais colhidos, seleccionaram-se 20 amostras de rocha considerada sã e respectivo solo residual, para serem submetidas à análise química por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Os resultados, expressos em percentagens ponderais dos elementos maiores sob a forma de óxidos, apresentam-se nos Quadros 4.1 e 4.2.

Quadro 4.1 – Composição química de amostras de rocha sã (r.s.).

Amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	P.R.	Total
1	70,90	15,52	1,92	0,23	1,83	4,41	3,74	0,25	0,13	0,06	0,50	99,49
15	61,97	17,24	5,31	1,86	4,46	3,10	2,94	0,58	0,19	0,12	0,99	98,76
41	71,99	15,62	1,14	<200ppm	1,19	4,20	3,92	0,14	0,12	0,05	0,38	98,75
42	71,99	15,62	1,14	<200ppm	1,19	4,20	3,92	0,14	0,12	0,05	0,38	98,75
43	70,84	14,10	2,35	0,19	0,90	3,64	4,75	0,31	0,11	0,05	0,66	97,90
44	60,76	17,38	5,44	2,41	5,21	3,41	2,72	0,66	0,22	0,13	0,65	98,99
48	60,95	18,52	5,14	1,66	5,61	3,94	0,97	0,56	0,23	0,12	0,44	98,14
52	59,66	17,66	5,83	2,71	5,47	3,40	2,62	0,72	0,23	0,13	0,66	99,09
53	71,92	15,04	1,56	<200ppm	0,40	3,43	4,64	0,14	0,39	0,04	1,01	98,57
55	74,39	13,49	1,63	<200ppm	0,33	3,51	4,64	0,10	0,23	0,04	0,59	98,95
58	75,39	12,50	1,43	<200ppm	1,11	0,01	5,44	0,17	0,89	0,03	1,39	98,36
59	60,82	18,75	5,67	1,91	5,82	3,92	1,00	0,52	0,21	0,15	0,46	99,23
68	71,20	15,02	0,71	<200ppm	0,30	3,59	5,45	0,07	0,22	0,05	0,80	97,41
70	69,88	15,46	1,67	0,15	1,57	3,67	4,89	0,27	0,12	0,04	0,58	98,30
72	67,01	16,40	3,55	0,96	2,97	4,36	3,05	0,39	0,13	0,07	0,38	99,27
76	71,40	15,04	2,17	0,31	1,23	3,23	4,43	0,27	0,20	0,07	0,66	99,01
77	68,96	15,60	2,61	0,41	1,78	3,81	3,90	0,39	0,23	0,06	1,00	98,75
79	74,27	13,04	1,54	<200ppm	0,51	3,24	4,59	0,14	0,16	0,04	0,53	98,06
82	68,94	16,75	2,08	0,41	1,99	4,36	3,20	0,28	0,15	0,06	0,73	98,95
84	68,28	16,24	3,13	0,59	0,39	3,13	4,76	0,41	0,22	0,04	1,74	98,93

Quadro 4.2 – Composição química de amostras de solos residuais (s.r.).

Amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	P.R.	Total
1	61,97	19,36	3,32	1,23	1,45	4,52	3,89	0,42	0,17	0,10	2,98	99,41
15	55,75	19,89	7,71	2,29	2,87	2,28	2,59	0,79	0,23	0,13	5,22	99,75
41	59,10	24,09	2,03	0,40	1,53	5,75	3,17	0,25	0,09	0,04	3,41	99,86
42	59,31	24,30	2,40	0,35	1,21	4,42	3,27	0,34	0,07	0,03	3,95	99,65
43	56,06	21,90	6,09	1,25	0,96	3,55	3,03	0,81	0,10	0,06	5,24	99,05
44	52,78	21,69	7,14	2,97	5,19	2,93	1,83	0,93	0,30	0,12	3,97	99,85
48	61,47	18,69	4,03	2,53	2,17	3,14	3,22	0,63	0,20	0,09	3,70	99,87
52	57,11	23,36	3,91	1,58	2,20	4,04	2,37	0,63	0,19	0,05	4,40	99,84
53	59,53	25,07	1,84	0,16	0,04	2,55	4,97	0,13	0,19	0,02	5,24	99,74
55	55,48	28,41	2,69	0,11	0,01	0,09	4,53	0,15	0,07	0,02	8,11	99,67
58	63,19	22,19	1,89	0,49	0,05	0,13	5,99	0,20	0,14	0,01	5,45	99,73
59	51,46	23,22	8,32	2,16	3,73	2,78	0,80	0,90	0,22	0,14	6,06	99,79
68	61,17	19,20	3,50	1,46	1,88	3,70	4,65	0,48	0,25	0,10	3,47	99,86
70	59,65	22,67	4,03	1,14	1,75	2,66	3,54	0,66	0,10	0,05	3,83	100,08
72	60,29	15,37	7,42	2,45	1,81	4,10	3,54	0,64	0,22	0,16	3,75	99,75
76	57,08	20,70	2,63	1,51	4,32	2,36	4,17	0,32	0,24	0,07	6,31	99,71
77	60,05	22,48	3,17	0,82	0,75	2,66	4,42	0,46	0,18	0,03	4,72	99,74
79	55,21	26,94	3,30	0,62	0,20	1,49	4,54	0,46	0,23	0,02	6,66	99,67
82	63,87	18,04	3,75	2,34	3,31	2,59	1,16	0,30	0,25	0,13	4,11	99,85
84	59,06	21,26	5,15	1,35	0,58	3,66	3,99	0,66	0,16	0,06	3,85	99,78

Pela análise da composição química das diversas amostras e, comparando os valores respeitantes às rochas originais com os valores correspondentes aos solos residuais, podem retirar-se as seguintes constatações e consequentes deduções:

- o teor em CaO é superior nos tonalitos, granodioritos e granitos calcoalcalinos e menor nos granitos com tendência alcalina; a percentagem de CaO desce consideravelmente nos solos residuais, porque se trata do catião mais móvel, cujo comportamento está intimamente ligado à degradação das plagioclases no processo de meteorização;
- no somatório dos óxidos Na₂O + K₂O, nota-se também uma tendência para uma diminuição, nem sempre generalizada e não tão acentuada como no elemento anteriormente referido; estes óxidos representam grosso modo os feldspatos alcalinos, que habitualmente oferecem maior resistência à meteorização química, para além de que, frequentemente, fazem-se representar por fenocristais na rocha-mãe que subsistem pouco alterados no solo residual;
- a sílica, SiO₂, diminui claramente da rocha sã para o solo residual;
- a alumina, Al₂O₃, aumenta nos solos residuais, facto que não significa que o óxido de alumínio tenha aumentado proporcionalmente, mas que, em relação aos outros óxidos mais móveis e que durante o processo de meteorização foram mais ou menos intensamente removidos, a percentagem relativa final de alumina é superior; chama-se também a atenção, para que, nos valores de alumina referentes aos solos residuais, podem distinguir-se dois grupos:
 - i) Al₂O₃ > 21% => solos que se formaram a partir de rochas graníticas ou granítóides que ocorrem em regiões de relevo mais acidentado, nomeadamente, os solos do NE Alentejano como a Serra de S. Mamede e zonas limítrofes, (amostras 53, 55, 58, 77, 79 e 84); e os solos de regiões com relevo ondulado típico das zonas de Montemor-o-Novo, de Arraiolos, de S. Gregório-Vimieiro, do Ervedal e de St^a. Eulália, (amostras 41, 42, 43, 44, 52, 59 e 70), locais onde a drenagem é mais desenvolvida favorecendo uma maior lixiviação dos elementos mais móveis (Ca,Na,K);

- ii) $\text{Al}_2\text{O}_3 < 21\% \Rightarrow$ solos de alteração de regiões mais aplanadas ou de depressão, de que são exemplos os solos do Monte das Flores (Évora), do Redondo, de Fronteira, de Elvas, da Vidigueira, de Pias e de Reguengos de Monsaraz, (amostras 1, 15, 48, 68, 72, 76 e 82), locais onde a drenagem é limitada pelos menores declives;
- o Fe_2O_3 tende a aumentar nos produtos de alteração, sendo mais notório nos solos cuja rocha-mãe é uma rocha intermédia (granodiorito e quartzodiorito);
 - a tendência geral do TiO_2 é, também, para aumentar ligeiramente nos solos residuais;
 - relativamente ao P_2O_5 e MnO , estes óxidos apresentam flutuações na variação, ou seja, tanto podem aumentar como diminuir, em percentagem relativa, nos produtos de alteração *versus* rocha-mãe, o que possivelmente se deve aos diferentes ambientes de meteorização a que foram sujeitas as rochas;
 - o MgO ocorre em quantidades vestigiais, (< 200 ppm), nos granitos, principalmente nos tipos com tendência alcalina, mas nos solos residuais essa percentagem aumenta consideravelmente, talvez porque se fixe e concentre nos produtos de alteração, como é o caso dos minerais argilosos;
 - a P.R. (perda ao rubro), é significativa nos solos residuais porque está directamente relacionada com a água estrutural, cuja percentagem aumenta com o aparecimento de minerais secundários de neoformação, que são essencialmente filossilicatos hidratados; é importante salientar que, quanto mais avançado é o estado de alteração do solo residual, (ver índices de alteração), maior é a quantidade de água retida nas estruturas dos minerais secundários de neoformação.

4.3 – Relações entre os elementos químicos maiores sob a forma de óxidos

O Quadro 4.3 apresenta as relações entre os elementos maiores, sob a forma de óxidos, no solo residual e na rocha-mãe. Short (1961), assumindo que o óxido de Al é constante durante a alteração, sugere um factor correctivo que se multiplica pelas percentagens dos outros óxidos, tendo como objectivo reduzir os efeitos das variações relativas (Quadro 4.4).

Quadro 4.3 – Valores das razões entre elementos maiores sob a forma de óxidos no solo residual (s.r.) e na rocha sã (r.s).

Amostras	Al_2O_3 (s.r.)	SiO_2 (s.r.)	Fe_2O_3 (s.r.)	CaO (s.r.)	MgO (s.r.)	Na_2O (s.r.)	K_2O (s.r.)	TiO_2 (s.r.)	MnO (s.r.)	P_2O_5 (s.r.)
	Al_2O_3 (r.s.)	SiO_2 (r.s.)	Fe_2O_3 (r.s.)	CaO (r.s.)	MgO (r.s.)	Na_2O (r.s.)	K_2O (r.s.)	TiO_2 (r.s.)	MnO (r.s.)	P_2O_5 (r.s.)
1	1,25	0,87	1,73	0,79	5,35	1,02	1,04	1,68	1,67	1,31
15	1,15	0,90	1,45	0,64	1,23	0,74	0,88	1,36	1,08	1,21
41	1,54	0,82	1,78	1,29	–	1,37	0,81	1,79	0,80	0,75
42	1,56	0,82	2,11	1,02	–	1,05	0,83	2,43	0,60	0,58
43	1,55	0,79	2,59	1,07	6,58	0,98	0,64	2,61	1,20	0,91
44	1,25	0,87	1,31	1,00	1,23	0,86	0,67	1,41	0,92	1,36
48	1,01	1,01	0,78	0,39	1,52	0,80	3,32	1,13	0,75	0,87
52	1,32	0,96	0,67	0,40	0,58	1,19	0,90	0,88	0,38	0,83
53	1,67	0,83	1,18	0,10	–	0,74	1,07	0,93	0,50	0,49
55	2,11	0,75	1,65	0,03	–	0,03	0,98	1,50	0,50	0,30
58	1,78	0,84	1,32	0,05	–	13,00	1,10	1,18	0,33	0,16
59	1,24	0,85	1,47	0,64	1,13	0,71	0,80	1,73	0,93	1,05
68	1,28	0,86	4,93	6,27	–	1,03	0,85	6,86	2,00	1,14
70	1,47	0,85	2,41	1,11	7,60	0,72	0,72	2,44	1,25	0,83
72	0,94	0,90	2,09	0,61	2,55	0,94	1,16	1,64	2,29	1,69
76	1,38	0,80	1,21	3,51	4,87	0,73	0,94	1,19	1,00	1,20
77	1,44	0,87	1,21	0,42	2,00	0,70	1,13	1,18	0,50	0,78
79	2,07	0,74	2,14	0,39	–	0,46	0,99	3,29	0,50	1,44
82	1,08	0,93	1,80	1,66	5,71	0,59	0,36	1,07	2,17	1,67
84	1,31	0,86	1,65	1,49	2,29	1,17	0,84	1,61	1,50	0,73

Quadro 4.4 – Valores das razões entre elementos maiores sob a forma de óxidos no solo residual (s.r.) e na rocha sã (r.s), depois de corrigidos (Short, 1961).

Amostras	Al ₂ O ₃ (s.r.)	SiO ₂ (s.r.)	Fe ₂ O ₃ (s.r.)	CaO(s.r.)	MgO(s.r.)	Na ₂ O(s.r.)	K ₂ O(s.r.)	TiO ₂ (s.r.)	MnO(s.r.)	P ₂ O ₅ (s.r.)
	Al ₂ O ₃ (r.s.)	SiO ₂ (r.s.)	Fe ₂ O ₃ (r.s.)	CaO(r.s.)	MgO(r.s.)	Na ₂ O(r.s.)	K ₂ O(r.s.)	TiO ₂ (r.s.)	MnO(r.s.)	P ₂ O ₅ (r.s.)
1	0,80	0,70	1,39	0,64	4,29	0,82	0,83	1,35	1,34	1,05
15	0,87	0,78	1,26	0,56	1,07	0,64	0,76	1,18	0,94	1,05
41	0,65	0,53	1,15	0,83	—	0,89	0,52	1,16	0,52	0,49
42	0,64	0,53	1,35	0,65	—	0,68	0,54	1,56	0,39	0,37
43	0,64	0,51	1,67	0,69	4,24	0,63	0,41	1,68	0,77	0,59
44	0,80	0,70	1,05	0,80	0,99	0,69	0,54	1,13	0,74	1,09
48	0,99	1,00	0,78	0,38	1,51	0,79	3,29	1,11	0,74	0,86
52	0,76	0,72	0,51	0,30	0,44	0,90	0,68	0,66	0,29	0,62
53	0,60	0,50	0,71	0,06	—	0,45	0,64	0,56	0,30	0,29
55	0,47	0,35	0,78	0,01	—	0,01	0,46	0,71	0,24	0,14
58	0,56	0,47	0,74	0,03	—	7,32	0,62	0,66	0,19	0,09
59	0,81	0,68	1,18	0,52	0,91	0,57	0,65	1,40	0,75	0,85
68	0,78	0,67	3,86	4,90	—	0,81	0,67	5,36	1,56	0,89
70	0,68	0,58	1,65	0,76	5,18	0,49	0,49	1,67	0,85	0,57
72	1,07	0,96	2,23	0,65	2,72	1,00	1,24	1,75	2,44	1,81
76	0,73	0,58	0,88	2,55	3,54	0,53	0,68	0,86	0,73	0,87
77	0,69	0,60	0,84	0,29	1,39	0,48	0,79	0,82	0,35	0,54
79	0,48	0,36	1,04	0,19	—	0,22	0,48	1,59	0,24	0,70
82	0,93	0,86	1,67	1,54	5,30	0,55	0,34	0,99	2,01	1,55
84	0,76	0,66	1,26	1,14	1,75	0,89	0,64	1,23	1,15	0,56

Pela análise dos valores patentes no Quadro 4.3, podem constatar-se alguns factos que fortalecem determinados raciocínios que se apresentam em seguida.

- O alumínio é o elemento menos móvel, o que está de acordo com os diversos estudos sobre alteração de granitos e restantes granítóides constantes na bibliografia; tal facto levou a maioria dos autores a assumir que o alumínio permanecia imóvel durante a meteorização nas respectivas propostas de índices de alteração (Reiche, 1943; Ruxton, 1968; Parker, 1970; Roaldset, 1972 *in* Chittleborough, 1991; Vogel, 1975; Nesbitt & Young, 1982; Harnois & Moore, 1988, etc.); deste modo, a alumina, Al₂O₃, é usada frequentemente como ponto de referência no estudo da mobilidade dos restantes óxidos.
- Pode dizer-se, que à medida que a alteração progride, o silício vai sendo lixiviado; não é uma variação linear, obviamente, pois depende da percentagem de sílica existente nas rochas originais, e principalmente, do percurso de alteração que se reflecte no conteúdo de sílica nas amostras dos respectivos solos residuais; a sílica, SiO₂, encontra-se fundamentalmente no quartzo, nos feldspatos, nas micas, nos minerais argilosos e eventualmente alguma pode encontrar-se no estado coloidal.
- A tendência geral é a da percentagem relativa de Fe₂O₃ aumentar nas amostras de solo residual, o que, naturalmente, está relacionado com os minerais secundários formados durante a alteração a partir de minerais como a biotite e outros minerais ferromagnesianos; assim as maiores percentagens deste óxido de ferro ocorrem nos solos de alteração de tonalitos e granitos com percentagens significativas de biotite.
- O grande acréscimo de MgO em determinadas amostras de solo residual, pode estar relacionado com o estado pouco evoluído do solo (preservação de algumas biotites), ou com a cloritização parcial ou total deste mineral. O referido óxido predomina, naturalmente, em solos que se formaram a partir de rochas intermédias, com afinidades calco-alcalinas; por outro lado, nas rochas alcalinas, ocorre em quantidades vestigiais. Este aumento, também pode ser explicado pela ocorrência de minerais de

argila que são silicatos hidratados de Al e Mg, principalmente do grupo das vermiculites, nos referidos solos.

- Há uma tendência clara da diminuição do valor da relação do CaO (s.r.)/CaO (r.s.) em meio ácido, ou seja, em maciços de tendência alcalina; as excepções verificam-se quando subsistem vestígios de plagioclase, designadamente anortite, nos solos residuais, como é o caso de alguns solos pouco evoluídos.
- A tendência do Na₂O é decrescer com o progresso da meteorização, pois o catião Na é um dos mais móveis juntamente com o Ca. O aumento relativo desta percentagem em alguns solos residuais, está possivelmente relacionada com a preservação da albite em certos casos e com o aparecimento de argilas do grupo da esmectite noutras casas; ocorrências que têm como factores principais as condições de meteorização, menos alteração física/química no primeiro caso e, ambientes redutores na segunda situação.
- O K₂O é o que diminui mais em termos relativos no número de amostras analisadas, apesar deste não ser suficiente para tirar conclusões com significado estatístico; mas essa variação não apresenta oscilações tão grandes como nos dois óxidos anteriores (Na₂O e CaO), constituindo assim um bom indicador da alteração dos granítóides em geral; a sua diminuição nos solos residuais está relacionada com a alteração do feldspato potássico, enquanto o seu aumento corresponde à preservação das moscovites e da ortoclase quando a meteorização química não é acentuada e, ao aparecimento de minerais argilosos do grupo da ilite, cuja formação é favorecida em ambientes alcalinos onde existem concentrações elevadas de Al e K.
- O titânio, sob a forma de TiO₂, tem tendência para permanecer como elemento residual; isto é, excepto raros desvios, a tendência é para a relação crescer com o grau de alteração. Ou seja, a seguir ao alumínio, o titânio é o elemento menos móvel, para a grande maioria das amostras.

Pelo que foi referido, pode concluir-se que os elementos mais lixiviados são Ca, Na e K, apresentando oscilações relativas entre eles, seguidos por ordem decrescente de mobilidade por Si, Ti e Al.

4.4 – Índices de variação química

Nos Quadros 4.5 e 4.6 apresentam-se os valores obtidos a partir da aplicação, às amostras seleccionadas, de alguns índices de alteração química simples, propostos por autores que se dedicaram ao estudo da alteração de granítóides. Estes índices baseiam-se em relações entre as percentagens ponderais dos óxidos que, segundo os mesmos autores, as respectivas variações, melhor reflectem a mobilidade dos elementos durante o processo de meteorização.

A relação SiO₂/Al₂O₃ é a mais utilizada por variadíssimos autores para estudar a alteração de rochas graníticas (s.l.), pois reflecte a perda de sílica total em relação à alumina, tratando-se de um dado adquirido, inerente à meteorização deste tipo de rochas. A comprovar esta tendência geral nas amostras estudadas, estão os valores que constam na segunda coluna do Quadro 4.7, tratando-se o referido quociente s.r./r.s., de um bom indicador da alteração química para estes solos. De salientar que, relativamente à referida relação aplicada ao horizonte de solo residual, (segunda coluna do Quadro 4.6), e segundo Pedro (1964a, 1966) e Tardy (1968, 1969) *in* Gomes (1988), podemos concluir que a bissialitização foi o processo de meteorização que predominou na formação dos produtos secundários residuais.

Os índices utilizados por Irfan (1996), constantes nas colunas (3) e (4) do Quadro 4.7, não parecem constituir indicadores tão bons como o índice anteriormente referido, para o tipo de

alteração verificada nas rochas que deram origem aos solos residuais estudados, principalmente devido às oscilações de valores, relacionadas com flutuações da percentagem dos óxidos, já explicadas anteriormente.

Por outro lado, o índice de lixiviação β (Jenny, 1941), constitui um bom indicador do tipo de alteração verificada nos maciços em foco, pelo que se conclui que a transformação dos feldspatos predomina nestes processos de alteração.

Quadro 4.5 – Índices de variação química na rocha sã (r.s.).

Amostras	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})}$	$\frac{(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{SiO}_2}{(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)}$	(1)
1	4,57	1,90	2,49	0,53	4,07	0,57
15	3,59	2,85	2,28	0,35	2,75	0,53
41	4,61	1,92	2,90	0,52	4,30	0,55
42	4,61	1,92	2,90	0,52	4,30	0,55
43	5,02	1,68	3,11	0,60	4,31	0,56
44	3,50	2,84	2,02	0,35	2,66	0,59
48	3,29	3,77	1,94	0,27	2,58	0,51
52	3,38	2,93	1,99	0,34	2,54	0,59
53	4,78	1,86	3,93	0,54	4,33	0,48
55	5,51	1,66	3,51	0,60	4,92	0,54
58	6,03	2,29	11,16	0,44	5,41	0,43
59	3,24	3,81	1,93	0,26	2,49	0,51
68	4,74	1,66	3,86	0,60	4,53	0,57
70	4,52	1,81	2,95	0,55	4,08	0,58
72	4,09	2,21	2,24	0,45	3,36	0,56
76	4,75	1,96	3,37	0,51	4,15	0,52
77	4,42	2,02	2,79	0,49	3,79	0,52
79	5,70	1,67	3,48	0,60	5,09	0,55
82	4,12	2,22	2,64	0,45	3,66	0,51
84	4,20	2,06	4,61	0,49	3,53	0,42

Quadro 4.6 – Índices de variação química nos solos residuais (s.r.).

Amostras	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})}$	$\frac{(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{SiO}_2}{(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)}$	(1)
1	3,20	2,30	3,24	0,43	2,73	0,44
15	2,80	4,08	3,86	0,24	2,02	0,31
41	2,45	2,70	3,31	0,37	2,26	0,37
42	2,44	3,16	4,32	0,32	2,22	0,30
43	2,56	3,33	4,86	0,30	2,00	0,27
44	2,43	4,56	2,67	0,22	1,83	0,40
48	3,29	2,94	3,52	0,34	2,71	0,42
52	2,44	3,64	3,74	0,27	2,09	0,32
53	2,37	3,33	9,68	0,30	2,21	0,24
55	1,95	6,15	284,10	0,16	1,78	0,12
58	2,85	3,63	123,28	0,28	2,62	0,23
59	2,22	6,49	3,57	0,15	1,63	0,26
68	3,19	2,30	3,44	0,43	2,69	0,45
70	2,63	3,66	5,14	0,27	2,23	0,30
72	3,92	2,01	2,60	0,50	2,65	0,45
76	2,76	3,17	3,10	0,32	2,45	0,42
77	2,67	3,18	6,59	0,31	2,34	0,29
79	2,05	4,47	15,94	0,22	1,83	0,19
82	3,54	4,81	3,06	0,21	2,93	0,37
84	2,78	2,78	5,01	0,36	2,24	0,32

Quadro 4.7 – Índices de alteração química simples.

Amost.	(2)	(3)	(4)	β	(5)	DECHAF
1	0,70	1,21	1,30	0,83	0,67	0,76
15	0,78	1,43	1,69	0,70	0,74	0,58
41	0,53	1,40	1,14	0,71	0,53	0,68
42	0,53	1,64	1,49	0,61	0,52	0,55
43	0,51	1,98	1,56	0,50	0,47	0,48
44	0,70	1,61	1,32	0,62	0,69	0,67
48	1,00	0,78	1,82	1,28	1,05	0,83
52	0,72	1,24	1,88	0,80	0,82	0,54
53	0,50	1,79	2,46	0,56	0,51	0,50
55	0,35	3,72	80,87	0,27	0,36	0,22
58	0,47	1,58	11,05	0,63	0,48	0,53
59	0,68	1,70	1,85	0,59	0,66	0,50
68	0,67	1,38	0,89	0,72	0,60	0,79
70	0,58	2,02	1,74	0,49	0,55	0,51
72	0,96	0,91	1,16	1,10	0,79	0,81
76	0,58	1,61	0,92	0,62	0,59	0,81
77	0,60	1,57	2,36	0,64	0,62	0,55
79	0,36	2,68	4,58	0,37	0,36	0,34
82	0,86	2,17	1,16	0,46	0,80	0,72
84	0,66	1,35	1,09	0,74	0,63	0,75

$$(1) = \frac{\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+}$$

$$(2) = \frac{\text{SiO}_2 \text{ s.r.}}{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad \left| \frac{\text{SiO}_2 \text{ r.s.}}{\text{Al}_2\text{O}_3} \right.$$

$$(3) = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \text{ s.r.}}{\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \text{ r.s.}}$$

$$(4) = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) \text{ s.r.}}{\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) \text{ r.s.}}$$

$$\beta = \frac{(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ s.r.}}{(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ r.s.}} \quad \text{Índice de Lixiviação (Jenny, 1941)}$$

$$(5) = \frac{\text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \text{ s.r.}}{\text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \text{ r.s.}} \quad (\text{adap. Aires de Barros, 1979})$$

$$\text{DECHAF} = \frac{\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ s.r.}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+} \quad (\text{Miura, 1973})$$

$$\text{DECHAF} = \frac{\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ r.s.}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+}$$

DECHAF = " degree of chemical absolute freshness"

Em relação aos valores aparentemente “anómalos” de β da amostra 48 e 72 adianta-se uma possível explicação. A suposição de que a alumina permanece estável durante a meteorização, pode não ser justificável em primeira análise. Recentemente, tem-se descoberto que o movimento da água através do perfil de alteração pode deslocar lentículas microscópicas de aluminosilicatos, dos níveis mais superficiais para níveis mais profundos situados junto à rocha-mãe. Como consequência disso, o solo residual pode mostrar-se “menos alterado” do que a rocha original, quando são usados os índices mais comuns que utilizam a alumina como sendo praticamente imóvel (Chittleborough, 1991).

O índice apresentado na coluna (5) do Quadro 4.7, constitui um bom indicador da remoção relativa da sílica nos solos residuais quando comparada com dois dos elementos químicos mais estáveis, o alumínio e o ferro. É conveniente referir que Aires-Barros (1979) ao propor este índice, incluiu também o Fe no estado reduzido que, no caso concreto das amostras abrangidas no presente estudo, se considerou desprezível relativamente à forma oxidada do mesmo elemento.

Finalmente, o índice DECHAF, proposto por Miura (1973), constitui o índice que melhor representa a meteorização nos maciços rochosos estudados. Em primeiro lugar, porque considera um maior número de elementos móveis que podem ser removidos durante a meteorização; este pressuposto é favorável ao tipo de amostras alvo, porque engloba rochas com uma variação petrogeoquímica significativa: granitos alcalinos, granitos calcoc-alcalinos, granodioritos e tonalitos. Em segundo lugar, porque considera como eventuais elementos remanescentes nos produtos de alteração, para além dos óxidos mais estáveis, Al_2O_3 e Fe_2O_3 , a H_2O^+ , que no caso presente, é considerada grosso modo como a percentagem de perda ao rubro, uma vez que os solos estudados não possuem outros voláteis, tais como sulfuretos, matéria orgânica, etc. Esta segunda razão, é importante porque, como se pode constatar no Quadro 4.2, os valores da perda ao rubro são consideráveis nos solos residuais estudados, o

que é lógico tendo em conta o aparecimento de minerais de neoformação, particularmente minerais argilosos que devido à sua cristaloquímica podem reter quantidades consideráveis de moléculas de água.

4.5 – Indicadores de meteorização a partir de razões moleculares

Reiche (1943) refere que: “sendo as análises químicas apresentadas em percentagens ponderais dos óxidos dos catiões metálicos, para fins comparativos, é preferível utilizar as razões moleculares que se obtêm, dividindo as percentagens ponderais pelas somas dos pesos atómicos dos elementos que a molécula representa, uma vez que a não utilização das razões moleculares dilui as variações dos elementos”. Segundo esta linha de pensamento, apresentam-se nos Quadros 4.8 e 4.9, algumas razões moleculares mais comuns, aplicadas para a rocha sã e para o solo residual, respectivamente.

Quadro 4.8 – Razões moleculares na rocha sã.

Amostras	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{K}_2\text{O}}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$	$\frac{\text{SiO}_2}{(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})}$
1	7,75	98,13	29,72	36,16	16,58	11,37
15	6,10	31,01	33,04	12,97	20,62	7,96
41	7,82	167,82	28,79	56,46	17,68	13,46
42	7,82	167,82	28,79	56,46	17,68	13,46
43	8,52	80,11	23,38	73,46	20,07	15,77
44	5,93	29,68	35,02	10,88	18,38	6,84
48	5,58	31,51	98,50	10,14	15,96	6,20
52	5,73	27,20	35,70	10,18	18,10	6,51
53	8,11	122,52	24,30	167,80	21,63	19,16
55	9,36	121,28	25,13	210,38	21,86	19,80
58	10,23	140,10	21,73	63,39	7776,12	62,87
59	5,50	28,51	95,34	9,75	16,00	6,06
68	8,04	266,50	20,48	221,50	20,46	18,73
70	7,67	111,20	22,40	41,54	19,64	13,33
72	6,93	50,16	34,44	21,06	15,85	9,04
76	8,06	87,44	25,27	54,17	22,80	16,05
77	7,50	70,22	27,72	36,16	18,67	12,31
79	9,66	128,16	25,37	135,91	23,64	20,14
82	6,98	88,08	33,77	32,33	16,31	10,84
84	7,13	57,97	22,49	163,39	22,50	19,78

A razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, baseia-se na hipótese de que a diminuição da sílica é correlacionável com a remoção dos catiões móveis e com o aumento da água de hidratação durante o processo de meteorização (Ruxton, 1968). Esta relação é recomendada para ambientes onde seja permitida a drenagem livre da água, especialmente para rochas ácidas ou intermédias, onde é provável encontrar minerais do grupo da ilite e do grupo da caulinita nos produtos de alteração. Aplicando esta razão à rocha sã (Quadro 4.8) e respectivos solos residuais (Quadro 4.9), confirma tratar-se de um bom índice de alteração para os maciços estudados, no que se refere aos diferentes tipos de rocha e às condições climatéricas em que actualmente se encontram.

As restantes colunas dos referidos quadros apresentam valores para as amostras em questão, obtidos a partir de razões moleculares utilizadas por Furtado (1982) em granitos do NW de Portugal. Confirma-se a exportação regular da sílica quando comparada com elementos menos móveis como é o caso do Fe; constituindo também um bom indicador do estado de

alteração nos tipos de solos estudados. Salienta-se, no entanto, uma menor variação desta razão nos granodioritos e tonalitos *versus* granitos, facto que é justificado pela maior percentagem de Fe_2O_3 existente nos produtos de alteração daquelas rochas.

Os resultados referentes à razão $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ mostram um equilíbrio nos valores, sendo as variações pouco significativas, embora o potássio pareça ser menos exportado relativamente ao silício.

No que respeita às razões SiO_2/CaO e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, verificam-se aumentos importantes na direcção da maioria dos solos residuais; embora essa variação seja mais acentuada na razão SiO_2/CaO , especialmente nas rochas graníticas com tendência alcalina, o que parece corresponder a uma maior mobilidade do cálcio relativamente ao sódio. A correspondência entre a alcalinidade das rochas originais e a velocidade de remoção dos catiões Ca e Na, torna-se mais evidente na razão $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ rocha *sã* *versus* solo residual.

Quadro 4.9 – Razões moleculares nos solos residuais.

Amostras	SiO_2	SiO_2	SiO_2	SiO_2	SiO_2	SiO_2
	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	$(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$
1	5,43	49,60	24,97	39,89	14,14	10,44
15	4,76	19,22	33,74	18,13	25,22	10,55
41	4,16	77,37	29,23	36,05	10,60	8,19
42	4,14	65,67	28,43	45,75	13,84	10,63
43	4,34	24,46	29,00	54,50	16,29	12,54
44	4,13	19,64	45,21	9,49	18,58	6,28
48	5,58	40,54	29,93	26,44	20,19	11,45
52	4,15	38,82	37,78	24,23	14,58	9,10
53	4,03	85,98	18,78	1388,93	24,08	23,67
55	3,31	54,81	19,20	5177,76	635,83	566,29
58	4,83	88,85	16,54	1179,46	501,37	351,82
59	3,76	16,44	100,84	12,88	19,09	7,69
68	5,41	46,45	20,62	30,37	17,05	10,92
70	4,46	39,34	26,42	31,81	23,13	13,39
72	6,66	21,59	26,70	31,09	15,17	10,19
76	4,68	57,68	21,46	12,33	24,95	8,25
77	4,53	50,34	21,30	74,72	23,29	17,75
79	3,48	44,46	19,06	257,63	38,22	33,28
82	6,01	45,26	86,32	18,01	25,44	10,54
84	4,71	30,48	23,20	95,03	16,64	14,16

Partindo do princípio que a lixiviação de SiO_2 , Na_2O , CaO e MgO , com o avanço da meteorização do granito é mais evidente quando comparada com a lixiviação de Al_2O_3 ou K_2O , as razões moleculares indicadas no Quadro 4.10, podem ser usadas como índices de alteração química (Onodera *et al.*, 1974).

Os valores correspondentes à razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ na rocha *sã* *versus* solo residual, variam num sentido ou no outro consoante o tipo de feldspato predominante na rocha-mãe, embora se notem maiores variações no caso do sódio. O estado de evolução do solo também tem influência, isto é, sendo o feldspato potássico mais estável do que o feldspato calco-sódico ou plagioclase, é natural que nos solos mais imaturos, o valor daquela razão diminua relativamente à rocha-mãe. A moscovite remanescente também pode contribuir para o decréscimo do valor dessa razão em alguns solos, juntamente com a ilite.

Quadro 4.10 – Razões moleculares utilizadas como índices de alteração química (Onodera *et al.*, 1974).

Amostras	Na ₂ O / K ₂ O		Al ₂ O ₃ / (SiO ₂ + Al ₂ O ₃)		(Na ₂ O + K ₂ O + CaO + MgO) / Al ₂ O ₃	
	r.s.	s.r.	r.s.	s.r.	r.s.	s.r.
1	1,79	1,77	0,11	0,16	0,98	0,90
15	1,60	1,34	0,14	0,17	1,22	0,88
41	1,63	2,76	0,11	0,19	0,85	0,69
42	1,63	2,05	0,11	0,19	0,85	0,57
43	1,16	1,78	0,10	0,19	0,94	0,64
44	1,91	2,43	0,14	0,19	1,39	1,09
48	6,17	1,48	0,15	0,15	1,18	1,02
52	1,97	2,59	0,15	0,19	1,43	0,74
53	1,12	0,78	0,11	0,20	0,76	0,40
55	1,15	0,03	0,10	0,23	0,84	0,19
58	0,00	0,03	0,09	0,17	0,63	0,36
59	5,96	5,28	0,15	0,21	1,22	0,76
68	1,00	1,21	0,11	0,16	0,82	0,95
70	1,14	1,14	0,12	0,18	0,94	0,63
72	2,17	1,76	0,13	0,13	1,12	1,31
76	1,11	0,86	0,11	0,18	0,87	0,97
77	1,48	0,91	0,12	0,18	0,95	0,56
79	1,07	0,50	0,09	0,22	0,86	0,35
82	2,07	3,39	0,13	0,14	0,91	0,97
84	1,00	1,39	0,12	0,18	0,77	0,70

Os resultados obtidos para as relações alumina *versus* (alumina + sílica) e (alcalis + alcalinoterrosos) *versus* alumina, confirmam uma diminuição generalizada dos elementos menos estáveis nos solos residuais relativamente às respectivas rochas originais. As maiores ou menores variações podem reflectir o estado de maturidade do solo. Quando a lixiviação de SiO₂, Na₂O, K₂O, CaO e MgO não é considerável, significa que a alteração química é imatura quando comparada com a alteração física (desagregação mecânica) da rocha provocada pela percolação da água (Onodera *et al.*, 1974). Deste modo, estas duas relações constituem bons indicadores para o tipo de meteorização destas rochas.

4.6 – Análise das tendências da evolução geoquímica da meteorização

Uma das finalidades da maioria dos índices é a quantificação da intensidade de meteorização. Daí que, frequentemente, se atribuam graus de alteração no estudo de perfis de alteração. Mas no caso presente, que tem como principal objecto de estudo os solos residuais de rochas ígneas ácidas e intermédias, tem interesse a aplicação destes índices nos seus termos extremos, rocha sã e solo residual; por forma a ter uma ideia do distanciamento geoquímico do solo relativamente à rocha, ou por outras palavras, ter-se a noção da maturidade geoquímica do solo.

4.6.1 – Índices de meteorização

Nos Quadros 4.11 e 4.12, constam os valores resultantes da aplicação de alguns índices de meteorização, calculados a partir dos pesos moleculares, frequentemente utilizados no estudo da alteração de rochas graníticas (s.l.).

Os índices de meteorização química calculados a partir dos pesos moleculares, aplicados nos referidos quadros apresentam-se de seguida:

$$WPI = \frac{100 (K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O)}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + FeO)} \quad \text{Weathering Potential Index (Reiche, 1943)}$$

$$PI = \frac{100 SiO_2}{SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 + FeO} \quad \text{Product Index ou Weathering direction (Reiche, 1943)}$$

$$WI = \frac{WPI \text{ s.r.}}{WPI \text{ r.s.}} \quad \text{Weathering Index (Short, 1961)}$$

$$MWPI = \frac{100 (K_2O + Na_2O + CaO + MgO)}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)} \quad \text{Modified Weathering Potential Index (Vogel, 1975)}$$

$$CIW = \frac{100 Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O} \quad \text{Chemical Index of Weathering (Harnois & Moore, 1988)}$$

$$CIA = \frac{100 Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \quad \text{Chemical Index of Alteration (Nesbitt & Young, 1982)}$$

$$V = \frac{Al_2O_3 + K_2O}{MgO + CaO + Na_2O} \quad \text{Vogt Ratio (Vogt, 1927; Roaldset, 1972 in Chittleborough, 1991)}$$

$$I_{mob} = \frac{Mob_r - Mob_w}{Mob_r} \quad \begin{aligned} Mob_r &= (CaO + Na_2O + K_2O) \text{ (rocha sã)} \\ Mob_w &= (CaO + Na_2O + K_2O) \text{ (solo residual)} \end{aligned} \quad \text{Mobiles Index (Irfan, 1996)}$$

$$IA = ((2 Na_2O/0,35) + (MgO/0,9) + (2K_2O/0,25) + (CaO/0,7)) \cdot 100 \quad \text{Índice de Alteração (Parker, 1970)}$$

$$R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad \text{Ruxton Ratio (Ruxton, 1968)}$$

Quadro 4.11 – Índices de meteorização na rocha sã (r.s.).

Amostras	WPI	PI	MWPI	CIW	CIA	V	IA
1	8,12	87,58	9,99	59,46	51,48	1,75	77,72
15	10,49	83,11	14,36	56,62	51,26	1,14	70,04
41	7,35	88,08	8,77	63,26	53,98	2,19	75,04
42	7,35	88,08	8,77	63,26	53,98	2,19	75,04
43	6,36	88,26	8,89	64,90	52,48	2,37	76,72
44	13,73	82,61	16,29	53,54	49,09	0,96	74,45
48	13,15	82,12	14,90	52,61	51,09	0,94	63,43
52	14,45	81,95	17,06	53,20	49,01	0,92	75,00
53	3,79	88,27	7,62	70,25	56,90	3,15	72,05
55	5,29	89,60	7,49	67,91	54,21	2,90	72,61
58	0,04	90,37	5,31	86,00	61,21	9,04	49,12
59	13,63	81,75	15,45	52,40	50,86	0,91	64,72
68	5,26	88,59	8,31	69,95	54,88	3,24	80,15
70	7,52	87,54	9,73	63,49	52,15	2,24	79,78
72	10,68	85,58	12,15	56,61	50,82	1,31	76,31
76	6,22	87,84	8,71	66,58	54,92	2,38	71,39
77	6,09	86,82	9,90	62,14	53,20	1,88	73,91
79	5,43	89,87	7,42	67,57	53,74	2,88	70,15
82	7,41	86,39	10,17	60,82	54,03	1,71	73,57
84	1,80	86,06	8,53	73,49	59,60	2,91	71,90

Quadro 4.12 – Índices de meteorização avaliados no solo residual (s.r.).

Amostras	WPI	PI	WI	WWPI	MWPI	CW	CIA	V	I _{mob}	IA
1	0,37	82,69	0,04	0,94	12,08	65,78	57,55	1,79	0,02	81,79
15	-8,68	78,56	-0,83	0,95	12,82	68,92	62,82	1,54	0,28	56,64
41	-1,83	79,60	-0,25	0,90	11,72	66,31	60,59	2,08	-0,18	84,93
42	-6,01	79,30	-0,82	0,90	9,90	71,96	65,13	2,69	0,02	72,57
43	-11,50	78,00	-1,81	0,88	10,39	74,27	66,84	2,34	0,15	64,35
44	0,91	76,55	0,07	0,93	17,02	60,34	57,19	1,09	0,10	63,96
48	-1,34	82,54	-0,10	1,01	13,14	67,23	59,74	1,43	0,29	68,80
52	-5,47	78,42	-0,38	0,96	12,29	68,69	63,88	1,77	0,28	67,33
53	-14,26	79,27	-3,76	0,90	7,32	85,45	72,21	6,52	0,15	66,26
55	-31,24	75,64	-5,90	0,84	4,13	99,42	84,86	74,95	0,56	39,63
58	-16,43	81,93	-440,35	0,91	5,79	98,65	76,57	18,57	0,14	53,55
59	-12,34	74,63	-0,90	0,91	13,24	67,16	65,52	1,43	0,33	47,88
68	-0,98	82,48	-0,19	0,93	12,71	66,89	56,91	1,84	-0,18	82,42
70	-5,23	79,51	-0,70	0,91	10,14	75,00	66,56	2,54	0,20	62,19
72	-0,81	83,02	-0,08	0,97	14,08	60,50	52,57	1,18	0,13	79,23
76	-11,20	80,95	-1,80	0,92	14,41	63,82	56,02	1,62	-0,32	72,34
77	-10,11	80,24	-1,66	0,92	9,06	79,66	68,11	3,49	0,23	66,23
79	-21,41	75,97	-3,94	0,85	7,04	90,54	77,71	7,27	0,31	54,51
82	-3,96	83,89	-0,53	0,97	11,93	63,70	61,00	1,19	0,19	48,61
84	-4,97	79,79	-2,76	0,93	10,61	75,03	65,11	2,44	-0,03	72,83

Começando pelos valores obtidos para o índice de meteorização potencial – WPI (Reiche, 1943), verifica-se uma diminuição generalizada, como é óbvio, dos valores relativos à rocha sã comparativamente aos respectivos solos residuais, indicando o decréscimo dos catiões móveis e o aumento da água de hidratação. Uma outra observação de interesse é o facto do valor do WPI da rocha sã correspondente aos tonalitos e granodioritos ser, em regra, superior ao valor do WPI dos granitos, considerando também a rocha sã. Este facto traduz a maior aptidão daquelas rochas à meteorização, em condições semelhantes, quando comparadas com os granitos. Um WPI mais elevado é associado a rochas com menor estabilidade face à alteração; à medida que se processa a meteorização, o índice diminui e os produtos de alteração tornam-se mais estáveis no que concerne a posterior alteração (Short, 1961). Deste modo, o WPI revela ser um bom índice para quantificar a intensidade de meteorização.

Reiche (1943) introduz o *Product Index* (ou direcção de meteorização) - PI, que indica essencialmente um decréscimo no conteúdo de sílica. Nenhum dos anteriores índices relaciona a perda total dos elementos calculada com base na hipótese da alumina permanecer constante. Então Short (1961) propõe o índice de alteração – WI, dividindo o índice WPI de qualquer horizonte de solo pelo WPI da rocha-mãe. Acrescenta o autor que o valor de WI varia de 0 a 1, podendo estabelecer-se uma escala arbitrária do grau de meteorização. A maior desvantagem do índice de Short é a existência de valores negativos de WPI para cada horizonte, resultando daí também um WI negativo. O valor negativo de WPI acontece sempre que o número de moles de H_2O é superior ao número de moles de alcalis e alcalino-terrosos na análise, o que é expectável para horizontes evoluídos (Reiche, 1950). Sendo assim, uma vez que o WI é muito sensível à determinação da água de hidratação, no caso presente, este índice tem um significado muito reduzido.

Ao experimentar a razão entre PI (s.r.) e PI (r.s.), verifica-se que os valores mais baixos para esta razão, aqui designada por WWPI, correspondem aos solos mais evoluídos, de acordo com o WPI de Reiche. Esta razão poderia ser tomada como um indicador da intensidade de meteorização relacionada com a velocidade de remoção da sílica.

Vogel (1975) introduziu modificações ao índice de alteração de Reiche, que passou a designar-se por *Modified Weathering Potencial Index* – MWPI (Quadros 4.11 e 4.12). A versão modificada omite a água (daí resultando a vantagem do desaparecimento dos valores negativos), considera o ferro total no seu estado mais oxidado e, é aplicável a uma maior gama de tipos de rochas e de estados de alteração. Observando os resultados obtidos para as amostras em questão, destacam-se dois aspectos mais importantes. Os valores mais elevados, obtidos para este índice na rocha sã, correspondem aos tonalitos, granodioritos e granitos calco-alcalinos. No que respeita aos solos residuais, podem considerar-se duas situações: quando o índice sobe, tal facto pode corresponder a uma degradação dos feldspatos acompanhada por alguma lixiviação da sílica e da alumina; quando o índice desce, os elementos alcalis e alcalino-terrosos decrescem, mas o alumínio cresce consideravelmente, facto que pode ser interpretado como a retenção do alumínio nos minerais secundários formados e ricos em Al, tais como: caulinite, ilite e esmectite.

Da aplicação do CIW – *Chemical Index of Weathering*, proposto por Harnois & Moore (1988), resulta uma tendência geral para o aumento do valor do índice nas amostras de solos residuais, relativamente às amostras de rocha sã correspondentes. Este índice traduz a exportação de cálcio e sódio; assim o distanciamento entre os valores rocha sã *versus* solo residual, reflectem a velocidade de degradação das plagioclases. Parece pois, tratar-se de um bom índice quando se pretende estudar este fenómeno, nos tipos de rochas estudados. É interessante verificar que os valores mais elevados de CIW nos solos residuais, pertencem a amostras resultantes da alteração de rochas com tendência alcalina e/ou que sofreram uma alteração química mais profunda.

Nesbitt & Young (1982) apresentam um trabalho sobre a utilização de um novo índice CIA - *Chemical Index of Alteration* num estudo sobre a influência do clima e paleoclima no tipo de meteorização e produtos finais de várias rochas. Estes autores basearam-se no facto de os feldspatos serem de longe o grupo de minerais mais abundante na crusta terrestre e o mais reactivo; consequentemente, o processo dominante durante a alteração química da zona superficial da crusta passa pela degradação dos feldspatos e a concomitante formação de minerais argilosos. O cálcio, o sódio e o potássio são geralmente removidos a partir dos feldspatos, por soluções mais ou menos agressivas, contribuindo para que a proporção de alumina relativamente à proporção de alcalis aumente habitualmente nos produtos de alteração. Os resultados obtidos pela aplicação do CIA às amostras aqui estudadas, comprovam esta tendência. Tal como o CIW, o CIA aumenta com o grau de alteração da rocha, no caso presente, com o grau de maturidade do solo. A diferença entre os dois índices, resume-se no facto de o CIA exprimir adicionalmente a remoção de K_2O , o que se pode interpretar pela alteração do feldspato potássico e, possivelmente de alguma moscovite. O índice CIA, parece-nos pois ser um bom indicador de meteorização para os tipos de rochas/solos estudados.

O *Vogt ratio* – V, adoptado por Roaldset (1972) *in* Chittleborough (1991), é um índice representado pela razão entre $(Al + K)$ e $(Na + Ca + Mg)$. Dos valores obtidos a partir da aplicação do V às amostras seleccionadas, pode-se constatar que a tendência geral verificada é o aumento do valor do índice nos solos residuais, facto que é realçado nos solos mais evoluídos, que ocorrem em locais onde houve uma maior lixiviação (favorecida por clima + relevo + drenagem) dos catiões mais móveis, tais como: Ca, Na e Mg (amostras 53, 55, 58, 77 e 79, oriundas das imediações da Serra de São Mamede); havendo uma retenção de Al e K acima da média, nestes solos, facto que está relacionado com o tipo de produtos de alteração, essencialmente representados por caulinites, ilites e alguns minerais primários que subsistem

à meteorização, tais como feldspato potássico e moscovite. Por outro lado, os casos em que se verifica uma ligeira diminuição do valor de V, correspondem a solos pouco maduros (amostras 41, 43 e 72), ou a locais caracterizados por possuírem condições de drenagem deficiente (por apresentarem topografia suave), proporcionando a disponibilidade de catiões como é o caso do Ca (amostra 76) e a relativa escassez de Al (amostras 68, 72 e 76). Relativamente aos valores de V determinados para as amostras de rocha sã, constata-se que os menores correspondem a tonalitos e granitos calco-alcalinos, enquanto que os maiores correspondem às rochas com tendência alcalina, como é óbvio.

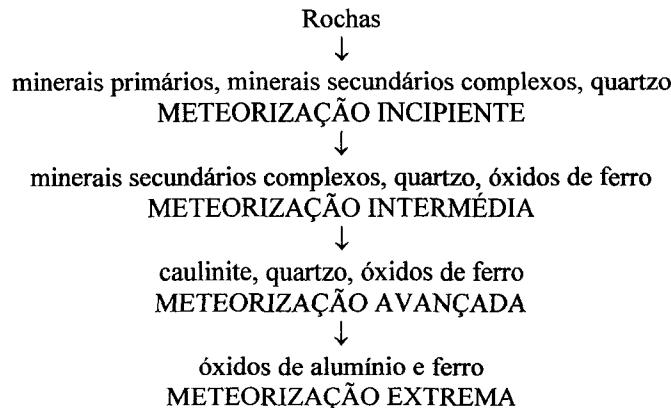
Um novo índice, I_{mob} – *Mobiles index*, foi proposto para caracterizar o grau de alteração do feldspato pertencente às rochas ígneas (Irfan, 1996). Este índice fornece uma medida relativa da exportação dos catiões móveis da rocha durante a meteorização. Assim, serve como indicador do grau de decomposição dos feldspatos, particularmente em condições de boa drenagem (forte lixiviação). Da aplicação deste índice às amostras seleccionadas, não se obtiveram valores muito elevados, não se podendo comparar com os valores obtidos por Irfan (1996) em Hong Kong, onde os granitos tinham sido sujeitos a uma forte decomposição química. De qualquer modo, é notório constatar que os valores mais altos para as referidas amostras, correspondem a solos de zonas de relevo mais acentuado onde a lixiviação foi favorecida, ao contrário dos valores mais reduzidos que pertencem a solos provenientes de zonas aplanadas, onde à partida a drenagem é pobre, o que corrobora os resultados obtidos a partir de outros índices, já referidos.

O índice de alteração – IA de Parker (1970) tem sido largamente utilizado no estudo de alteração de rochas silicatadas, uma vez que não está sujeito a tantas restrições litológicas como sucede com o índice de Ruxton (1968), que não é muito indicado no estudo de rochas em cujos produtos de alteração predominem esmectites ou vermiculites. O índice de Parker considera as perdas individuais dos elementos mais móveis e baseia-se igualmente na força de ligação desses elementos com o oxigénio como meio de ponderar essa mobilidade. Assim, o índice mede o grau de alteração da rocha ou solo em relação ao material original e também a susceptibilidade a uma posterior alteração. Deste modo, quanto maior for o IA na rocha sã, maior propensão para a alteração terá essa rocha, quando comparada com outra rocha que apresente menor valor de IA. O autor não considera a sílica no índice, justificando que, embora exista uma certa tendência para ela diminuir durante a alteração, o seu movimento ao longo de um perfil é frequentemente irregular, sendo a proporção total perdida, usualmente, pequena. O índice assume que a alumina permanece praticamente constante durante a alteração. Por esta ordem de ideias e, no que respeita aos solos residuais estudados, que apresentam os menores valores de IA, são mais maduros relativamente a outros que apresentem valores de IA superiores. Nota-se que em geral o valor do IA não é baixo, o que pode significar que os solos resultam de um processo em que a decomposição química não foi intensa. Por outro lado, um maior valor de IA no solo residual relativamente à rocha sã, pode ser interpretado como a existência de um ambiente de meteorização que permitiu a retenção de certos catiões móveis, tais como Ca, Na e Mg. É de salientar que esta constatação é válida para as amostras que apresentam maior concentração destes elementos nos produtos de alteração.

4.6.2 – Diagrama de Kronberg & Nesbitt

Kronberg & Nesbitt (1981) propõem uma representação diagramática para o estudo da evolução geoquímica dos perfis geo-pedológicos. Os princípios em que os autores se baseiam são os seguintes:

- i) durante a meteorização assiste-se a uma diminuição dos teores de Na, Mg, K e Ca;
- ii) a composição química dos níveis do solo torna-se cada vez mais simples à medida que se assiste à acumulação dos óxidos de Si e Al;
- iii) o esquema das transformações mineralógicas é o seguinte:



Com a intenção de quantificar as transformações geoquímicas, os autores referidos utilizam uma representação cartesiana (Fig. 4.1), na qual, em ordenadas, procuram traduzir as transformações dos feldspatos pela razão $Y = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$, e em abcissas, salientam a acumulação de sílica e alumina pela razão molecular $X = (\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$. No diagrama da Figura 4.1 foram incluídos os valores obtidos para as razões moleculares de Kronberg & Nesbitt aplicadas às amostras de rochas e solos residuais analisados.

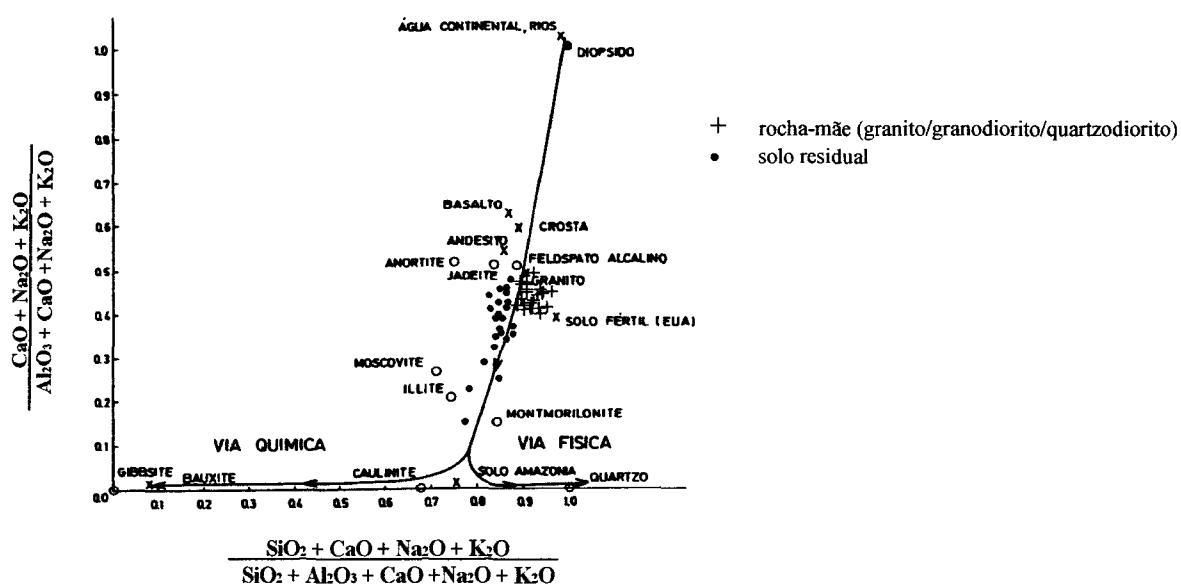


Figura 4.1 – Diagrama de variação do tipo de meteorização segundo Kronberg & Nesbitt (1981), onde constam os valores correspondentes às amostras de rochas e solos residuais analisados.

Aplicando as razões moleculares propostas por Kronberg & Nesbitt (1981) às amostras de rochas e respectivos solos residuais estudados, foram determinados os valores constantes no Quadro 4.13. Pelos resultados expostos pode sugerir-se que ambas as razões moleculares, constituem bons indicadores para o tipo de meteorização que actuou nas rochas que originaram os solos residuais seleccionados. No entanto, se considerarmos o quociente entre cada relação molecular do solo resultante e respectiva rocha sã (Yw/Y) e (Xw/X), verifica-se que a primeira razão reproduz melhor a intensidade de meteorização química nos diferentes tipos de rochas oriundas de diferentes locais, pois na relação (Xw/X), e de acordo com o que já foi referido, a concentração dos óxidos de Al e Si pode ser mais irregular ou oscilante, mas no cômputo final acaba por não sofrer grandes modificações, uma vez que estes elementos, tanto fazem parte de minerais primários (quartzo, feldspatos e micas), como de produtos de alteração: minerais argilosos de neoformação (caulinita, ilite, esmectita, etc.) e minerais remanescentes da alteração (quartzo, moscovite e feldspato potássico).

Quadro 4.13 – Razões moleculares de Kronberg & Nesbitt (1981), aplicadas às rochas e solos residuais estudados.

Amostras	Y	X	Yw	Xw	Yw/Y	Xw/X
1	0,49	0,90	0,42	0,86	0,87	0,96
15	0,49	0,88	0,37	0,84	0,76	0,96
41	0,46	0,90	0,39	0,83	0,86	0,92
42	0,46	0,90	0,35	0,82	0,76	0,92
43	0,48	0,90	0,33	0,83	0,70	0,92
44	0,51	0,87	0,43	0,83	0,84	0,95
48	0,49	0,87	0,40	0,86	0,82	0,99
52	0,51	0,87	0,36	0,82	0,71	0,95
53	0,43	0,90	0,28	0,82	0,64	0,91
55	0,46	0,91	0,15	0,78	0,33	0,85
58	0,39	0,92	0,23	0,84	0,60	0,91
59	0,49	0,87	0,34	0,81	0,70	0,94
68	0,45	0,90	0,43	0,86	0,95	0,96
70	0,48	0,90	0,33	0,83	0,70	0,93
72	0,49	0,89	0,47	0,88	0,96	0,99
76	0,45	0,90	0,44	0,85	0,98	0,94
77	0,47	0,89	0,32	0,83	0,68	0,93
79	0,46	0,91	0,22	0,79	0,48	0,87
82	0,46	0,89	0,39	0,87	0,85	0,98
84	0,40	0,89	0,35	0,84	0,86	0,95

4.7 – Identificação mineralógica

A evolução química, avaliada anteriormente, é acompanhada, logicamente, por uma evolução mineralógica. Foram analisadas, por difracção de raios-X, 33 amostras de diferentes solos residuais, tendo sido seleccionados 24 difractogramas que se expõem nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4., com a preocupação de representar todos os maciços estudados e, dentro do mesmo maciço abrincar as heterogeneidades mais marcantes. A fracção analisada, de dimensão inferior a 0,425 mm, pode ser considerada amostra total, uma vez que fornece uma informação geral dos minerais, argilosos e não argilosos, que estão presentes em maior quantidade nos produtos de alteração.

Através da intensidade e perfeição dos picos exibidos nos difractogramas, também se pode inferir acerca da ordem estrutural dos minerais, grau de cristalinidade ou degradação dos minerais. Pela análise dos difractogramas, pode constatar-se o que em seguida se descreve.

- Todos os solos residuais analisados apresentam na sua composição, quantidades abundantes de quartzo (Q) e feldspato (F). Geralmente estão presentes dois tipos de feldspato, predominantemente alcalino (Fk) ou calcoalcalino (P), consoante a natureza da rocha-mãe. No entanto, existem situações em que apenas foi identificado um tipo de feldspato, sendo exemplos destas situações os materiais resultantes de quartzodioritos (amostras 16, 44 e 82), nos quais só se detectou feldspato Na-Ca, e os solos de alteração de granitos alcalinos que tinham sofrido uma meteorização química considerável (ver índices de meteorização), exemplificados pelas amostras 55 e 58.
- A mica (M) e os interestratificados mica/ilite (M/I) constituem minerais cuja presença é constante em quase todos os solos analisados; principalmente a moscovite ou mica branca, cuja estabilidade é superior à da biotite.
- Dentro dos minerais herdados da rocha-mãe, há ainda a registar a identificação de anfíbola (A) em alguns solos residuais pouco evoluídos, principalmente nas manchas da Arraiolos e Montemor, onde os maciços quartzodioríticos dominam, nomeadamente nas amostras dos solos 8, 44 e 59. De forma menos evidente, o referido mineral, ocorre em solos residuais pouco evoluídos pertencentes aos maciços graníticos da Vidigueira (amostra 72) e Sta. Eulália (amostra 19).
- A clorite (C) ocorre geralmente como mineral de alteração de biotite e anfíbola, e a sua presença, apesar de pontual, está registada nos difractogramas correspondentes a solos residuais oriundos da zona oeste do maciço eruptivo de Évora (amostra 5), e de forma ténue nas manchas do Redondo (amostra 16) e de Sta. Eulália (amostra 70).
- Relativamente à presença de minerais argilosos identificados por difracção de raios-X, essencialmente filossilicatos (Fi), salienta-se a existência de três grupos de solos residuais:

Grupo I – comprehende os solos onde predomina a caulinita (K) com boa ordem estrutural; são essencialmente solos residuais do Nordeste Alentejano onde o relevo é mais acentuado, a pluviosidade é maior, as condições de drenagem são boas e a lixiviação é favorecida, contribuindo para a exportação dos catiões móveis e a consequente concentração de alumina e sílica, responsáveis pela formação daquele mineral argiloso; são exemplos os solos 53, 55, 58 e 79, colhidos na região, mais precisamente nas encostas ou imediações da Serra de S. Mamede (Marvão, Carreiras, Portalegre); a quantidade e ordem estrutural da caulinita (ver difractogramas) decresce à medida que o relevo suaviza; o segundo mineral mais importante neste grupo de solos é a ilite (I);

Grupo II – comprehende os solos residuais nos quais o mineral argiloso dominante é a esmectite (E); predominam nas regiões mais planas que ocorrem a sul da área abrangida por este estudo e, nas zonas de relevo moderado ocorrem nas depressões topográficas; são exemplos deste tipo de solos, as amostras 76, 46, 48 e 83, onde a esmectite apresenta elevado grau de cristalinidade, seguidas das amostras 52, 59, 72, 82, 68, 19 e 16, onde a esmectite apresenta menor ordem estrutural;

Grupo III – pertencem a este grupo os restantes solos estudados, nos quais não predomina sempre o mesmo mineral argiloso; neste grupo domina a ilite e a mica mais ou menos degradada; ocorrem, ainda, por vezes, interestratificados ilite-esmectite (I/E) e clorite-esmectite (C/E).

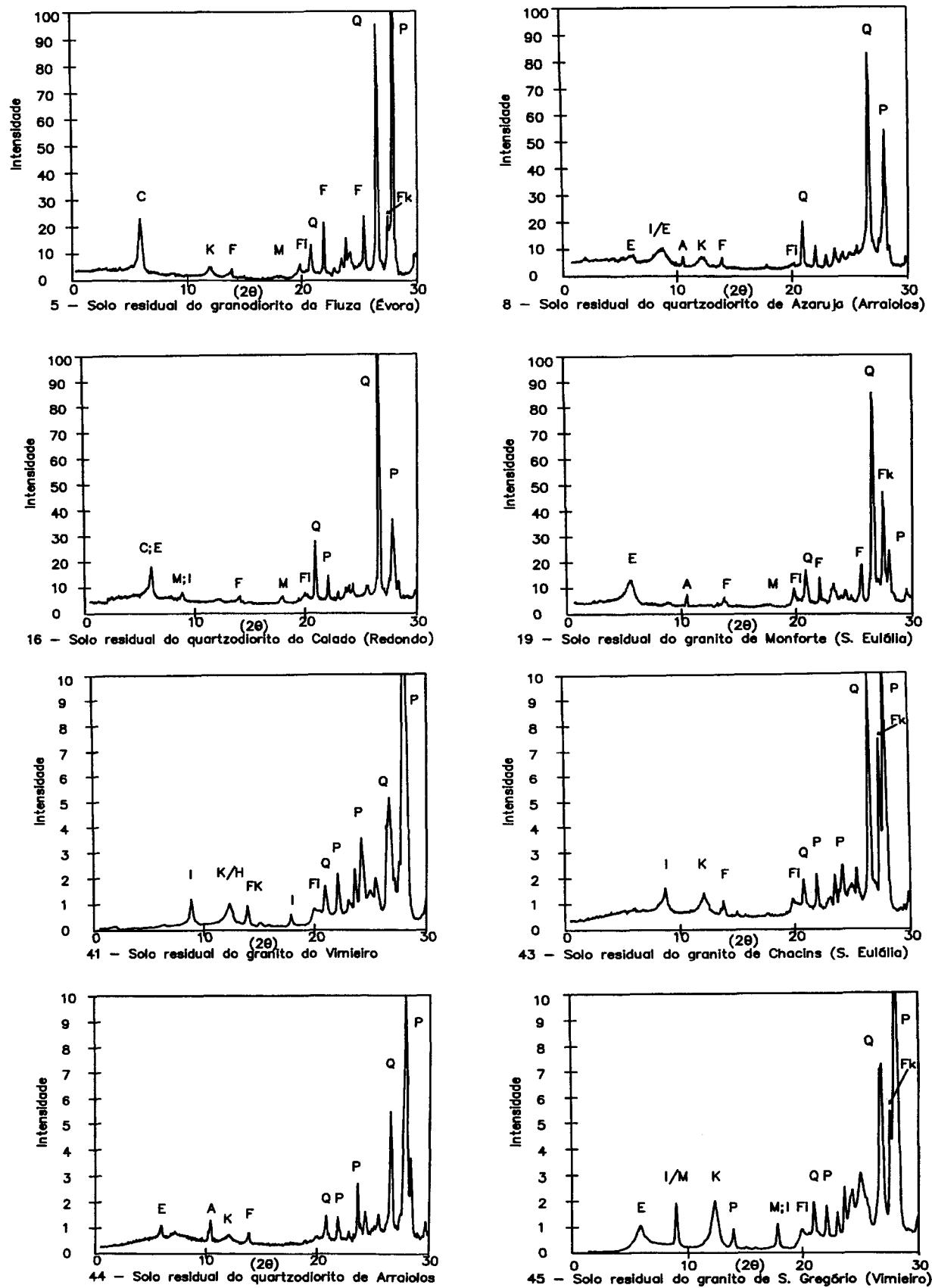


Figura 4.2 – Secções dos diagramas de difracção de raios-X correspondentes aos solos residuais seleccionados entre as amostras 5 e 45.

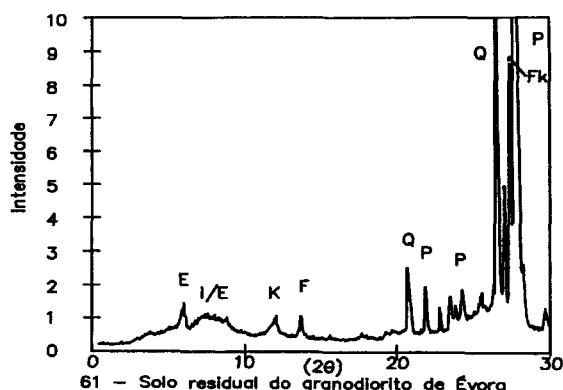
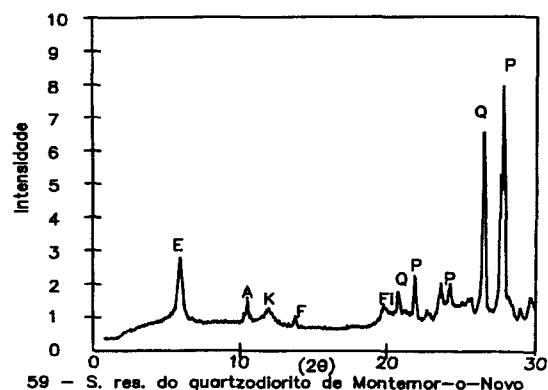
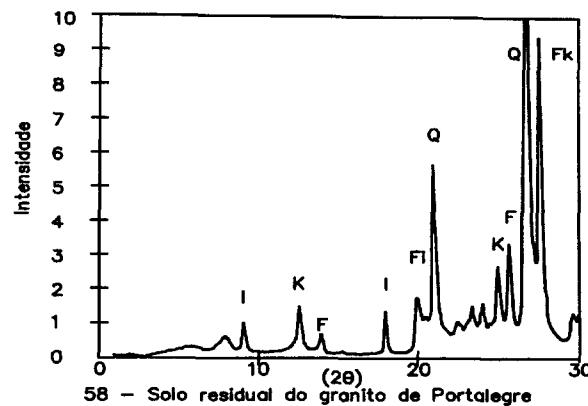
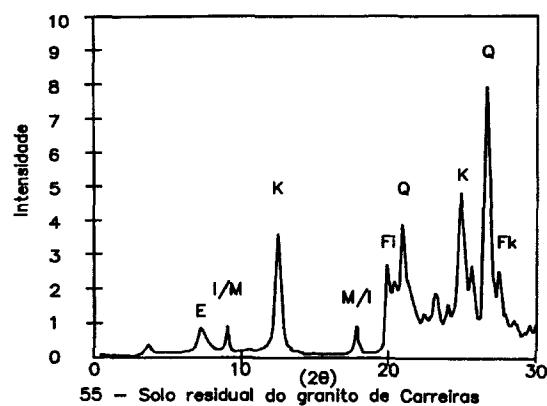
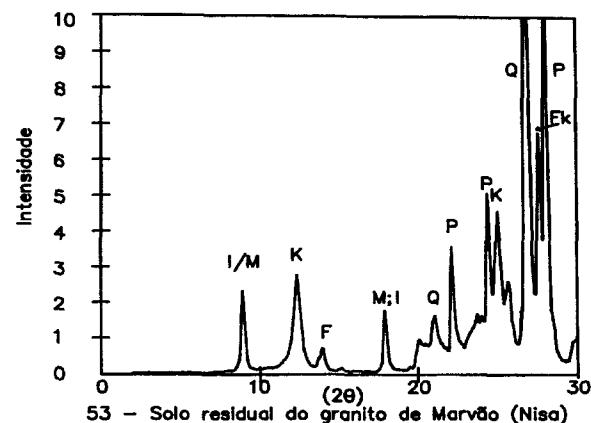
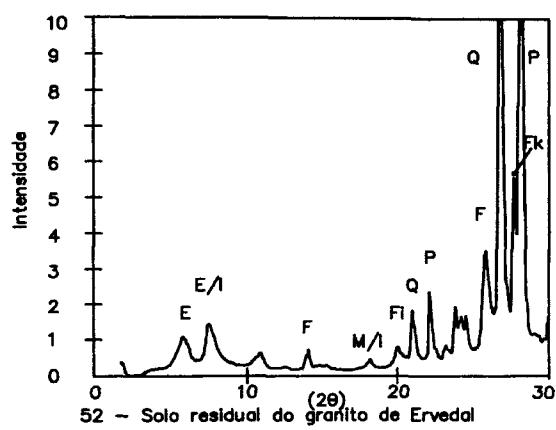
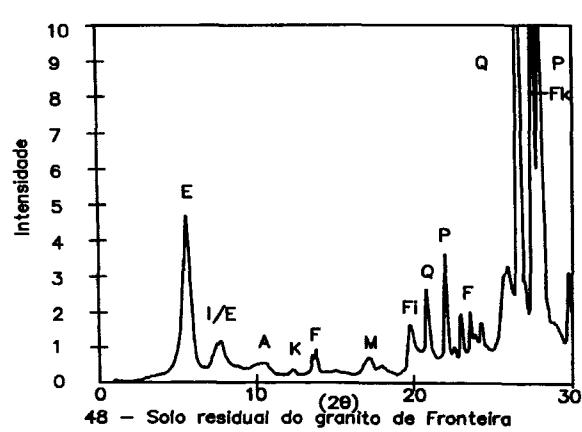
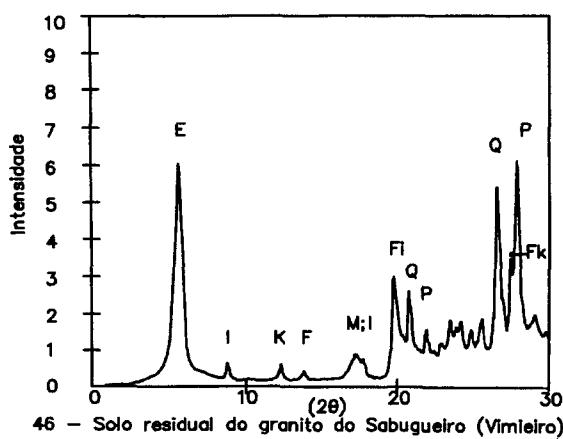


Figura 4.3 – Secções dos diagramas de difracção de raios-X correspondentes aos solos residuais seleccionados entre as amostras 46 e 61.

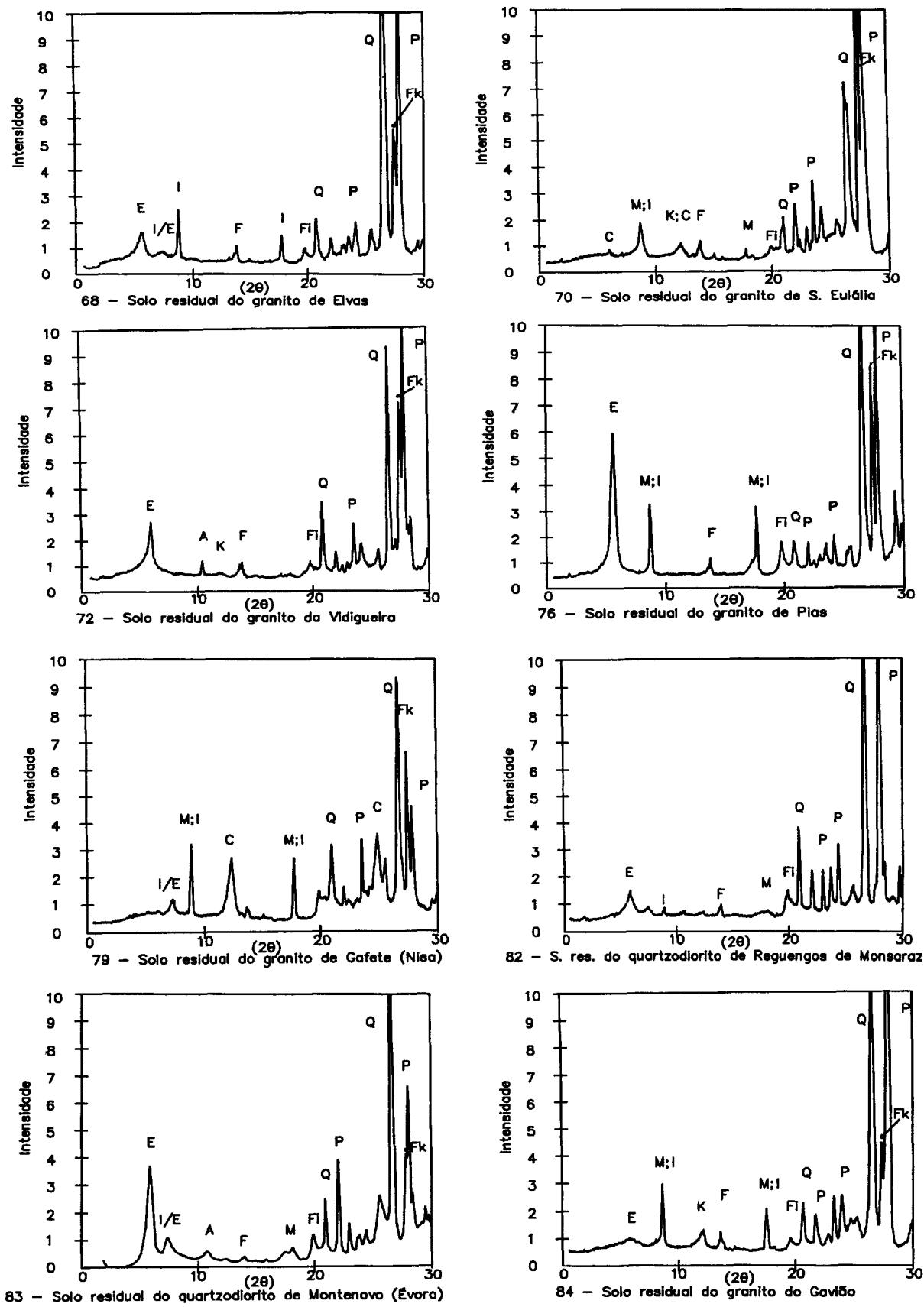


Figura 4.4 – Secções dos diagramas de difracção de raios-X correspondentes aos solos residuais seleccionados entre as amostras 68 e 84.

- É notória a influência que as condições geomorfológicas podem ter na quantidade e tipo de minerais argilosos presentes nos solos resultantes da alteração do mesmo tipo litológico. São exemplos desta situação, as amostras 41, 45 e 46, todas pertencentes a solos residuais do granito do Vimieiro, cuja composição química e mineralógica é semelhante em toda a área cartografada deste maciço. No entanto, os minerais argilosos identificados por difractometria de raios-X são essencialmente: esmectite bem estruturada, no caso do solo 46, que ocorre numa zona topograficamente aplanada; caulinite, ilite, e esmectite com fraca ordem estrutural, no caso do solo 45, que ocorre em zona de relevo moderado e com condições de drenagem média; ilite e caulinite/haloisite (K/H), no caso do solo 41, que ocorre em zona caracterizada por boa drenagem. A identificação mineralógica dos solos 19 e 43, relativas ao maciço de Sta. Eulália, corrobora a referida influência dos factores geomorfológicos sobre os produtos de alteração.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

5 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

5.1 – Considerações gerais

Neste capítulo apresentam-se os dados geotécnicos obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados nas amostras indeformadas e remexidas colhidas nas diferentes manchas de solos residuais estabelecidas. Também se expõem os dados geotécnicos compilados a partir de estudos geológicos e geotécnicos efectuados nas áreas estudadas, nomeadamente das Cartas de Materiais dos Distritos de Évora, Portalegre e Beja e das vias de comunicação que atravessam estas manchas.

Nos locais onde se colheram as amostras de solos residuais graníticos foram determinadas as propriedades físicas *in situ*, nomeadamente, o peso volúmico nos estados natural (γ_o) e seco (γ_d), o teor em água no estado natural (w_o), o índice de vazios (e_o) e a porosidade (n).

Nas amostras remexidas colhidas, foram realizados os ensaios de identificação seguintes: análise granulométrica e limites de consistência, limite de liquidez obtido com a concha de Casagrande (w_L) e com o cone penetrométrico BS (w_{Lc}), limite de plasticidade (w_p) e, respectivos índices de plasticidade (I_p e I_{pc}). Com os resultados obtidos foi possível determinar a actividade coloidal do solo (Ac), índice de liquidez (I_L), índice de consistência (I_C) e o limite de retracção (w_R), bem como parâmetros granulométricos, como sejam: o diâmetro efectivo (D_{10}), coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc).

Os solos residuais graníticos foram classificados com base nas classificações geotécnicas do Sistema Unificado (ASTM D2487-98) e AASHTO (LNEC E 240-1970).

Em todas as manchas de solos foram seleccionadas amostras que foram submetidas ao ensaio de compactação tipo Proctor, tendo sido possível determinar o peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e o teor em água óptimo (w_{opt}), para cada tipo de solo.

Determinou-se ainda, para todas as amostras, o equivalente de areia (EA), expansibilidade (Exp), permeabilidade (k), peso específico das partículas sólidas (γ_s) e teor em matéria orgânica (MO) existente no solo.

Com as amostras indeformadas, foi possível realizar-se, em alguns solos, ensaios de corte directo em caixa quadrada de 100 cm², e em dois solos dos mais grosseiros realizaram-se ensaios de corte directo numa caixa quadrada de 400 cm².

Em algumas amostras de solos residuais, efectuaram-se ensaios de consolidação em célula edométrica a partir dos quais se obtiveram as características de compressibilidade destes solos.

Seleccionaram-se três tipos de solo residual, com características texturais e mineralógicas diferentes, os quais foram submetidos a cinco ensaios triaxiais: dois deles do tipo consolidado-não drenado com leitura de pressões neutras; os três restantes, onde os respectivos provetes foram levados à rotura com o solo não saturado e não consolidado e em condições, tanto quanto possível, próximas das determinadas *in situ*.

Todas as características determinadas e compiladas a partir dos solos residuais relativos a cada maciço eruptivo são apresentadas em cada secção deste capítulo. Ao todo, identificaram-se dezasseis manchas de solos residuais de granítoides que ocorrem a sul do Rio Tejo. No final de cada secção, são apresentados quadros com o resumo das características determinadas no laboratório para esses tipos de solos residuais.

5.2 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora

Os solos residuais do maciço eruptivo de Évora, constituem a parte mais superficial e aflorante dos maciços, representando, grosso modo, a fase mais avançada da decomposição das formações rochosas, sem que tenha havido transporte sensível de materiais. As rochas magmáticas intrusivas do maciço de Évora, frequentemente designadas por complexo eruptivo granítóide (Cap. 3), são constituídas essencialmente por granodioritos e quartzodioritos tardíos-orogénicos e por granitos biotíticos orogénicos que texturalmente podem variar de grão fino a grosseiro (Carvalhosa *et al.*, 1969).

Nesta dissertação, designa-se por maciço eruptivo de Évora uma mancha de granitóides, ligeiramente alongada, com comprimento e largura máximos estimados em cerca de 45 Km e 20 Km, respectivamente. Esta mancha é limitada a NW de Évora pelos arredores da povoação de Montemor e estende-se a SE de Évora, até S. Bartolomeu do Outeiro, junto a Aguiar. Nesta mancha, com uma área de cerca de 500 Km², aflora algumas zonas do maciço rochoso onde por vezes se encontram pedreiras activas ou não, blocos erráticos de grandes dimensões, arredondados, e nas zonas mais aplanadas, ocorrem extensas áreas de solos residuais graníticos de natureza areno-siltosa, cinzentos a castanho-amarelados, que podem atingir espessuras superiores a 10 metros.

5.2.1 – Dados compilados

Sobre os granitóides do maciço eruptivo de Évora consultaram-se essencialmente três estudos geológico-geotécnicos a saber: CMDE – Carta de Materiais do Distrito de Évora (JAE, 1980a), A6-M/Év – Auto-estrada Marateca/Elvas - sublanço/Montemor-o-Novo/Évora, (JAE/BRISA, 1994) e IC33 - Nó de Grândola (Norte) da A2/Évora (JAE, 1999). No Quadro 5.1 apresenta-se o tipo e o número de ensaios compilados por estudo.

Quadro 5.1 – Tipo e número de ensaios laboratoriais compilados de estudos geológico-geotécnicos relativos aos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora.

Estudos	Análises granulométricas	Limites de consistência	w _o	EA	Compactação	CBR	Classificação	
							AASHTO	Unificada
CMDE	10	10		10			10	10
A6-M/Év	20	20	41	8	10	10	20	20
IC33	9	9	9				9	9
TOTAL	39	39	50	18	10	10	39	39

Os intervalos de variação das características de identificação e compactação nomeadamente, percentagem de material passado nos peneiros: # 200 (fracção inferior a 0,075 mm), # 40 (fracção inferior a 0,425 mm) e # 10 (fracção inferior a 2,0 mm); limite de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_P), teor em água natural (w_o), equivalente de areia (EA), peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), teor em água óptimo (w_{opt}) e CBR para 95% de compactação relativa, constam no Quadro 5.2.

O intervalo de valores com as maiores percentagens de finos (fracção inferior a 0,075 mm) corresponde ao IC33, cujos estudos se efectuaram mais a sul neste maciço granítóide. Nesta zona também se registaram os maiores valores do limite de plasticidade e índice de liquidez. Estes resultados estão de acordo com as observações de campo, onde se verificou que, nesta mancha, a granularidade dos solos, na generalidade, decresce de Norte para Sul, em

conformidade com o aumento de minerais máficos e diminuição dos félscos, estando a maior plasticidade destes solos relacionada com esses factores. Em relação ao teor em água natural, é de referir que este valor depende grandemente das condições climatéricas da época do ano em que se efectuou a colheita dos solos. Este valor é tendencialmente superior nos solos mais finos comparativamente aos solos mais grossos, porque aqueles têm maior capacidade para reter água, uma vez que possuem maior superfície específica. Os valores do equivalente de areia, típicos de solos arenosos, são mais altos quando a percentagem de areia é maior, como é natural.

Quadro 5.2 – Intervalos de variação das características geotécnicas compiladas, referentes a solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Évora.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	IP (%)	W _o (%)	EA (%)	γ _{dmáx} (KN/m ³)	W _{ópt} (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDE	7 - 30	19 - 50	49 - 81	NR - 34	NP - 10		19 - 30			
A6-M/Év	7 - 26	17 - 65	45 - 100	NR - 31	NP - 11	3 - 17	16 - 34	18,5 - 20,5	8,2 - 11,7	18 - 35
IC33	14 - 39	30 - 76	74 - 99	NR - 36	NP - 14	1 - 11				
TOTAL	7 - 39	17 - 76	45 - 100	NR - 36	NP - 14	1 - 17	16 - 34	18,5 - 20,5	8,2 - 11,7	18 - 35

Quanto às características de compactação, obtidas a partir do ensaio Proctor modificado em molde pequeno, os solos apresentam bom comportamento quando compactados, de preferência no ramo seco da curva, estando aptos para a construção de aterros, tendo sido aplicados na camada de coroamento e na camada de fundação do pavimento, na A6-Autoestrada Marateca/Elvas.

As classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítico de Évora são apresentadas na Figura 5.1. Trata-se de materiais essencialmente areno-siltosos, mais raramente argilosos, por vezes bem graduados. Da observação dos resultados, verificou-se que os materiais estudados correspondem em grande parte a solos A-1-b e A-2-4, isto é, podem apresentar um comportamento excelente a bom sob o pavimento.

5.2.2 – Resultados experimentais

Selecionaram-se nove locais de prospecção e amostragem, nos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Évora, tendo em conta a sua heterogeneidade, representatividade e distribuição geográfica. Três destes locais (amostras 1, 2 e 5), situam-se em pedreiras na zona central do maciço, que exibiam nos níveis mais superficiais, espessuras consideráveis de solo residual, com perfis verticais limpos de vegetação, onde se podia verificar com nitidez a superfície de passagem à "rocha-mãe", sã e/ou alterada. As amostras 60, 61 e 62 foram colhidas nos taludes de escavação para a A6-Autoestrada Marateca/Elvas - sublanço/Montemor-o-Novo/Évora, e foi onde se verificaram as maiores espessuras de solo. As restantes amostras (83, 87 e 88), colheram-se em saibreiras da região, pertencendo a amostra 88 à mancha granítica de Aguiar, local situado mais a sul do maciço.

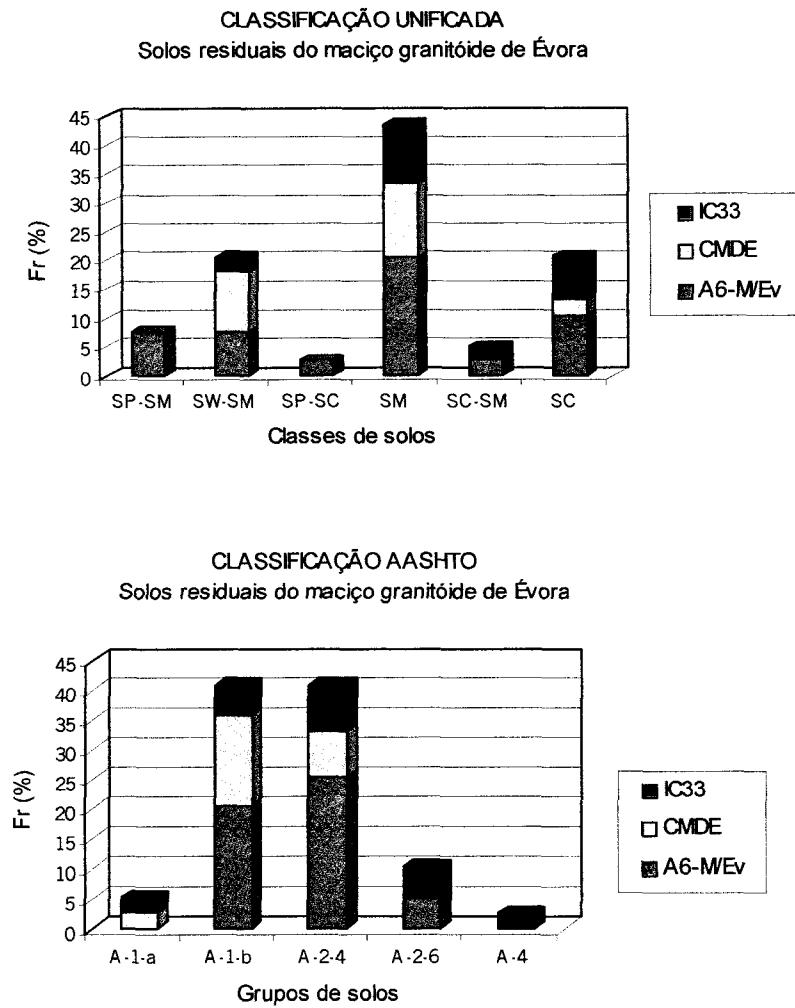
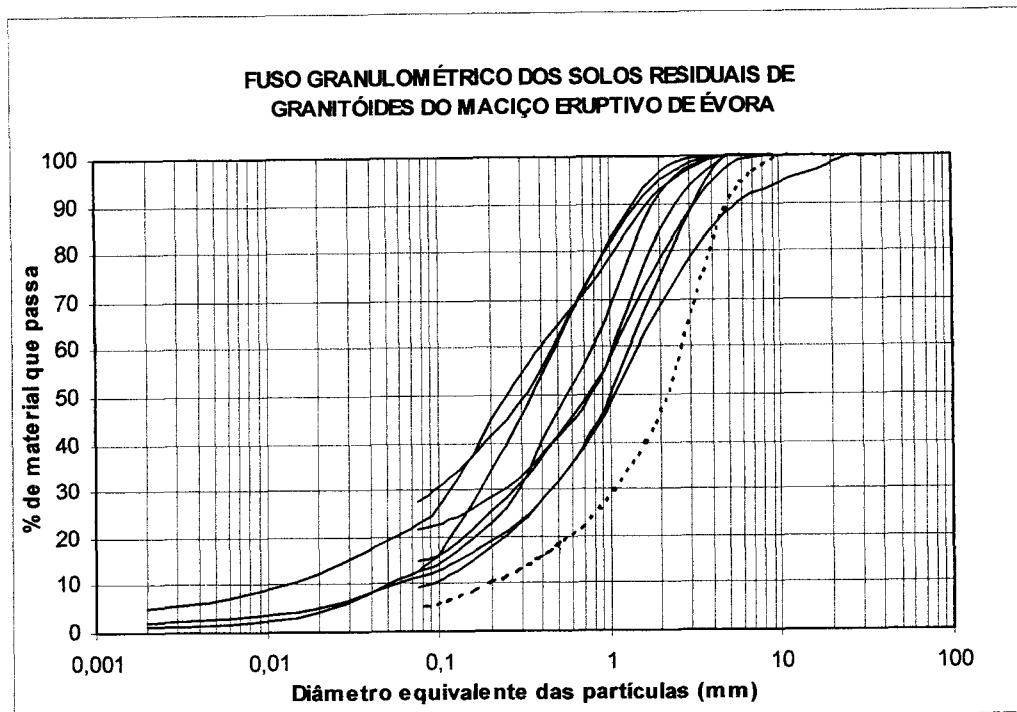


Figura 5.1 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítico de Évora.

5.2.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

Na Figura 5.2 apresentam-se as curvas granulométricas de solos residuais do maciço granítico de Évora. Estas reflectem uma certa concordância no que respeita aos parâmetros granulométricos, com percentagens de finos que variam entre 10 e 27 %, excepto o baixo teor de finos (5%) do solo resultante do granito de Aguiar, aparentemente o mais grosseiro, e cuja curva granulométrica (a tracejado) se distingue das restantes. A percentagem de argila determinada em três solos deste grupo é muito baixa, menos que 5%, o que significa que a maior parte dos finos são essencialmente siltosos. Trata-se de solos com ampla distribuição da dimensão do grão ($Cu > 10$), e praticamente, todos eles são bem graduados, excepto as amostras 62 e 83, cujo Cc tem os valores 3,5 e 3,4, respectivamente, isto é, não se distancia muito do limite de solo bem graduado para solo mal graduado (Quadro 5.3).



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.2 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora.

Quadro 5.3 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítóide de Évora.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
1-5	5-19	41-84	0,005-0,2	10-110	1,3-3,5	26-42	31-44	NP-36	NP-6	NP-12
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ _s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
20-80	3-13	1,4×10 ⁻⁵ - 9,7×10 ⁻⁴	0,07-0,13	25,4 - 28,1	1,46	(-7)-(-2)	3-8	21-34	SM SW-SM	A-1-a - A-2-5

b) Consistência

Os solos residuais do maciço granítóide de Évora são não plásticos ou apresentam plasticidade baixa, o que está de acordo com a sua baixa percentagem de argila. Os valores do limite de liquidez determinados pelo método do cone são superiores aos valores determinados pela Concha de Casagrande. Nota-se uma maior dispersão nestes últimos, aproximando-se mais dos primeiros para valores mais altos deste limite.

Com a determinação em laboratório dos limites de consistência, nomeadamente do limite de liquidez (w_L) e do limite de plasticidade (w_P), foi possível calcular uma série de parâmetros que contribuem para um melhor conhecimento dos solos estudados, como sejam o índice de plasticidade (I_P), o índice de liquidez (I_L), o índice de consistência (I_C), a actividade coloidal (Ac) e o limite de retracção (w_R). Este último, é de difícil determinação laboratorial em solos siltosos, porque há alguma dispersão e por vezes aproxima-se muito do limite de plasticidade. O índice de consistência toma sempre valores superiores a 2, o que significa que os solos estão longe de ficarem instáveis ou colapsarem por saturação, porque os teores em água naturais (w_o), estão muito aquém do limite de liquidez (Quadro 5.9). O índice de liquidez é sempre negativo, devido ao facto de o w_P ser sempre superior ao w_o ; para estes solos indicarem potencial de liquefação, no caso mais favorável, a amostra 1, teria que ter um $w_o=81\%$, o que é praticamente impossível para estes solos granulares, com o clima a que estão sujeitos e respectivas condições de drenagem. Para a actividade coloidal da amostra 1, obteve-se o valor 1,46, o que significa que a pouca argila existente é activa.

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas, Sistema Unificado e AASHTO, dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Évora constam no Quadro 5.9. Os solos dos nove locais amostrados, foram classificados como solos areno-siltosos (SM) ou areias bem graduadas com silte (SW-SM), com percentagens de areia consideráveis que variam entre 41 e 84. Comparando com os dados coligidos, estas foram também as classes mais encontradas. Em relação à Classificação AASHTO, há uma maior diversidade, mas todos os solos amostrados se encontram entre os grupos A-1 e A-2, isto é, para fins rodoviários, todos indicam um comportamento na camada sob o pavimento, excelente a bom.

d) Outras propriedades

Os pesos específicos das partículas sólidas (γ_s) dos solos estudados (Quadro 5.3 e Quadro 5.9), apresentam valores característicos de solos de origem granítica, correspondendo o valor mais baixo ao solo residual do granito de Aguiar, essencialmente constituído por quartzo, feldspato e mica, e os valores mais altos ao solo residual de um quartzodiorito que naturalmente contem uma maior percentagem de minerais ferromagnesianos que possuem densidades superiores aos minerais félscicos.

Os valores de equivalente de areia (EA), determinados para os solos (Quadro 5.3 e Quadro 5.9), confirmam tratarem-se de materiais essencialmente arenosos, cujos finos têm baixa plasticidade. O valor mais elevado corresponde ao solo residual do granito de Aguiar; pertencendo os menores valores a solos residuais de granodioritos e quartzodioritos, cuja percentagem de finos é superior, assim como é maior a quantidade de materiais silto-argilosos, produtos da alteração mais evoluída. Estes valores estão de acordo com os dados compilados, excepto o EA da mancha de Aguiar, o que se explica porque nenhum dos estudos consultados abrange esta área.

As expansibilidades (Exp) obtidas para os solos estudados variam de 3 a 13%, sendo o solo residual de um quartzodiorito o mais expansivo (Quadro 5.9) o que se justifica pela sua maior percentagem de finos e a maior plasticidade deste grupo de amostras. Todavia, a expansibilidade não depende tanto da quantidade como da qualidade dos minerais argilosos. De qualquer forma, uma expansibilidade de 13% era considerada elevada para um índice de plasticidade de 6%, se de um solo sedimentar se tratasse, mas no caso destes solos residuais é

justificável se verificarmos a influência que a percentagem da mica/ilite tem na determinação dos limites de consistência, uma vez que estes minerais quando estão degradados retêm água nos espaços entre camadas estruturais (Silva, 1974 *in* Novais Ferreira, 1988). Esta água não contribui efectivamente para a plasticidade, embora se evapore quando sujeitamos estes solos a temperaturas na estufa de 110º C, o que aumenta os valores do limite de liquidez e de plasticidade. Por outro lado, estes solos residuais, com uma componente micácea considerável, são particularmente deslizantes na face da concha (Viana da Fonseca, 1996).

A permeabilidade (k) dos solos estudados, determinada com um permeâmetro de carga constante, é considerada média, típica de solos arenosos, com mais ou menos silte; correspondendo os maiores valores a uma menor quantidade de silte.

O teor em matéria orgânica (MO) detectada nos solos estudados é considerada insignificante, pois é muito inferior a 2%, logo não tem qualquer influência nas propriedades geotécnicas dos materiais. A cor escura dos solos resultantes dos quartzodioritos e de alguns granodioritos, deve-se exclusivamente à participação de minerais maficos na constituição destes solos.

5.2.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, teor em água natural (w_o), peso volúmico nos estados natural (γ_o) e seco (γ_d), índice de vazios (e_o) e porosidade (n), foram avaliadas simultaneamente com a realização da amostragem e constam no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora.

w_o (%)	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_o	n	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	w_{opt} (%)
5-20	15,1-19,3	14,3-17,0	0,512-0,836	33,9-45,5	16,6-19,9	9,4-19,3

Os teores em água natural, determinados e coligidos, são relativamente baixos, devido à precipitação baixa, característica da região estudada, e à drenagem fácil do solo que favorece o escoamento rápido. Destaca-se a amostra 83 ($w_o = 20\%$), que foi colhida após uma semana de intensa pluviosidade, para além de ser a que tem maior percentagem de finos, logo com uma capacidade de retenção de água superior às amostras mais arenosas.

O menor valor do peso volúmico seco (γ_d), determinado *in situ*, pertence ao solo residual do granito de grão médio a fino da pedreira da Fiúza (Quadro 5.9), cuja microestrutura se encontrava bastante aberta devido ao lixiviamento de algumas partículas; facto comprovado pelos valores elevados do índice de vazios (e_o) e da porosidade (n). Para aquela propriedade física, contribuem dois factores: a abertura da estrutura e a densidade dos minerais que constituem o solo, uma vez que um solo com mais minerais maficos tende a ter um maior γ_d , como por exemplo a amostra 2.

b) Compactação

Para determinar o peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e o respectivo teor em água óptimo (w_{opt}), realizaram-se, nos solos estudados, ensaios de compactação tipo Proctor. Os intervalos

de variação destes parâmetros são apresentados no Quadro 5.4. Os valores determinados para o $\gamma_{dmáx}$ são inferiores aos valores coligidos (Quadro 5.2). Em contrapartida com os valores do $w_{ópt}$ passa-se o inverso. Para além dos solos serem evidentemente diferentes, aquele desfasamento deve-se à energia de compactação usada nos ensaios, que no caso dos estudos consultados, foi o Proctor modificado, e nos dados experimentais, só em duas amostras, 61 e 88, se utilizou a compactação pesada (p), (Quadro 5.9). Em todo o caso, os solos constituídos por partículas mais grosseiras, apresentam usualmente teor em água óptimo ($w_{ópt}$) menor e peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) maior, em relação aos valores dos mesmos parâmetros verificados nos solos mais finos.

Verifica-se uma certa proporcionalidade entre os valores dos pesos volúmicos secos *in situ* (γ_d) e máximos ($\gamma_{dmáx}$). Na amostra 83, os valores destas propriedades são muito próximos, assim como os teores em água, natural (w_o) e óptimo ($w_{ópt}$); isto deve-se à considerável percentagem de finos ainda presente no perfil do solo, responsável por uma estrutura pouco aberta, visto que a rocha-mãe é um quartzodiorito (que possui mais minerais máficos e menos quartzo e feldspato) e ao grau de compacidade existente *in situ*, que neste caso é considerável.

5.2.2.3 – Parâmetros de resistência

a) Ensaio de corte directo

Para determinar as características de resistência ao corte em laboratório, efectuaram-se seis ensaios de corte directo em seis amostras de solos da mancha estudada (Quadro 5.5). A maioria dos solos são pouco coerentes, o que dificulta a obtenção de amostras indeformadas. Só foi possível colher amostras deste tipo nos solos com maior percentagem de finos (amostras 5 e 83), sendo as restantes amostras remexidas, respeitando, no entanto, o teor em água e densidade, no estado natural.

Os solos amostrados foram consolidados, e posteriormente cortados com uma velocidade de 1 mm/min e tensões verticais na fase de corte iguais às de consolidação, isto é, 55, 104 e 202 KPa, para cada caixa de corte. Depois do corte directo realizado, inverteu-se o sentido de marcha da “carruagem”, procedendo-se assim ao corte inverso dos mesmos provetes, para as mesmas tensões verticais.

A Figura 5.3, apresenta as curvas, tensões de corte e deslocamentos verticais *versus* deslocamentos horizontais, para as amostras indeformadas (5i e 83i), para o corte directo e para o corte inverso. As curvas apresentam algumas irregularidades, com aumentos e diminuições bruscas da tensão de corte e do deslocamento vertical, variações que se admite serem consequência de roturas ou deslocamentos rápidos de grãos mais grosseiros, geralmente de quartzo, que ocorrem na superfície de corte do provete. As irregularidades são mais evidentes nas curvas do corte inverso; os grãos de maiores dimensões, que estavam orientados num certo sentido, com a inversão de marcha da “carruagem”, foram obrigados a rodar cerca de 180°, pois trata-se de grãos bastante irregulares e alguns deles alongados, provocando nesse momento uma variação brusca na tensão de corte e espessura do provete (dilatância - deslocamentos verticais).

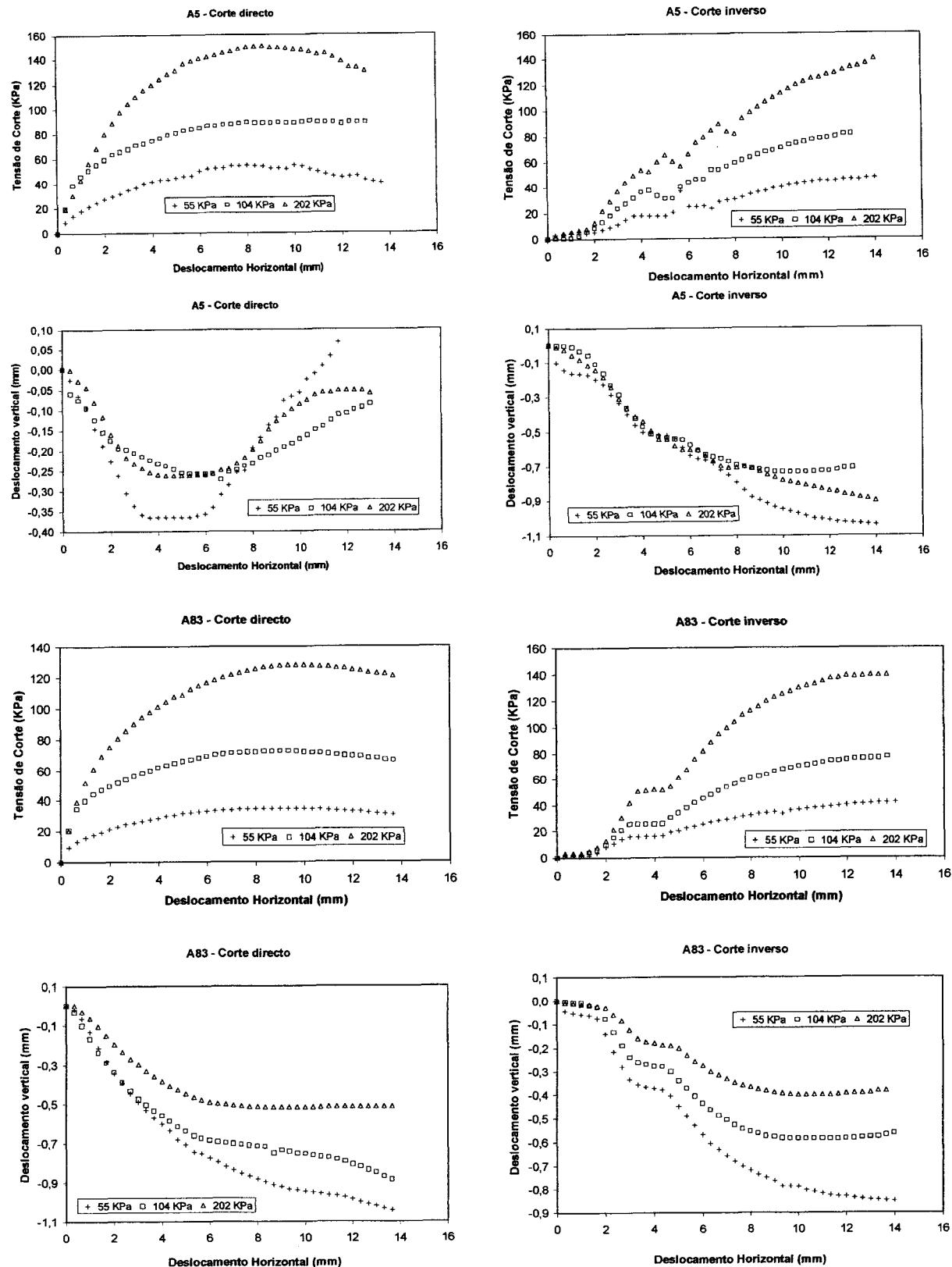


Figura 5.3 – Curvas-tipo de ensaios de corte directo e inverso, em amostras indeformadas dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora.

As rectas de Coulomb, respeitantes a estes ensaios, obtidas a partir das tensões de corte máximas, são apresentadas na Figura 5.4. Os parâmetros de resistência, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c), obtidos nos ensaios de corte realizados nas amostras indeformadas e remexidas destes solos residuais, constam no Quadro 5.5.

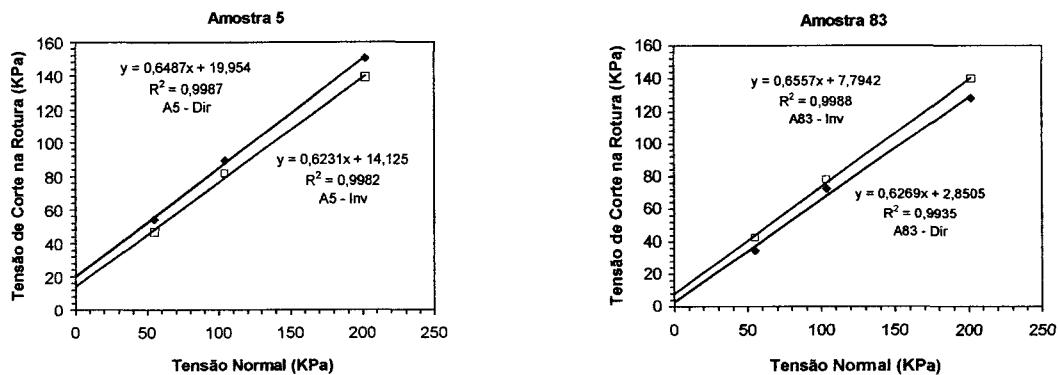


Figura 5.4 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, nas amostras indeformadas dos solos residuais dos granítóides do maciço de Évora.

Quadro 5.5 – Parâmetros de resistência ao corte directo e inverso em amostras indeformadas e remexidas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora.

Amostras		1	2	5	5i	83i	87
corte	ϕ (o)	35,7	36,8	34,3	33,0	32,1	32,0
directo	c (Kpa)	0	0	0	19,9	2,85	8,6
corte	ϕ (o)				31,9	33,3	
inverso	c (Kpa)				14,1	7,8	

O intervalo de variação dos valores do ângulo de atrito (ϕ) determinados para estes solos residuais varia entre 32° e 37° . Os valores maiores correspondem aos solos arenosos mais grosseiros, e os menores aos solos com maior percentagem de finos, maior índice de plasticidade, maior expansibilidade e evidentemente maior coesão. Esta coesão é atribuída a forças interparticulares existentes na matriz fina destes solos que mantêm ligados os grãos de maiores dimensões nos provetes das amostras indeformadas. No caso de amostras remexidas e no corte inverso de amostras indeformadas, a coesão pode dever-se a: 1) forças de atracção entre as partículas mais finas (minerais argilosos e micas); 2) ou mesmo à fractura de certos grãos de minerais mais alterados, por exemplo de feldspatos em decomposição, que não resistem à força de corte aplicada ao provete. Este facto explica porque é que o ensaio de corte inverso pode proporcionar valores de coesão superiores ao ensaio de corte directo, para o mesmo solo (e.g. amostra 83 indeformada-83i).

b) Ensaio triaxial

Realizou-se um ensaio triaxial em amostras remoldadas, a partir do solo 83, sendo os parâmetros físicos próximos dos existentes nas condições de jazida. Os três provetes com diâmetro igual a 102 mm, e com o dobro da altura, foram instalados nas câmaras triaxiais, com as características físicas iniciais expostas no Quadro 5.6. Depois de atingidas as tensões confinantes preestabelecidas para as três câmaras de 50, 100 e 200 KPa, respectivamente, os provetes foram submetidos a compressão segundo as trajectórias de tensões convencionais, e

em condições não saturadas, tal como acontece *in situ*. Os valores dos parâmetros de resistência (c_u e ϕ_u), bem como o módulo de deformabilidade tangente (E_t), constam no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial-UU, em provetes não saturados, do solo residual de um quartzodiorito do maciço de Évora.

σ_c (KPa)	Parâmetros físicos iniciais				Parâmetros geotécnicos obtidos		
	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	E_t (MPa)	coesão	ângulo de atrito
50	16,28	0,650	12,2	51,38	33,051	$c_u = 78,65$ KPa	$\phi_u = 29,2^\circ$
100	16,08	0,671	12,1	49,41	39,826		
200	16,08	0,671	12,3	50,23	33,696		

As curvas ‘tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) versus extensão axial (ϵ_a)’ (Figura 5.5), apresentam semelhanças às curvas obtidas com a caixa de corte directo. No entanto, destaca-se a curva correspondente à tensão confinante mais baixa ($\sigma_c = 50$ KPa), em que a resistência de ‘pico’ é bem pronunciada; constata-se que há uma recuperação da variação volumétrica (ΔV) para o mesmo valor de extensão axial (ϵ_a), o que confirma a dilatância durante o corte do provete. A tensão confinante (σ_c) tem também uma grande influência na diferença entre valores de pico e os valores residuais. De facto, para um mesmo estado de compacidade inicial, a diferença diminui com o aumento de σ_c . Assim, o valor de ϕ_u pico diminui com o aumento da tensão de consolidação, tendendo para o valor de ϕ residual, para valores elevados desta.

A envolvente de rotura correspondente ao ensaio é apresentada na Figura 5.6. A verdadeira não linearidade de ϕ_u de pico com σ_c nos materiais granulares conduz, por vezes, a que a linearização da envolvente de rotura num determinado intervalo de tensões de consolidação dê origem a uma ordenada na origem, cujo significado é apenas matemático e não físico.

Quanto aos parâmetros de resistência determinados no ensaio triaxial-UU do solo 83 desestruturado (Quadro 5.6), pode-se adiantar o seguinte:

- o valor da coesão é relativamente elevado quando comparado com o mesmo valor obtido no ensaio de corte directo; para além dos procedimentos dos dois ensaios serem bastante diferentes, assim como as amostras ensaiadas em cada um deles, há que chamar a atenção para o facto de estarmos, no ensaio triaxial, perante um solo granular húmido (não saturado), em que os efeitos capilares produzem o aparecimento de uma certa coesão aparente (ou capilar), traduzida por uma ordenada na origem (Atkinson, 1993), além da que já foi referida; acrescenta-se que neste tipo de ensaio em solos não saturados é notório o efeito de sucção, durante o processo de rotura, o que, consequentemente, gera pressões neutras negativas;
- relativamente ao valor do ângulo de atrito, este é ligeiramente mais baixo no ensaio triaxial, o que é devido, além das diferenças entre os ensaios, ao próprio material ensaiado que é passível de apresentar a heterogeneidade normal de um material residual colhido em perfil; a qualidade da amostra também é determinante nas diferenças evidenciadas nos dois ensaios.

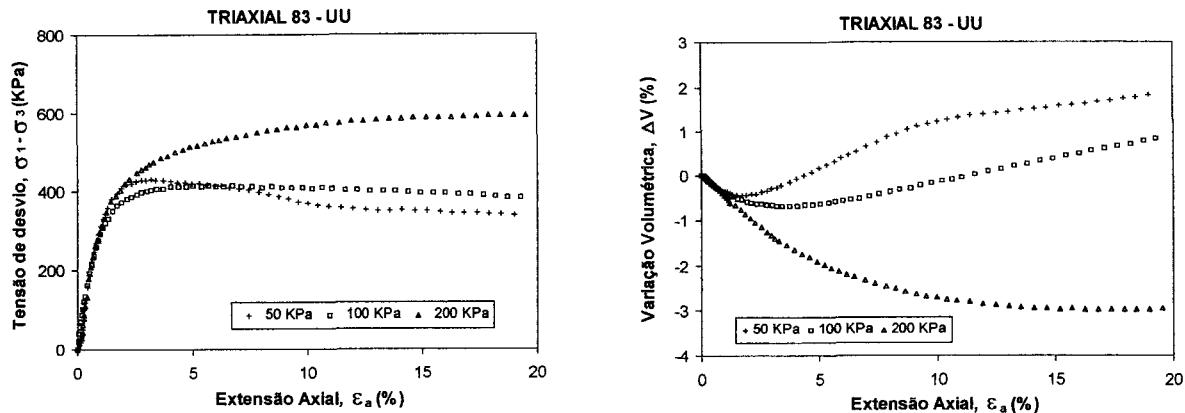


Figura 5.5 – Curvas de tensão de desvio *versus* extensão axial e de variação volumétrica *versus* extensão axial do ensaio triaxial-UU em amostras não saturadas do solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Évora.

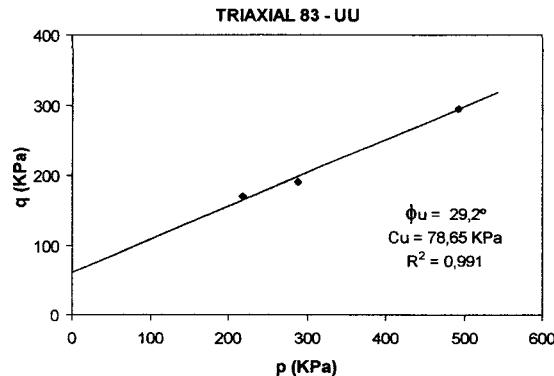


Figura 5.6 – Envolvente de rotura do ensaio triaxial-UU do solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Évora.

5.2.2.4 – Compressibilidade

Os parâmetros de compressibilidade foram determinados a partir de ensaios edométricos realizados em amostras indeformadas dos solos mais finos desta mancha. Os provetes foram obtidos através da cravação do anel do edómetro, com 99 mm de diâmetro e 20 mm de altura, em amostras de solo recolhidas no campo sob a forma de blocos parafinados e devidamente acondicionados. As profundidades de amostragem foram de 6m, 4m e 2m, para os solos de referências 5, 83 e 87, respectivamente.

Os provetes, depois de devidamente instalados nas células edométricas, foram submetidos a escalões de carga que variaram desde a tensão inicial de 1,5 KPa, até à tensão máxima de 1462,9 KPa, sendo a tensão duplicada a cada 24 horas. Alcançada a tensão máxima, procedeu-se ao escala de descarga, permitindo assim calcular o índice de expansão (C_s).

As curvas de compressibilidade, índice de vazios (e) *versus* logaritmo da tensão vertical efectiva ($\log'v$), são apresentadas na Figura 5.7. Os parâmetros físicos, iniciais e finais, dos provetes submetidos ao ensaio edométrico, constam no Quadro 5.7. Os parâmetros de compressibilidade dos solos estudados são apresentados no Quadro 5.8.

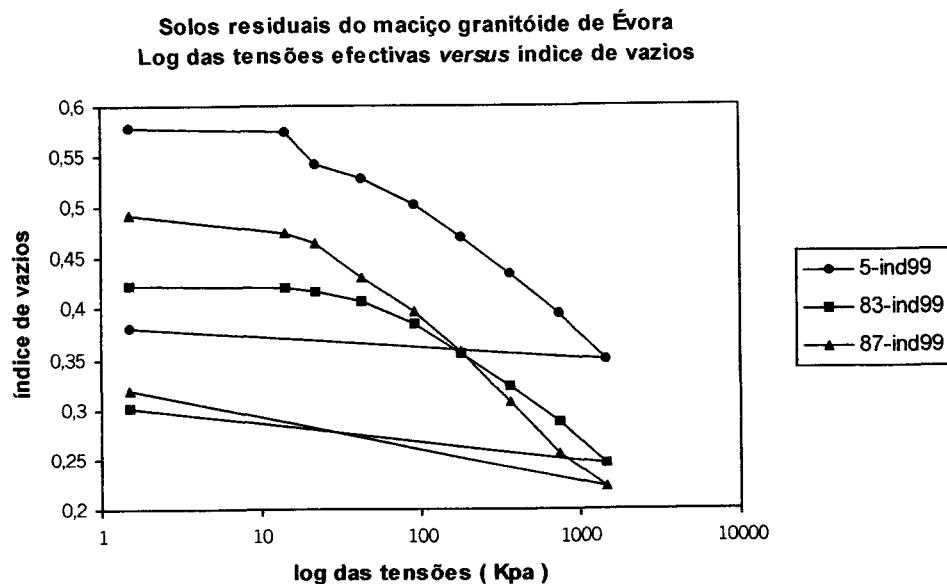


Figura 5.7 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos efectuados em amostras indeformadas dos solos residuais granítóides do maciço eruptivo de Évora.

Pela análise das curvas de compressibilidade dos três solos ensaiados, verifica-se que, com excepção da amostra 5, é difícil observar-se o ponto de cedência destes solos estruturados, devido ao carácter progressivo da desestruturação à medida que aumenta a tensão vertical efectiva. Pela dificuldade em definir-se o ponto de cedência, a análise da variação de m_v é mais sensível e mais apropriada para solos fracamente estruturados (Wesley, 1994). Daí que, devido às características intrínsecas dos solos residuais graníticos, seja aconselhado o uso de gráficos do tipo índice de vazios (e) versus tensão vertical efectiva (σ'_v), usando a escala linear, em vez das teorias clássicas para solos sedimentares com a escala logarítmica da tensão vertical efectiva aplicada ($\log \sigma'_v$), podendo daquela forma visualizar-se o incremento da compressibilidade no ponto de cedência estrutural.

De qualquer forma, após quebra total das ligações interpartículas, para σ'_v elevadas, a evolução destes solos residuais converge para o comportamento típico de materiais granulares equivalentes, em que a compressibilidade (C_c) é comandada pelas tensões de contacto entre partículas individuais.

Quadro 5.7 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, das amostras indeformadas dos solos residuais do maciço granítóide de Évora submetidas ao ensaio edométrico.

Amostras indeformadas	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	e_{f2} (%)
5i99	18,93	16,67	0,579	13,7	63,4	0,350	0,381	15,7
83i99	21,08	18,82	0,422	12,2	78,8	0,245	0,301	14,9
87i99	20,79	17,55	0,492	15,0	81,0	0,222	0,320	18,5

Quadro 5.8 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos dos ensaios edométricos dos solos residuais mais finos do maciço granítóide de Évora.

Amostras indeformadas	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	m_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	c_v (10^{-8} m 2 /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
5i99	3,8-0,6	2,39-0,44	10,2-3,73	2,43-0,17	135	0,15	0,01
83i99	3,9-0,6	2,81-0,4	7,22-3,04	2,03-0,14	126	0,14	0,02
87i99	4,3-0,8	3,14-0,59	25,8-7,47	12,49-0,46	129	0,17	0,03

Os intervalos de variação dos coeficientes de compressibilidade (a_v), compressibilidade volumétrica (m_v), consolidação (c_v) e permeabilidade (k), constam no Quadro 5.8, notando-se em todos eles uma diminuição, à medida que vão aumentando as tensões verticais efectivas aplicadas.

Os valores dos índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s), não apresentam grandes discrepâncias, uma vez que os solos ensaiados eram semelhantes em termos de características de identificação e físicas; contudo, os valores mais altos para aqueles índices correspondem aos solos com maior teor em água inicial (w_i). Os resultados obtidos são típicos de materiais areno-siltosos. Os valores determinados para a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p) apresentam-se bastante semelhantes nas três amostras estudadas, o que pode ser indicador de, para além das mencionadas características, também os processos de alteração a que foram submetidas as rochas de origem podem ter sido similares.

Quadro 5.9 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE ÉVORA.

SOLOS		1	2	5	60	61	62	83	87	88
LOCALIZAÇÃO		Monte das Flores	Pomari -nho	Fiuza	A6 (km12 + 350m)	A6 (km15 + 325m)	A6 (km16 + 175m)	Barra-gem Montenovo	Escourral	Aguiar
DESCRÍÇÃO		Areia bem graduada, com silte e cascalho cinzenta.	Areia bem graduada, com silte e cascalho cinzenta.	Arcia siltosa, cinzen- ta.	Areia grossa siltosa, castanha amare- lada.	Areia bem graduada com silte, castanha amare- lada.	Areia siltosa, amare- la acinzen- tada.	Areia siltosa, cinzen- ta acasta- nhada.	Areia siltosa, cinzen- ta amare- lada.	Areia bem graduada com silte, cinzen- ta amare- lada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w_o (%)	5	9,4	6,5	10,5	5,6	5,5	20,2	8,8	6,0
	γ_o (KN/m ³)	18,63	18,54	15,30	18,24	17,16	15,10	19,32	17,85	17,65
	γ_d (KN/m ³)	16,87	16,97	14,32	16,57	16,28	14,32	16,08	16,48	16,67
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	93,95	99,40	100	99,85	99,90	97,18	99,95	99,42	88,72
	< 2,00 mm	87,73	75,00	92,82	96,41	91,90	78,06	94,94	84,33	46,80
	< 0,425mm	28,97	28,70	61,35	55,79	42,00	37,39	57,32	38,45	16,36
	< 0,075mm	11,32	9,50	23,07	12,65	12,6	14,49	27,62	21,46	5,47
	< 0,002mm	2,06		4,89		1,16				
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	30	27	33	28	27	37	42	31	26
	w_{Lc} (%)	31	34	37	36	36	44	44	34	32
	w_p (%)	27	--	--	--	--	32	36	25	22
	I_p (%)	3	NP	NP	NP	NP	5	6	6	4
	I_{pc} (%)	4	NP	NP	NP	NP	12	8	9	10
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SW-SM	SW-SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SW-SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-1-b	A-2- 4	A-2- 4	A-1-b	A-1-b	A-2 -5	A-1-b	A-1-a
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	18,83		16,97	17,36	19,9(p)	18,34	16,57	18,14	19,8(p)
	$w_{ópt}$ (%)	13,5		17,0	14,0	9,4 (p)	16,3	19,3	16,8	11,9(p)
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	30	36	29	28	33	29	20	29	80
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,13	0,08	0,09	0,08	0,07	0,09	0,09	0,07	0,10
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	6,5	7,8	7,2	9,6	4,2	3,4	12,5	11,8	6,13
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$9,7 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-4}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,38	26,58	26,28	28,05	26,38	26,28	26,87	25,99	25,40
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,564	0,566	0,836	0,692	0,620	0,836	0,671	0,577	0,512
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	36,1	36,2	45,5	40,9	38,3	45,5	40,1	36,6	33,9
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	35,7	36,8	33 (ind.)				32 (ind.)	32	
	c (KPa)	0	0	20 (ind.)				3 (ind.)	8,6	
EDOMÉTRICO	C_c			0,15				0,14	0,17	
	C_s			0,01				0,02	0,03	

5.3 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Arraiolos

Nesta dissertação designa-se por maciço eruptivo de Arraiolos, o conjunto de rochas intrusivas essencialmente de natureza intermédia, que constituem o substrato rochoso, aflorante ou não, que se estende de Arraiolos até Nossa Sr^a de Machede, a NE de Évora. Ocorrem manchas mais pequenas destas formações nos arredores de Igrejinha e Évora-Monte. A área abrangida por este complexo granítico ultrapassa os 300 Km². Estas rochas consistem essencialmente de quartzodioritos de granularidade variável e granodioritos de grão médio a grosseiro, surgindo com menor frequência gabros e dioritos de grão médio a grosseiro, granitos alcalinos e filões ou massas aplito-pegmatíticas (Carvalhosa *et al.*, 1987). Devido à grande variabilidade litológica, com passagens frequentes de uns tipos litológicos para outros, em que os contactos não são nítidos, as unidades litoestratigráficas que se adoptaram correspondem ao tipo litológico predominante.

As formações rochosas patenteiam um estado de alteração algo diferenciado consoante a sua composição mineralógica, granularidade e sistemas de diaclases. As rochas deste complexo apresentam uma natureza mais básica que as do maciço eruptivo de Évora, o que as torna mais vulneráveis à meteorização, entre outros factores, por possuírem maior percentagem de minerais mais sensíveis à alteração química (Cap.3). Os maciços rochosos apresentam-se superficialmente decompostos ou muito alterados (W₄₋₅), embora ocorram por vezes pouco alterados, consequência da sua granularidade, resistência mecânica e de nessas zonas o afastamento entre fracturas ser acentuado, donde resultam por vezes afloramentos com aspecto de caos de blocos, frequentemente de grandes dimensões, de formas arredondadas.

Os solos residuais resultantes destas formações, apresentam em geral, textura mais fina e tons mais escuros do que os solos pertencentes ao maciço de Évora e, espessuras que variam muito em função do tipo litológico que lhes deu origem e em função do diaclasamento (Cap.3), mas que podem ultrapassar os 10m.

5.3.1 – Dados compilados

Os solos residuais do complexo granítico de Arraiolos foram alvo de alguns estudos geológicos e geotécnicos, de que se destacam a CMDE – Carta de Materiais do Distrito de Évora (JAE, 1980a) e A6-Év/Es – Auto-estrada Marateca/Elvas - sublanço Évora/Estremoz (JAE/BRISA, 1995). No Quadro 5.10 são apresentados o tipo e número de ensaios compilados por cada estudo consultado. Os intervalos de variação das características de identificação e compactação compiladas constam no Quadro 5.11.

Quadro 5.10 – Tipo e número de ensaios laboratoriais compilados de estudos geotécnicos, relativos aos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Arraiolos.

Estudos	Análises granulométricas	Limites de consistência	w _o	EA	Compactação	CBR	Classificação	
							AASHTO	Unificada
CMDE	12	12		12			12	12
A6-Év/Es	10	10	6	3	6	5	10	10
TOTAL	22	22	6	15	6	5	22	22

Pela análise do Quadro 5.11, verifica-se que os solos residuais da mancha de Arraiolos são mais finos do que os da mancha de Évora (Quadro 5.2), o que confirma a natureza das

formações de Arraiolos mais vulneráveis à meteorização. A plasticidade também é ligeiramente superior.

Quadro 5.11 – Intervalos de variação das características compiladas, correspondentes aos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			w _L (%)	I _P (%)	w _o (%)	EA (%)	γ _{dmáx} (KN/m ³)	w _{ópt} (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDE	8 - 28	22 - 49	56 - 96	NR - 34	NP - 15		17 - 59			
A6-Év/Es	7 - 47	30 - 77	51 - 95	NR - 41	NP - 15	4 - 17	22 - 26	18,1 - 19,8	9,1 - 13,8	7 - 11
TOTAL	7 - 47	22 - 77	51 - 96	NR - 41	NP - 15	4 - 17	17 - 59	18,1 - 19,8	9,1 - 13,8	7 - 11

Os valores do equivalente de areia demonstram uma certa dispersão, reflexo da grande variedade dos tipos litológicos presentes, quer no que respeita à mineralogia quer à granularidade. Os valores do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) são inferiores aos obtidos para a mancha de Évora. Por outro lado, os valores do teor em água óptimo ($w_{ópt}$) são mais elevados, facto que reforça a ideia de solos mais finos e com um comportamento de qualidade inferior quando compactados. Os valores de CBR também comprovam a menor resistência à penetração do pistão para iguais condições de compactação.

As classificações geotécnicas dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Arraiolos são expostas na Figura 5.8.

São essencialmente solos areno-siltosos com plasticidade nula a baixa, embora pontualmente possam ocorrer solos argilosos, ainda que pouco ou medianamente plásticos. Na maioria dos casos os solos pertencem aos sub-grupos A-1-b e A-2-4 da Classificação AASHTO para fins rodoviários, sugerindo um comportamento bom a excelente sob o pavimento. No entanto, devido à rápida evolução do estado de alteração, consequência da sua composição mineralógica, não são aconselháveis para a camada de coroamento dos aterros.

5.3.2 – Resultados experimentais

Nos solos residuais do complexo granítóide de Arraiolos, foram seleccionados nove locais de amostragem e prospecção. Nestes locais, já descritos no Capítulo 3, abundam solos com características que, através da inspecção visual, não parecem muito distintas umas das outras. São essencialmente solos areno-siltosos apresentando tons que variam do cinzento ao castanho, passando pelo cinzento amarelado e castanho amarelado. As amostras 8, 34, 36, 37 e 44, foram colhidas em saibreiras ou taludes de estradas; as amostras 63, 64, 65 e 66 foram retiradas dos taludes de escavação para a A6 - Autoestrada Marateca /Elvas - sub-lanço Évora /Estremoz.

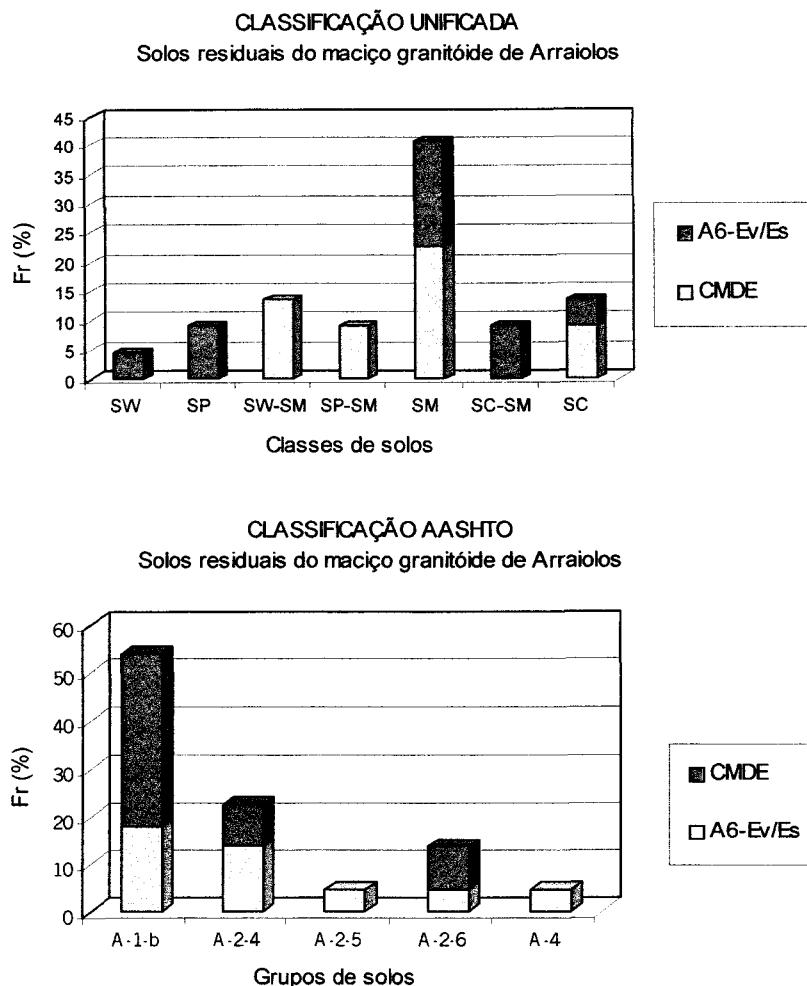


Figura 5.8 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.

5.3.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das amostras dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Arraiolos constam na Figura 5.9. O fuso granulométrico é estreito, o que reflecte uma certa homogeneidade dos parâmetros granulométricos, superior à verificada no maciço de Évora, com percentagens de finos que variam entre 8 e 29 % (Quadro 5.12). O intervalo de variação da percentagem de areia nestes solos, 69 a 79 %, é muito menor do que nos solos residuais do maciço de Évora, onde as distribuições granulométricas se mostram mais distintas. A percentagem de argila determinada em dois destes solos, não ultrapassa 4 %, portanto muito baixa. Todos os solos apresentam uma granulometria extensa ($Cu > 12$), e são bem graduados, excepto a amostra 36, com um Cc de 4,5, isto é mal graduado, mas mesmo assim não se distancia muito das outras amostras.

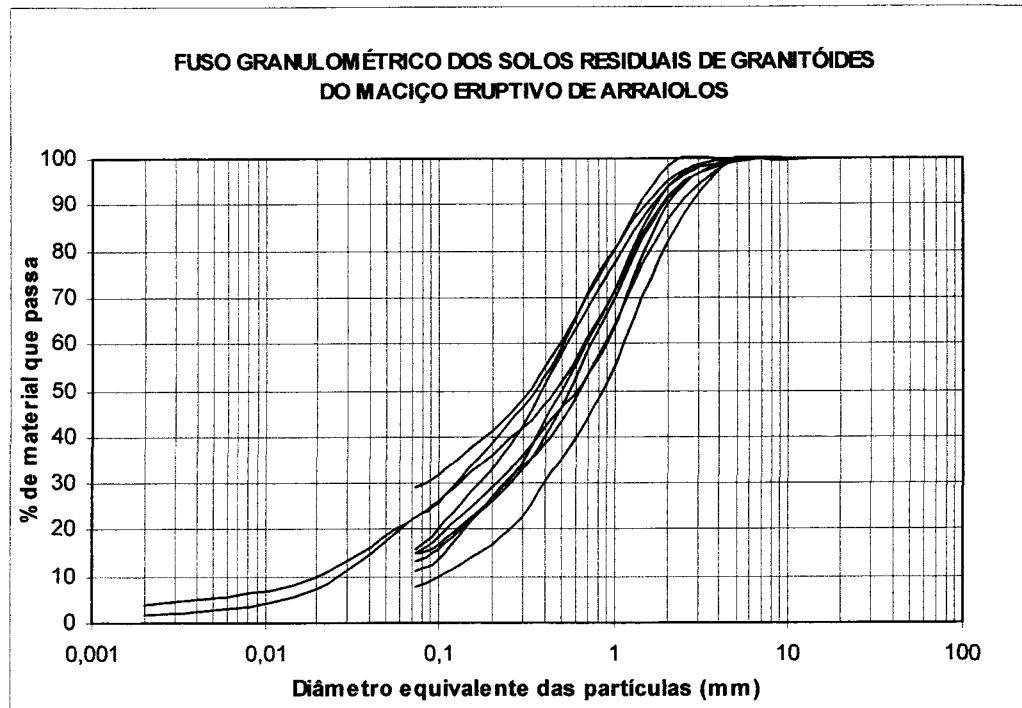
b) Consistência

Dos nove solos amostrados, seis são não plásticos (Quadro 5.17) e, os restantes apresentam baixa plasticidade. Os limites de liquidez determinados pelo método do cone são superiores

aos valores determinados pelo método da Concha de Casagrande, em cerca de 6 % (Quadro 5.12). O limite de retracção (w_R), determinado pelo método de Casagrande, aproxima-se bastante do limite de plasticidade (w_p), o que é comum no caso de solos siltosos; o índice de liquidez (I_L) calculado indica que estes solos estão longe de entrar em liquefação; o índice de consistência (I_C), é sempre superior a 2, o que é lógico, pois este tipo de classificação é mais apropriada para solos coerentes; a actividade coloidal (Ac) é extremamente variável de 0,51-solo inactivo a 3,43-solo muito activo, não esquecendo porém que os solos têm percentagens muito baixas de argila, e igualmente baixos são os índices de plasticidade (I_P), quando os têm.

Quadro 5.12 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
2 - 4	7 - 20	69 - 79	0,01 - 0,1	12 - 48	1,1 - 4,5	23 - 32	29 - 39	NP-27	NP - 7	NP - 14
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
24-34	4 - 9	$3,5 \times 10^{-5}$ - $8,6 \times 10^{-4}$	0,02-0,09	26,38 - 27,75	0,51 - 3,43	(-8)-(-2)	3 - 9	22-25	SM SW-SM	A-1-b - A-2-4



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grossa	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.9 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas, Unificada e AASHTO, dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Arraiolos constam no Quadro 5.17. Dos nove solos amostrados, sete são areias siltosas (SM), e os dois restantes são areias bem graduadas com silte (SW-SM); estas foram também as classes mais representadas nos estudos consultados para este tipo de solos residuais. Quanto à classificação AASHTO, também aqui há uma maior homogeneidade em relação à classificação dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Évora; seis solos pertencem ao subgrupo A-1-b e três pertencem ao subgrupo A-2-4, isto é, para fins rodoviários, todos eles apresentam um bom comportamento na camada sob o pavimento.

d) Outras propriedades

Os pesos específicos das partículas sólidas (γ_s) dos solos residuais do complexo granitóide de Arraiolos (Quadro 5.12) apresentam um intervalo de variação de valores mais pequeno do que o correspondente aos solos residuais do maciço granitóide de Évora (Quadro 5.3). Por outro lado, a média daqueles valores é superior à média destes últimos, ou seja, na mancha de solos de Arraiolos, os valores dos pesos específicos das partículas são, em geral, mais elevados, pois há uma maior percentagem de minerais ferromagnesianos, portanto mais densos; afastam-se mais dos valores típicos de granitos, pois estes solos resultam da alteração de quartzodioritos e granodioritos.

As determinações do equivalente de areia (EA) para estes solos não apresentam variações muito grandes, confirmando uma vez mais, a maior homogeneidade destes solos. Além disso, são valores característicos de solos menos arenosos e com uma percentagem de materiais finos, em regra, superiores aos solos da mancha de Évora.

As expansibilidades (Exp) obtidas para os solos estudados são baixas e variam pouco (4-9%); o que significa que os finos existentes têm características pouco expansivas e que não diferem muito de amostra para amostra.

Os solos residuais do maciço granitóide de Arraiolos apresentam permeabilidade (k), considerada média, característica de solos arenosos com mais ou menos silte. De qualquer forma, também a variação deste parâmetro é inferior à variação dos valores determinados para os solos da mancha de Évora.

O teor em matéria orgânica (MO) detectada nos solos estudados ainda é inferior aos valores determinados para os solos da mancha de Évora; isto é, insignificante sem qualquer influência nas propriedades geotécnicas dos materiais. O tom mais escuro destes solos, deve-se unicamente à constituição mineralógica dos produtos resultantes da alteração dos quartzodioritos e granodioritos.

5.3.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, foram avaliadas simultaneamente com a realização da amostragem e constam no Quadro 5.13.

Quadro 5.13 – Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos.

w_o (%)	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_o	n	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	$w_{ópt}$ (%)
5 - 10	16,8 - 20,5	16,1 - 19,0	0,438 - 0,677	30,5 - 40,4	18,0 - 19,6	10,1 - 13,6

Os valores do teor em água natural (w_o), apresentados por estes solos são em geral baixos: 1) por um lado devido às condições climatéricas da região (precipitações baixas e insolação elevada); 2) por outro lado, devido ao carácter arenoso dos solos que facilita a rápida drenagem das águas que se infiltram.

O peso volúmico seco (γ_d), determinado *in situ*, apresenta, para estes solos valores mais altos (Quadro 5.13) que os encontrados para os solos da mancha de Évora (Quadro 5.4). Este facto deve-se: 1) à estrutura dos solos, que na mancha de Évora é mais aberta, pois os solos apresentam índice de vazios e porosidade superiores; 2) à composição mineralógica (maior quantidade de minerais mais densos nos solos da mancha de Arraiolos); 3) à granularidade que, nos solos desta mancha é caracterizada por materiais mais finos e melhor graduados, permitindo melhor empacotamento das partículas.

b) Compactação

A partir dos ensaios de compactação tipo Proctor, determinaram-se os valores do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e o respectivo teor em água óptimo ($w_{ópt}$) para os solos residuais do maciço granítóide de Arraiolos. Os valores obtidos diferem pouco uns dos outros e também estão de acordo com os dados coligidos (Quadro 5.11).

5.3.2.3 – Parâmetros de resistência

Com o objectivo de determinar as características de resistência ao corte em laboratório, seleccionaram-se apenas três amostras nos nove locais de amostragem, uma vez que as restantes propriedades revelaram uma certa uniformidade de valores nos solos estudados. Foram escolhidas as amostras 8 e 37 remexidas e a amostra 44 indeformada e remexida. A amostragem destes solos foi dificultada, quer pela fraca coesão entre partículas, quer pela existência de estruturas reliquia, principalmente diaclases, que “repartiam” o maciço terroso em várias direcções, daí que apenas foi possível a colheita de uma amostra indeformada.

O procedimento seguido para a montagem das amostras e execução dos ensaios de corte directo, e inverso no caso da amostra 44, está descrito no Cap.2 e foi o mesmo para todas as amostras de solos residuais de todos os maciços estudados.

As curvas, tensões de corte e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, relativas à amostra 44 indeformada, para o corte directo e inverso, são apresentadas na Figura 5.10. As curvas apresentam algumas irregularidades, devidas a roturas ou deslocamentos bruscos de grãos mais grosseiros, que ocorrem na zona de corte do provete. Estas irregularidades são mais evidentes na caixa 2 do ensaio de corte, com aumentos e diminuições bruscas na tensão de corte. As rectas de Coulomb, correspondentes a estes ensaios, obtidas a partir das tensões de corte máximas, são apresentadas na Figura 5.11. Aqui também se nota para a caixa 2 do ensaio de corte directo, um certo desfasamento, com aumento da tensão de corte na rotura, em relação às outras caixas; este facto não é invulgar em ensaios de corte directo realizados

em amostras indeformadas de solos residuais, onde os grãos grosseiros angulosos abundam, ou mesmo as estruturas relíquia, tais como diaclases preenchidas por materiais mais resistentes, podem ocorrer. Em contrapartida, no corte inverso dos mesmos provetes obtém-se um coeficiente de regressão linear superior, o que é natural, pois os “obstáculos” já tinham sido ultrapassados. De qualquer forma o ângulo de atrito obtido no corte inverso é ligeiramente superior ao obtido no corte directo, devido à rotação dos grãos mais grosseiros e angulosos; a coesão é inferior, pois houve ligações entre partículas que se desfizeram durante o corte directo. Os parâmetros de resistência ao corte obtidos para a amostra indeformada e para as remexidas constam no Quadro 5.14.

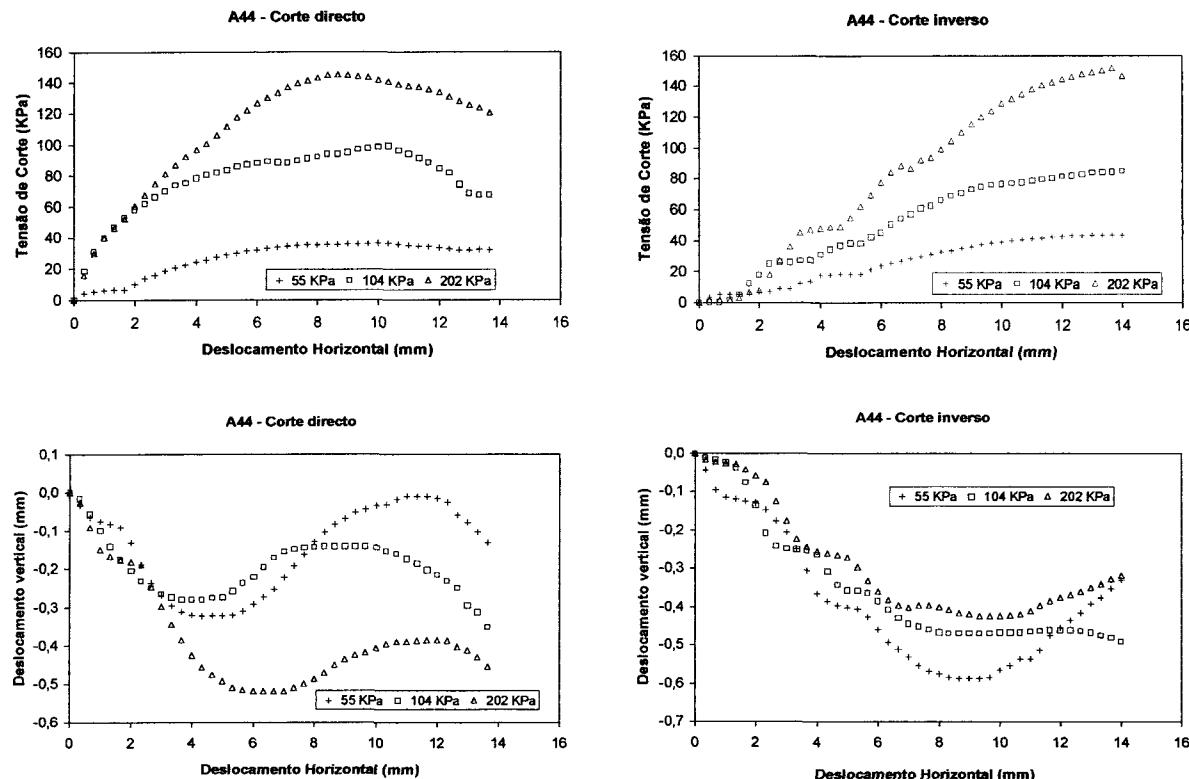


Figura 5.10 – Curvas-tipo de ensaios de corte de directo e inverso em amostra indeformada dos solos residuais do maciço granitoide de Arraiolos.

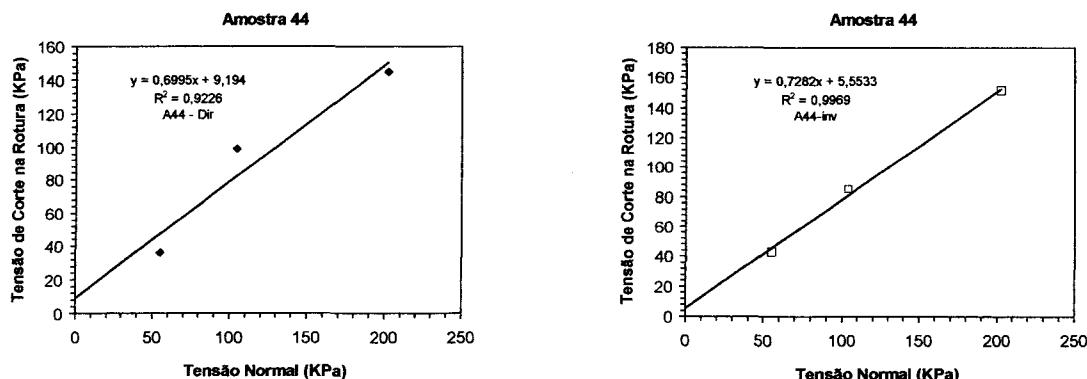


Figura 5.11 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada dos solos residuais dos granítóides do maciço de Arraiolos.

Quadro 5.14 – Parâmetros de resistência ao corte directo e inverso em amostras indeformadas e remexidas dos solos residuais dos granítóides do maciço de Arraiolos.

Amostras		8	37	44i	44
corte directo	ϕ (o)	32,0	35,9	35,0	34,1
	c (Kpa)	4,0	1,3	9,2	5,6
corte inverso	ϕ (o)			36,1	
	c (Kpa)			5,6	

O intervalo de variação dos valores do ângulo de atrito (ϕ) determinados para estes solos residuais varia entre 32° e 36° ; uma pequena variação em valores típicos de solos granulares. O valor mais elevado de ϕ corresponde ao solo que possui uma percentagem maior de elementos grosseiros, cujos poucos finos são não plásticos e a coesão é mais reduzida; o menor valor de ϕ corresponde à amostra com maior percentagem de finos (Quadro 5.17).

5.3.2.4 – Compressibilidade

No local de amostragem junto a Arraiolos foi colhida uma amostra de solo em bloco, a uma profundidade aproximada de 1,5 metros, que foi cuidadosamente acondicionada e transportada para laboratório. Aí, foi obtido um provete indeformado, pela cravação do anel do edómetro, com um diâmetro de 99 mm, o qual foi posteriormente submetido ao ensaio edométrico. O procedimento seguido para a execução do ensaio foi o mesmo que foi aplicado para todos os ensaios edométricos realizados nos solos residuais das restantes manchas de granítóides.

A curva de compressibilidade ‘índice de vazios versus logaritmo da tensão efectiva’ do ensaio realizado na amostra 44 indeformada, apresenta-se na Figura 5.12. Os parâmetros físicos, iniciais e finais, do provete submetido ao ensaio edométrico, constam no Quadro 5.15. Os parâmetros de compressibilidade do solo estudado são apresentados no Quadro 5.16.

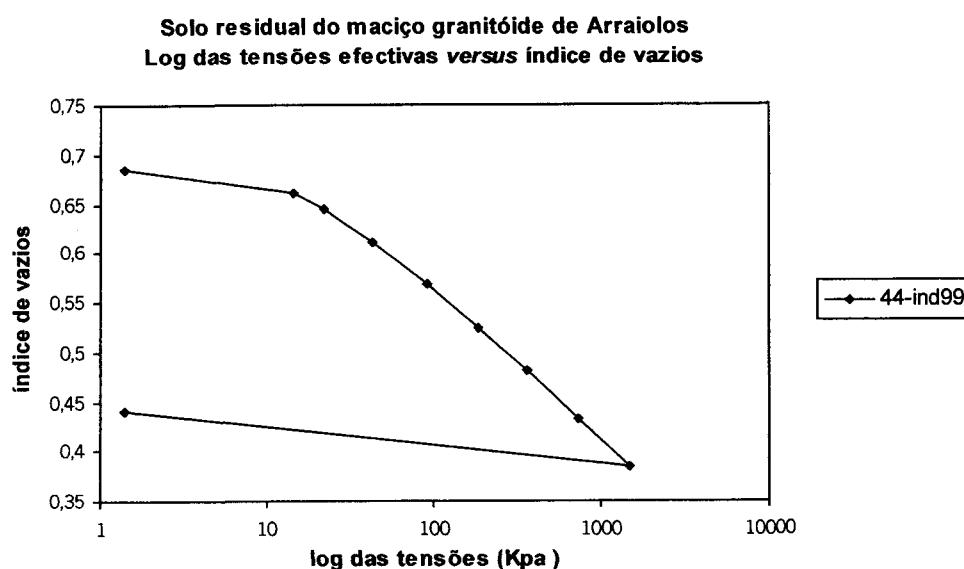


Figura 5.12 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada do solo residual de um tonalito do maciço granítóide de Arraiolos.

Quadro 5.15 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual de um tonalito do maciço eruptivo de Arraiolos, submetida ao ensaio edométrico.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_0 (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	w_f (%)
44i99	16,87	15,69	0,685	7,8	30,7	0,385	0,441	14,3

Quadro 5.16 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual de um tonalito do maciço eruptivo de Arraiolos.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	m_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	c_v (10 ⁻⁸ m ² /s)	k (10 ⁻¹⁰ m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
44i99	4,8-0,7	3,05-0,46	6,87-2,75	2,15-0,13	63	0,16	0,02

Analizando a curva de compressibilidade deste solo, verifica-se uma diminuição brusca do índice de vazios, quando se passa para o segundo escalão de carga. Esta variação rápida, pode dever-se tanto a uma cedência na estrutura do solo, como a rearranjos do provete dentro do anel, devido aos problemas que a amostragem indeformada dos solos residuais apresenta. De qualquer forma a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p) para esta amostra, determinada pelo método de Casagrande, é 63 KPa, valor consideravelmente abaixo dos valores encontrados, para esta tensão, nos solos residuais dos granítóides do maciço de Évora, facto que pode ser indicador de que os solos residuais do maciço de Arraiolos atingem o ponto de cedência, para tensões verticais efectivas menores. Outro facto que deve ser levado em linha de conta para a interpretação desta curva, é que o índice de vazios inicial (e_i) deste solo (Quadro 5.15) é superior ao dos solos das amostras do maciço de Évora (Quadro 5.7); pelo contrário, o teor em água inicial (w_i) é substancialmente inferior, o que nos primeiros escalões de carga, como a tensão vertical efectiva é reduzida, pode levar a um “embebimento” por parte do provete e consequentemente ao colapso da estrutura, devido à lubrificação das pontes de ligação entre partículas.

Os valores dos parâmetros de compressibilidade obtidos para o solo estudado e, constantes no Quadro 5.16, não se afastam muito dos valores relativos aos solos da mancha de Évora, e são característicos de solos arenoso-siltosos.

Quadro 5.17 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE ARRAIOLOS.

SOLOS		8	34	36	37	44	63	64	65	66
LOCALIZAÇÃO		Azaru-ja	Évora-monte 1	Évora-monte 2	Évora-monte 3	Arraio-los	A6 (km28 + 250m)	A6 (km20 + 800m)	A6 (km29 + 700m)	A6 (km31)
DESCRIÇÃO		Areia siltosa, cinzen- ta amare- lada.	Areia siltosa, casta- nha.	Areia siltosa, casta- nha clara.	Areia bem gradua- da com silte, cinzen- ta acasta- nhada.	Areia siltosa, casta- nha amare- lada.	Areia grossa siltosa, casta- nha amare- lada.	Areia grossa siltosa, casta- nha amare- lada.	Areia bem gradua- da com silte, amare- la acasta- nhada.	Areia grossa siltosa, casta- nha amare- lada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w _o (%)	9,9	9,9	8,2	8,0	10,1	8,8	4,5	6,6	10,2
	γ _o (KN/m ³)	18,04	18,24	17,55	20,50	18,54	19,42	16,77	18,93	18,34
	γ _d (KN/m ³)	16,38	16,67	16,18	19,03	16,87	17,85	16,08	17,75	16,57
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	97,04	99,97	100	99,69	100	99,73	100	100	99,68
	< 2,00 mm	91,82	98,28	94,04	86,71	95,30	91,46	90,10	82,15	94,09
	< 0,425mm	47,88	56,47	45,33	39,46	54,40	41,65	43,20	31,67	53,23
	< 0,075mm	22,76	29,05	15,08	11,17	22,60	13,20	14,90	7,87	15,83
	< 0,002mm	1,75				3,91				
LIMITES DE ATTERBERG	w _L (%)	32	32	30	24	28	25	23	26	27
	w _{LC} (%)	31	39	34	32	36	33	36	29	34
	w _P (%)	26	25	--	24	26	25	23	--	27
	I _P (%)	6	7	NP	0	2	0	0	NP	0
	I _{PC} (%)	5	14	NP	8	10	8	13	NP	7
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SM	SM	SM	SW-SM	SM	SM	SM	SW-SM	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-2-4	A-1-b	A-1-b	A-2-4	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4
COMPACTAÇÃO	γ _{d máx} (KN/m ³)	18,05		18,83	19,61	18,14		18,04	19,61	19,44
	w _{ópt} . (%)	13,6		10,8	10,1	11,2		13,0	11,7	10,9
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	34	27	29	26	24	32	34	30	28
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,02	0,09	0,08	0,07	0,04	0,06	0,03	0,04	0,05
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	7,9	9,0	8,2	5,4	4,8	4,1	3,6	7,4	7,9
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$4,9 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-5}$
PÉSO ESPECÍFICO DAS PARCÍCULAS SÓLIDAS	γ _s (KN/m ³)	26,87	27,75	26,87	27,36	26,38	26,97	26,97	27,07	27,36
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e _o	0,641	0,665	0,661	0,438	0,564	0,511	0,677	0,525	0,651
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	39,1	39,9	39,8	30,5	36,1	33,8	40,4	34,4	39,4
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	32			35,9	35 (ind.)				
	c (KPa)	4			1,32	9,2 (ind.)				
EDOMÉTRICO	C _c					0,16				
	C _s					0,02				

5.4 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo

O maciço eruptivo de Montemor-o-Novo é essencialmente constituído por quartzdioritos que afloram a oeste da cidade com o mesmo nome, numa área aproximada a 70Km², sob forma oval. Estas rochas meteorizam-se com facilidade, e a superfície de aplanação é mais homogénea e mais baixa do que nas rochas metamórficas que as rodeiam.

As rochas ígneas quartzdioríticas são geralmente de grão médio a grosseiro, biotítico, cinzento a cinzento escuro (Carvalhosa *et al.*, 1994). Os maciços eruptivos foram atingidos por forte meteorização, que provocou a sua arenização, caracterizando-se geralmente os afloramentos pela presença de caos de blocos, de forma quase esférica e por vezes de apreciáveis dimensões, envoltos em solos residuais de natureza areno-siltosa e, mais raramente, areno-argilosa, castanhos a castanhos escuros.

A espessura média dos solos residuais desta mancha, ronda os 5 metros, mas em certos locais podem ultrapassar os 8 metros. É comum a passagem brusca de solo residual para rocha sã, pois nos locais de identificação, praticamente não se observa rocha alterada.

5.4.1 – Dados compilados

No âmbito do estudo do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo, consultaram-se dois relatórios geológicos e geotécnicos considerados mais importantes: CMDE – Carta de Materiais do Distrito de Évora (JAE, 1980a); A6-V/M – Auto-estrada Marateca/Elvas – sublanço Vendas Novas/Montemor-o-Novo (JAE/BRISA, 1993). Neste último estudo foram efectuadas 27 sondagens nos terrenos do maciço tonalítico, que ilustram bem a acentuada meteorização a que este maciço foi sujeito. Num total de 267 m de furação efectuados nestes terrenos, cerca de 219 m (82%), foram realizados à percussão em saibros tonalíticos, e apenas 48 m (18%) à rotação, em rocha tonalítica, não tendo nenhuma das sondagens sido iniciada à rotação. No Quadro 5.18, são apresentados o tipo e número de ensaios coligidos por estudo. Os intervalos de variação, das características de identificação e compactação, constam no Quadro 5.19.

Quadro 5.18 – Tipo e número de ensaios laboratoriais compilados, relativos aos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.

Estudos	Análises granulométricas	Limites de consistência	w _o	EA	Compactação	CBR	Classificação	
							AASHTO	Unificada
CMDE	7	7		7			7	7
A6-V/M	15	15	2		3	3	15	15
TOTAL	22	22	2	7	3	3	22	22

Quadro 5.19 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	I _P (%)	w _o (%)	EA (%)	γ _{dmáx} (KN/m ³)	w _{ópt} (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDE	4 - 54	16 - 65	36 - 91	NR - 34	NP - 13		19 - 55			
A6-V/M	7 - 43	16 - 61	41 - 93	NR - 47	NP - 19	9 - 11		17,3 - 19,7	10 - 13	10 - 13
TOTAL	4 - 54	16 - 65	36 - 93	NR - 47	NP - 19	9 - 11	19 - 55	17,3 - 19,7	10 - 13	10 - 13

Pelos dados expostos no Quadro 5.19, verifica-se que os solos resultantes destes quartzodioritos apresentam uma percentagem de materiais finos superior à mesma percentagem dos solos da mancha de Évora e de Arraiolos; este facto confirma que estas formações, devido à sua composição mineralógica mais próxima das rochas básicas, é muito mais suscetível à meteorização que os granitos e granodioritos. Por vezes, ocorrem nestas formações, solos com finos de plasticidade média; significando que nestes finos há um acréscimo da quantidade de argila em relação ao silte.

Os valores de equivalente de areia variam consideravelmente; mas há que levar em conta que este parâmetro depende bastante da granularidade dos solos, quantidade e qualidade dos finos, factores que estão directamente relacionados com o estado de alteração destes solos residuais. O intervalo dos valores do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) apresenta um limite inferior mais baixo que os valores correspondentes às manchas de Évora e de Arraiolos, assim como um teor em água óptimo ($w_{ópt}$), superior em média, aos obtidos para solos daquelas duas manchas, o que está de acordo com as características de identificação dos solos em estudo.

As classificações geotécnicas dos solos residuais dos quartzodioritos (tonalitos) de Montemor-o-Novo são apresentados na Figura 5.13.

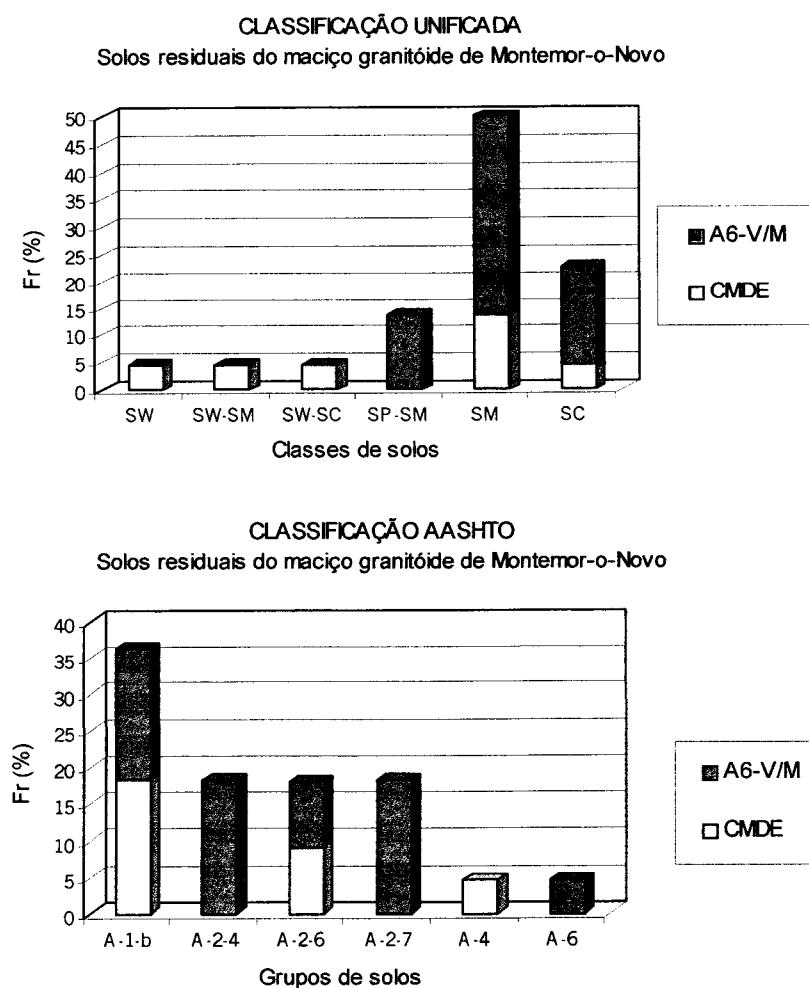


Figura 5.13 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço de Montemor-o-Novo.

Dos ensaios de identificação realizados nas 22 amostras de solos, pode-se concluir que se trata de solos areno-siltosos e areno-argilosos com seixo disperso. Estes solos pertencem na sua maioria aos grupos A-1-b e A-2. Os resultados de laboratório indicam que os solos residuais dos quartzodioritos poderão, para fins rodoviários, ser utilizados na construção do corpo e coroamento dos aterros e apresentarão capacidade de suporte adequada como leito do pavimento em zonas de escavação.

5.4.2 – Resultados experimentais

Na mancha dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo foram escolhidos apenas dois locais de amostragem, para se proceder ao estudo destes solos: primeiro, porque se trata de uma mancha considerada pequena, quando comparada com outras do Alto Alentejo; depois, porque se trata de solos com características praticamente homogéneas. Um dos locais de amostragem (amostra 59) situa-se numa pedreira à saída de Montemor-o-Novo para Lavre, a qual possui um perfil de solo residual castanho escuro, com uma altura superior aos 8m; o outro local (amostra 86) é uma saibreira localizada junto à EN4 de Montemor-o-Novo para Vendas Novas cuja espessura de solo ronda os 6 m, mas a extensão ultrapassa os 200 m (Cap. 3).

5.4.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das amostras dos solos residuais do quartzodiorito de Montemor-o-Novo são apresentadas na Figura 5.14. Ambos os solos possuem granulometrias extensas e são bem graduados. No Quadro 5.20 constam estas, e outras características gerais destes solos residuais. Contêm uma percentagem de finos superior à dos solos até agora apresentados. Na amostra 59 determinou-se uma percentagem de argila considerável, comparativamente aos solos já estudados. Em contrapartida, a percentagem de areia é bem menor nos solos residuais tonalíticos em relação aos solos residuais de outros granitóides.

Quadro 5.20 – Características gerais dos solos residuais do maciço tonalítico de Montemor-o-Novo.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{LC} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{PC} (%)
8	25	56 - 58	0,006	30 - 75	1,3 - 1,6	29 - 30	34 - 35	21 - 22	7 - 9	12 - 14
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ _s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
22-27	9 - 10	3,5×10 ⁻⁵ - 1,9×10 ⁻⁴	0,01-0,07	26,3 - 26,9	1,15	(-0,8) - (-2,2)	1,8-3,2	18-19	SM SC	A-2-4

b) Consistência

Os solos residuais das rochas tonalíticas de Montemor-o-Novo são os que apresentam maiores plasticidades, devido à maior percentagem de finos, e de argila, principalmente. De resto, nota-se uma grande constância de propriedades relacionadas com os limites de

consistência (Quadro 5.20), o que aliás reforça a grande uniformidade nas características deste solo. O índice de consistência, apesar de mais baixo, está próximo de 2 ou acima deste valor, o que garante a estabilidade destes solos em relação ao colapso por saturação, pois o teor em água natural fica muito aquém do limite de liquidez, e a probabilidade de o atingir é praticamente nula neste tipo de solos. O mesmo se verifica em relação ao índice de liquidez, que apesar de estar mais próximo da unidade, o risco de o solo entrar em liquefação, praticamente não existe, pois seria necessário que o teor em água natural atingisse pelo menos os 40 %, o que é pouco provável. A actividade coloidal das argilas é considerada média.

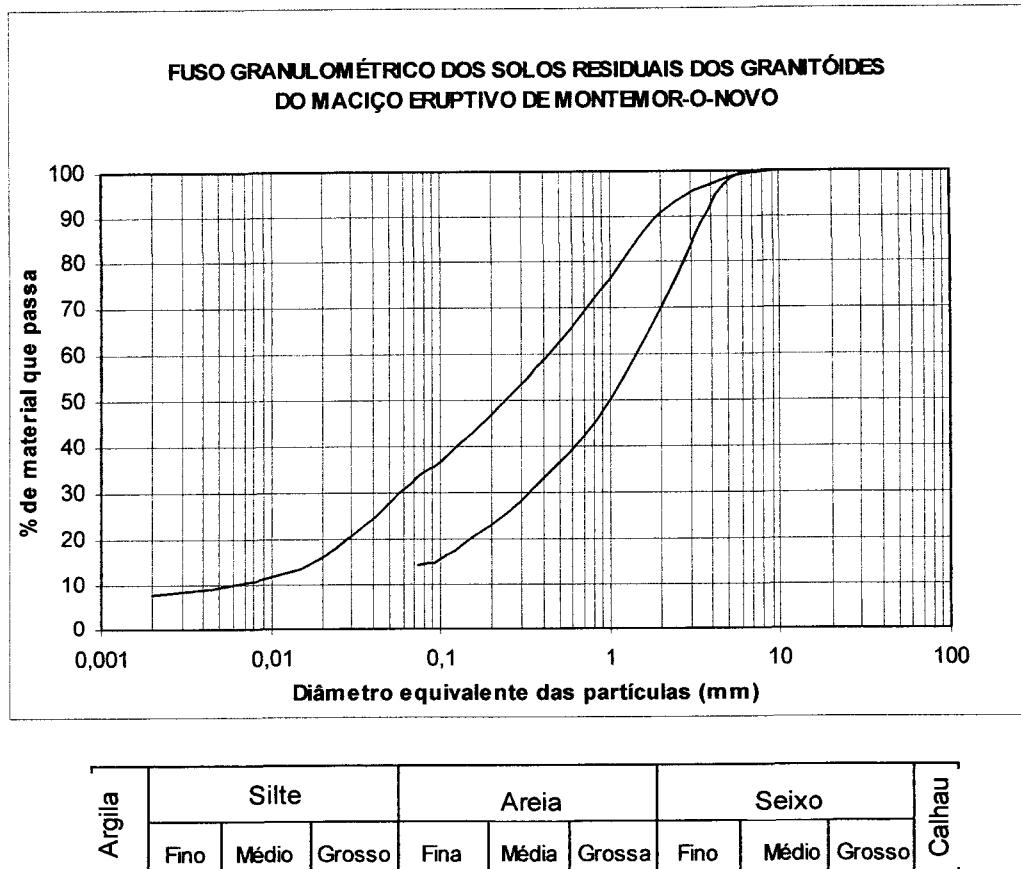


Figura 5.14 – Curvas granulométricas dos solos residuais do tonalito do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas, Unificada e AASHTO, dos solos residuais das rochas ígneas quartzodioríticas do maciço de Montemor-o-Novo, constam no Quadro 5.20. De acordo com os dados coligidos, os resultados experimentais confirmam tratar-se de solos arenoso-siltosos ou arenoso-argilosos. Em relação à classificação para fins rodoviários, também se comprova a uniformidade do comportamento na camada sob o pavimento, pois ambos pertencem ao grupo A-2-4.

d) Outras propriedades

Os pesos específicos das partículas sólidas (γ_s) dos solos estudados (Quadro 5.20) são semelhantes e estão, acima da média considerada para solos resultantes da alteração de granitos ($\gamma_s = 25,9 \text{ KN/m}^3$), facto natural devido a conterem maior percentagem de minerais ferromagnesianos, portanto mais densos. Os valores do equivalente de areia (EA) obtidos em amostras de diferentes locais, são próximos, e em média mais baixos do que os dos solos resultantes dos outros granítóides. Os valores da expansibilidade (Exp) são praticamente iguais e a média é superior à média dos solos dos outros granítóides. Os solos analisados apresentam permeabilidade (k) média, característica de solos areno-siltosos. O teor em matéria orgânica (MO) detectada nos solos residuais destes quartzodioritos é insignificante, não havendo nenhuma relação com o tom escuro dos mesmos.

5.4.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ* são apresentadas no Quadro 5.23. Pode-se constatar que a média dos teores em água natural é ligeiramente superior à dos solos de outros granítóides; o que possivelmente se relaciona com a maior percentagem de finos, maior superfície específica e, consequentemente, maior capacidade de retenção de água por parte dos solos quartzodioríticos. Os valores do peso volúmico nos estados, natural (γ_0) e seco (γ_d), não se distanciam muito dos mesmos valores para as manchas de Évora e Arraiolos. Os valores do índice de vazios (e_0) e da porosidade (n), também não variam muito, e estão mais próximos dos mesmos valores relativos aos solos dos quartzodioritos de Arraiolos.

b) Compactação

Os valores do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e os respectivos valores do teor em água óptima (w_{opt}), obtidos a partir dos ensaios de compactação tipo Proctor, para os solos residuais do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo são semelhantes (Quadro 5.23). A média dos primeiros encontra-se abaixo da média dos solos da mancha de Arraiolos; a média dos segundos está acima da média para os solos da mancha de Arraiolos.

Os solos quartzodioríticos não se comportam tão bem, quando compactados, como os solos resultantes de granitos essencialmente quartzosos e bem graduados. A existência, em grande número, de minerais micáceos de hábito lamelar, dificulta o empacotamento entre partículas e a drenagem do solo. O aumento de compacidade com a redução do índice de vazios não é tão eficaz, assim como o efeito da compactação, no aumento da resistência e diminuição da deformabilidade, não é tão evidente nos solos quartzodioríticos.

5.4.2.3 – Parâmetros de resistência

Uma amostra indeformada de solo residual quartzodiorítico, retirada do local de amostragem 59, foi submetida ao ensaio de corte directo e inverso. O solo de natureza areno-argilosa foi mais fácil de amostrar, com a garantia de preservação de todas as suas características *in situ*. O procedimento seguido durante o ensaio foi devidamente descrito no Cap.2 e é comum a todas as amostras indeformadas, sujeitas a este tipo de ensaio. Os gráficos das tensões de corte e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, relativas ao corte directo e

inverso da amostra indeformada deste tipo de solo, são apresentados na Figura 5.15. As rectas de Coulomb, correspondentes a estes ensaios, obtidas a partir das tensões de corte máximas são apresentadas na Figura 5.16.

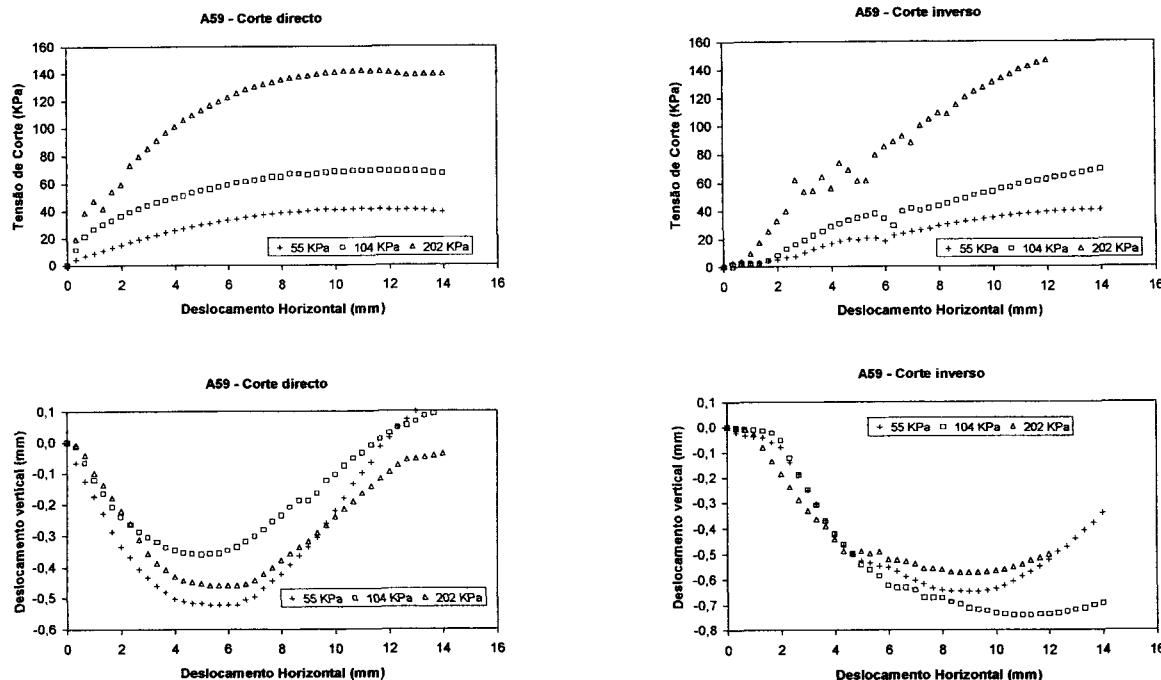


Figura 5.15 – Gráficos do ensaio de corte directo e inverso em amostra indeformada de solo residual tonalítico do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.

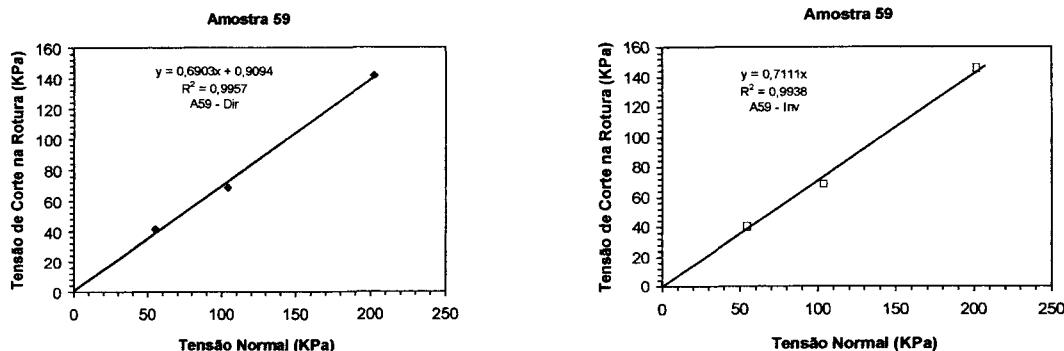


Figura 5.16 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada de solo residual tonalítico do maciço eruptivo de Montemor-o-Novo.

As curvas tensão de corte *versus* deslocamento horizontal do corte directo da amostra 59, são relativamente suaves e não apresentam “picos” de tensões. No corte inverso, já se notam algumas irregularidades, com variações bruscas da tensão de corte, devido à rotação dos grãos mais ou menos irregulares e alongados, que foram “desarrumados” da estrutura e que se encontram na superfície de corte, quando a caixa de corte tomou a marcha de sentido inverso.

O ângulo de atrito obtido no corte inverso ($\phi = 35,4^\circ$) é ligeiramente superior ao do corte directo ($\phi = 34,6^\circ$), devido ao aumento de resistência friccional provocado pelo movimento e rotação dos grãos grosseiros na superfície de corte. A coesão no corte inverso é nula, pois o corte da matriz mais fina dos provetes já se tinha processado na fase do corte directo, onde o solo exibia uma coesão de 0,91 KPa, de qualquer forma baixa.

5.4.2.4 – Compressibilidade

No local de amostragem que continha solos residuais com maior percentagem de “finos” foi colhida uma amostra de solo em bloco, a uma profundidade aproximada de 4 metros, que foi cuidadosamente acondicionada e transportada para laboratório. Depois de alisada a superfície e cravado o anel do edómetro com 99 mm de diâmetro, a amostra foi submetida ao ensaio edométrico com os procedimentos e escalões de carga preconizados neste tipo de ensaio efectuado nos restantes solos residuais estudados no âmbito deste trabalho de investigação.

A curva de compressibilidade, índice de vazios *versus* logaritmo da tensão efectiva, do ensaio realizado na amostra de solo 59, indeformada, é apresentada na Figura 5.17. A forma desta curva é semelhante à forma da curva obtida para a amostra de solo 44, indeformada, de Arraiolos, cuja ‘rocha-mãe’ também era um quartzodiorito. Trata-se de curvas com uma diminuição brusca do índice de vazios nos primeiros escalões de carga, mas depois o declive mantém-se relativamente constante, até ao escalão de carga máxima aplicado.

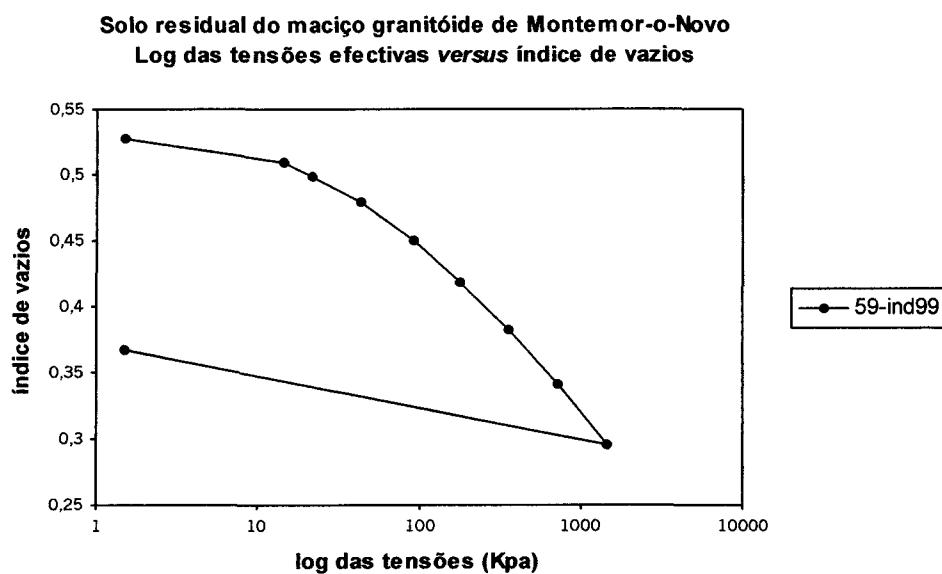


Figura 5.17 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico de Montemor-o-Novo.

Também neste solo a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p), é consideravelmente inferior às mesmas tensões calculadas para os solos residuais dos outros granítoides. Os parâmetros físicos iniciais e finais do provete submetido ao ensaio edométrico e as características de compressibilidade constam nos Quadros 5.21 e 5.22, respectivamente. O índice de compressibilidade (C_c) e o índice de expansibilidade (C_s) são muito semelhantes aos obtidos para a amostra indeformada do solo residual quartzodiorítico de Arraiolos (Quadro 5.16).

Quadro 5.21 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual do quartzodiorítico de Montemor-o-Novo, submetida ao ensaio edométrico.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_0 (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	w_f (%)
59i99	19,52	17,16	0,528	13,6	69,0	0,296	0,367	15,3

Quadro 5.22 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual do quartzodiorítico de Montemor-o-Novo.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	m_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	c_v (10 ⁻⁸ m ² /s)	k (10 ⁻¹⁰ m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
59i99	3,3 - 0,6	2,32 - 0,45	5,21 - 2,08	1,24 - 0,10	70,8	0,15	0,02

Quadro 5.23 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE MONTEMOR - O - NOVO.

SOLOS		59	86
LOCALIZAÇÃO		Montemor-o-Novo	M.º da Rosenta
DESCRIÇÃO		Areia argilosa, castanha escura, com manchas amareladas.	Areia siltosa, castanha.
PROPRIEDADES FÍSICAS “IN SITU”	W_o (%)	13,7	6,9
	γ_o (KN/m ³)	19,03	17,06
	γ_d (KN/m ³)	16,67	15,98
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	98,38	96,78
	< 2,00 mm	90,80	69,81
	< 0,425mm	59,15	33,53
	< 0,075mm	33,46	14,47
	< 0,002mm	7,86	
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	30	29
	w_{Lc} (%)	35	34
	w_P (%)	21	22
	I_P (%)	9	7
	I_{Pc} (%)	14	12
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SC	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-2-4	A-2-4
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)	18,34	18,73
	$W_{ópt.}$ (%)	15,5	14,3
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	22	27
MATERIA ORGÂNICA	M.O. (%)	< 0,01	0,07
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	9,9	9,2
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$3,5 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-4}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,28	26,87
ÍNDICE DE VAZIOS “IN SITU”	e_o	0,576	0,681
POROSIDADE “IN SITU”	n (%)	36,6	40,5
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	34,6 (ind.)	
	c (KPa)	0,91	
EDOMÉTRICO	C_c	0,15	
	C_s	0,02	

5.5 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz

A vila de Reguengos de Monsaraz situa-se praticamente no centro do maciço eruptivo que lhe tomou o nome, cuja área aproximada é de 160 Km², e encontra os seus limites, NW junto a Montoito e SE junto a Monsaraz. As formações do maciço alternam de fácies com muita frequência, passando de granodioritos a quartzodioritos, com tipos litológicos intermédios, não sendo possível, por vezes, a sua identificação no campo, apenas com uma simples observação. É comum o aparecimento de blocos arredondados de dimensões consideráveis, à superfície dos afloramentos ou mesmo no seio dos solos residuais. O tipo litológico predominante é o quartzodiorito de grão médio, cinzento escuro, podendo, por vezes, os minerais constituintes apresentarem uma certa orientação, com tendência a textura gnaissica (Carvalhosa *et al.*, 1991).

Os solos residuais constam essencialmente de materiais areno-siltosos, bem graduados, por vezes com cascalho, cinzentos ou cinzentos escuros, consoante a percentagem de minerais maficos. A espessura média dos solos residuais ronda os 5 metros, mas pode atingir os 10 metros, o que acontece na zona meridional desta mancha, nomeadamente numa saibreira onde foi colhida a amostra 82 (Cap. 3).

5.5.1 – Dados compilados

Com o intuito de conhecer melhor os solos residuais resultantes da meteorização das rochas do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz, pesquisaram-se os ensaios realizados em 10 amostras colhidas nestes solos, cujos resultados obtidos a partir da Carta de Materiais do Distrito de Évora – CMDE (JAE, 1980a), constam no Quadro 5.24.

Quadro 5.24 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais de granitóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

Estudo	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	Ip (%)	EA (%)
	# 200	# 40	# 10			
CMDE	6 - 27	17 - 47	56 - 94	NR - 39	NP - 15	19 - 60

As 10 amostras foram colhidas em solos resultantes da alteração de rochas quartzodioríticas. Os resultados expostos no Quadro 5.24 são semelhantes aos resultados coligidos para os solos residuais dos quartzodioritos de Montemor-o-Novo e de Arraiolos, respeitantes à Carta de Materiais do Distrito de Évora, Quadros 5.11 e 5.19, respectivamente.

As classificações geotécnicas destes solos são apresentadas na Figura 5.18. Trata-se essencialmente de solos areno-siltosos, pois apenas um solo revelou natureza areno-argilosa. À partida são solos com um comportamento menos plástico e com equivalentes de areia, em média, superiores aos dos outros solos quartzodioríticos. A maioria dos solos pertence ao sub-grupo A-1-b, estando o grupo A-2 menos representado, o que sugere um excelente comportamento sob o pavimento.

No campo, estes solos quartzodioríticos encontram-se, geralmente, intercalados, e a uma escala menor, pode dizer-se mesmo “misturados”, com solos residuais de granodioritos, o que confere ao conjunto uma melhoria das suas características de identificação e geotécnicas, quando comparados com solos puramente quartzodioríticos. A maior percentagem de quartzo e feldspato dos granodioritos, contribui para uma maior resistência e menor deformabilidade

dos respectivos solos residuais, relativamente aos solos quartzodioríticos com minerais mais escuros, mais alteráveis, mais finos, menos resistentes e mais deformáveis.

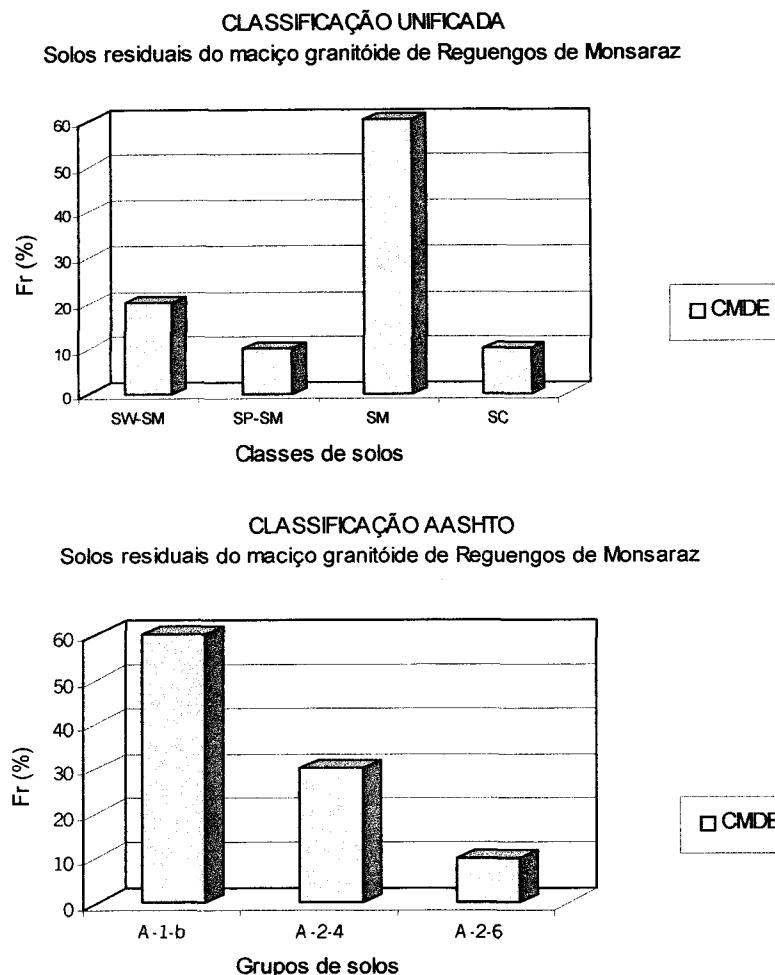


Figura 5.18 – Classificações geotécnicas dos solos residuais de granítoides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

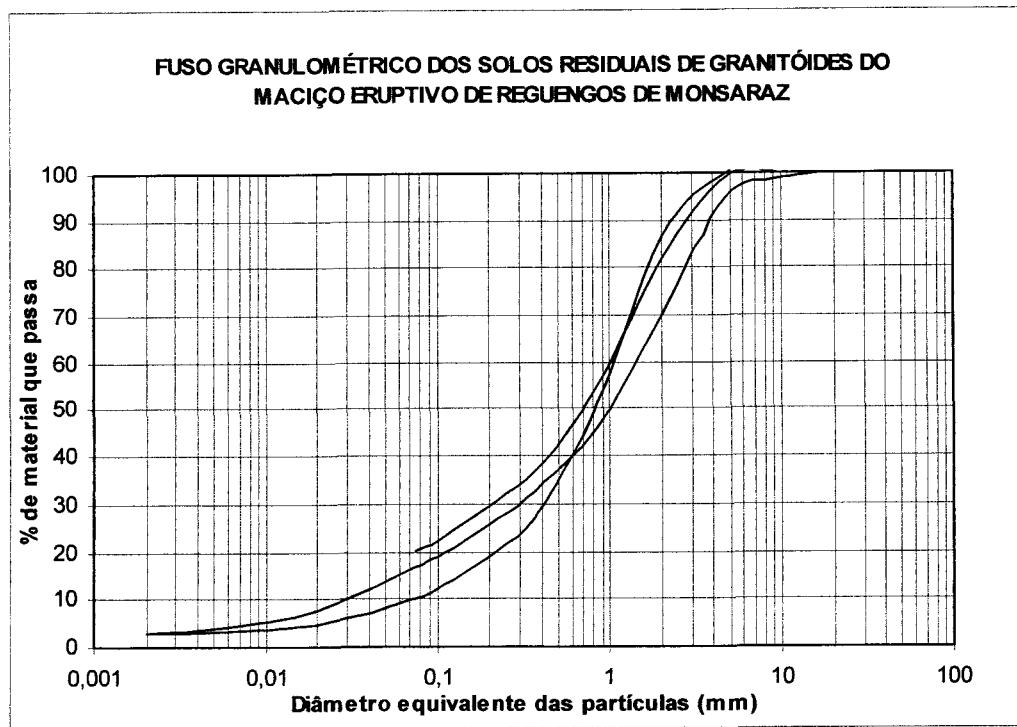
5.5.2 – Resultados experimentais

No âmbito do estudo dos solos residuais de granítoides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz foram seleccionados três locais de prospecção e amostragem. Dois dos locais a norte do maciço: a amostra 11, colhida num talude de escavação da EN 256, perto de Reguengos de Monsaraz; a amostra 13, numa pedreira junto a Montoito. O local mais a sul, amostra 82, foi retirada de uma saibreira perto de Mourão, que apresenta um perfil de solo residual com cerca de 10 m. Nos dois primeiros locais, a espessura de solo residual era inferior a 5-7 m, e os perfis expostos eram homogéneos, na cor e na granularidade. A amostra 82 foi colhida de um perfil heterogéneo onde a fracturação controla a meteorização, ocorrendo blocos rochosos no seio do solo residual. De qualquer forma, as três amostras correspondiam a solos areno-siltosos cinzentos mais ou menos escuros, consoante a composição em minerais maficos ou felsicos e estado de evolução do solo.

5.5.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

Amostras remexidas, provenientes dos três locais de amostragem, foram submetidas à análise granulométrica, cujos gráficos correspondentes se apresentam na Figura 5.19. Os parâmetros granulométricos e as restantes características gerais constam no Quadro 5.25.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.19 – Curvas granulométricas dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

Quadro 5.25 – Características gerais dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
3	7 - 14	62 - 76	0,03-0,07	15 - 50	2 - 2,2	31 - 33	32 - 37	23 - 28	5 - 8	9 - 12
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ _s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
20-37	7 - 10	6,4×10 ⁻⁵ - 8,2×10 ⁻⁵	0,07- 0,11	26,8	1,67 - 2,56	(-0,7) - (-2,6)	1,7-3,6	20 - 26	SM SW-SM	A-1-b A-2-4

Os parâmetros granulométricos são muito próximos nos três solos (Quadro 5.25), facto que pode ser visualizado graficamente nas curvas granulométricas respectivas (Figura 5.19). Trata-se de solos bem graduados com granulometrias extensas. As percentagens de argila, silte e areia, são muito semelhantes às percentagens que aqueles componentes exibem nos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Arraiolos (Quadro 5.12).

b) Consistência

Os solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz apresentam todos plasticidade, apesar de esta ser baixa. Os intervalos de variação dos valores relativos aos limites de consistência são estreitos, o que demonstra uma certa uniformidade de comportamento, no que diz respeito a estas propriedades. A média do índice de plasticidade (I_p) é inferior à média da mancha de Montemor-o-Novo e superior à de Arraiolos; o inverso se passa em relação ao limite de retracção (w_R). O índice de consistência (I_c), tal como na mancha de Montemor-o-Novo, está próximo de 2 ou acima deste valor, ou seja tratam-se de solos de consistência elevada; o potencial para entrar em liquefação é igualmente baixo, devido aos valores do índice de liquidez (I_L) determinados. Em relação à actividade coloidal, as argilas que ocorrem, podem ser classificadas de activas a muito activas, isto é, apesar da baixa percentagem de argila, os índices de plasticidade destes solos atingem um valor considerável, que se deve não tanto à quantidade mas à qualidade da argila (Cap. 4).

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz constam no Quadro 5.25. Os resultados experimentais confirmam os dados coligidos (Figura 5.18); trata-se, essencialmente, de solos areno-siltosos, por vezes com cascalho, bem graduados, que muito raramente podem ser argilosos. Relativamente à classificação AASHTO para fins rodoviários, estes solos pertencem predominantemente aos subgrupos A-1-b e A-2-4, ou seja terão um comportamento excelente, na camada sob o pavimento.

No que respeita às características de identificação, pode-se inferir que os solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz demonstram um comportamento intermédio entre os solos residuais dos quartzodioritos de Montemor-o-Novo e os solos resultantes dos granítóides do maciço eruptivo de Arraiolos.

d) Outras propriedades

Os valores do peso específico das partículas sólidas (γ_s) determinados em amostras dos três locais mencionados, foram iguais a $26,77 \text{ KN/m}^3$; valor considerado normal em solos de natureza quartzodiorítica. O equivalente de areia (EA), não é tão uniforme nas amostras ensaiadas (Quadro 5.25), como as restantes propriedades; de qualquer forma o valor máximo corresponde à amostra 82 (Quadro 5.29) que é a que apresenta a menor quantidade de finos, menor índice de plasticidade e maior percentagem de areia na sua composição. A expansibilidade (Exp), apresenta variabilidade, correspondendo o valor máximo ao solo com mais finos; mas esta relação nem sempre é linear, porque para este parâmetro, mais importante que a quantidade de finos, parece ser a qualidade, isto é, se a fracção fina do solo contém minerais mais ou menos expansivos. A permeabilidade (k) é considerada média, própria de materiais arenosos com mais ou menos silte; realça-se, no entanto, que é nos solos

da mancha de Reguengos de Monsaraz, que o referido parâmetro admite valores mais constantes. O teor em matéria orgânica detectado é insignificante, apesar da cor escura dos solos, e não tem qualquer influência no comportamento geotécnico dos materiais; a sua presença deve-se unicamente à infiltração das águas superficiais que transportam substâncias orgânicas até aos níveis de colheita das amostras de solos residuais.

5.5.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, constam no Quadro 5.26. Pode-se verificar que os valores do teor em água natural (w_o) variam bastante, e são em regra superiores aos dos solos de outros granítóides. Esta situação justifica-se exclusivamente com as condições meteorológicas dos dias que antecederam a colheita e que foram diferentes para todos os locais de amostragem; todas as amostras foram colhidas em ocasiões diferentes, e nos dias que antecederam a colheita da amostra 11, choveu torrencialmente (Quadro 5.29).

Os valores do peso volúmico seco (γ_d), determinados *in situ*, são intermédios dos valores correspondentes aos solos das manchas de Arraiolos e de Montemor-o-Novo. Os valores do índice de vazios (e_o) e da porosidade (n), não oscilam muito e são próximos dos valores dos solos residuais dos quartzodioritos daquelas manchas.

Quadro 5.26 – Propriedades físicas dos solos residuais dos granítóides do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

w_o (%)	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_o	n	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	$w_{ópt}$ (%)
8 - 21	18,9 - 19,4	16,1 - 17,9	0,517-0,665	33,3 - 39,9	17,7 - 18,5	12,5 - 14,6

b) Compactação

Os solos residuais amostrados em dois locais diferentes foram submetidos ao ensaio de compactação tipo Proctor, a partir do qual se determinaram os pesos volúmicos secos máximos ($\gamma_{dmáx}$) e os respectivos teores em água óptimos ($w_{ópt}$). Os valores obtidos para as duas amostras não diferem muito entre si (Quadro 5.26), confirmando a homogeneidade destes solos; também se pode verificar a sua proximidade em relação aos valores obtidos para os solos dos quartzodioritos da mancha de Montemor-o-Novo (Quadro 5.23).

5.5.2.3 – Parâmetros de resistência

Realizaram-se ensaios de corte directo em solos colhidos nos três locais de amostragem desta mancha. Duas das amostras ensaiadas eram remexidas e a amostra 82, indeformada, foi submetida depois do corte directo, ao corte reversível. Os parâmetros de resistência obtidos nestes ensaios constam no Quadro 5.29. As curvas ‘tensão de corte *versus* deslocamento horizontal’ do corte directo da amostra 82 (Figura 5.20), apresentam tensões de ‘pico’, o que se explica pelo carácter granular desta amostra (56% de areia média a grossa). Esta percentagem de grãos de forma irregular e angulosa, contribui decisivamente para o ângulo de atrito, destes solos, relativamente elevado ($\phi = 41,1^\circ$). No entanto, o valor da coesão ($c=17,6$ KPa) também é significativo, e deve-se: quer à existência de uma matriz de material

mais fino (argila + silte + areia fina = 30 %) que envolve o material mais grosso; quer à coesão interna dos grãos de material menos resistente, como sejam os feldspatos alterados, que se quebram durante o corte directo, junto à superfície de corte. As curvas respeitantes ao corte inverso (Figura 5.20), apresentam irregularidades devido aos grãos, uns que se deslocam bruscamente e os outros que se partem. O ângulo de atrito obtido no corte reversível ($\phi = 31,7^\circ$) é bastante inferior ao do corte directo, pois as partículas maiores, já se tinham arrumado ou quebrado; mas a coesão é semelhante, pois os factores que contribuem para a sua existência são os mesmos que no corte directo. As rectas de Coulomb correspondentes a estes ensaios, obtidas a partir das tensões de corte máximas, são apresentadas na Figura 5.21.

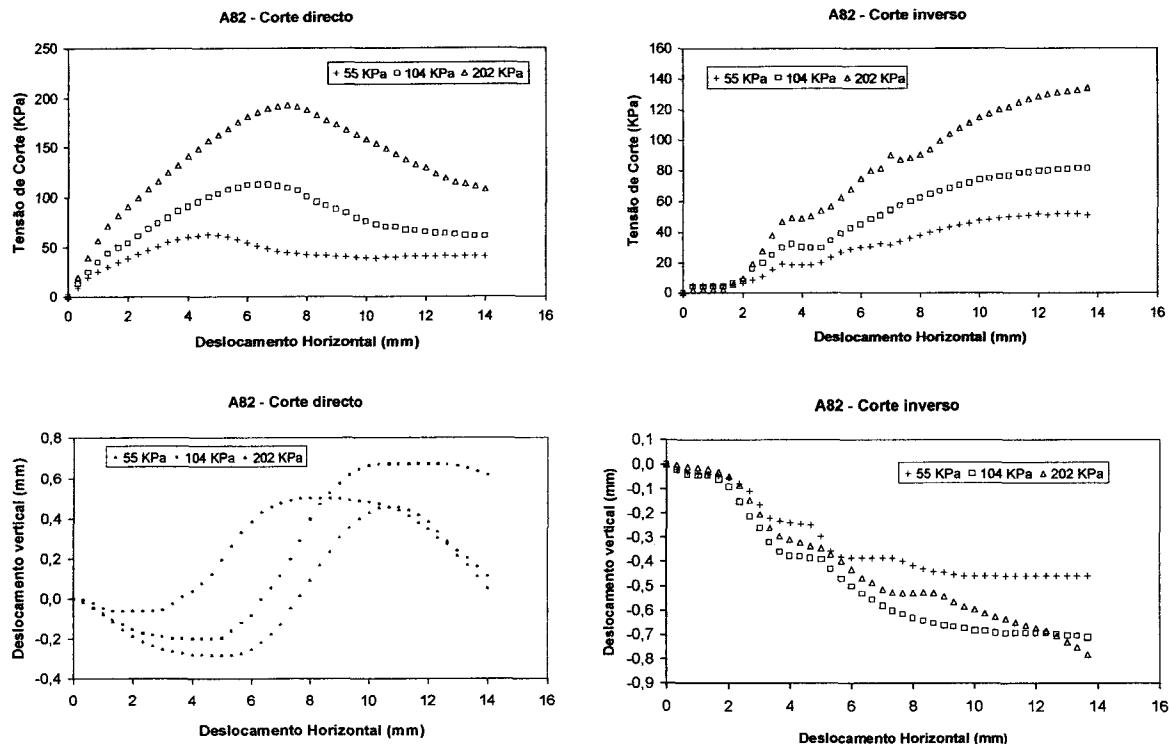


Figura 5.20 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada dos solos residuais do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

Os valores do ângulo de atrito determinados para as amostras remexidas ($\phi = 37,6^\circ$ e $\phi = 36,1^\circ$) correspondem a solos mais finos, pertencendo o menor ângulo à amostra com menos areia e com mais finos desta mancha (Quadro 5.29). Ambas as amostras apresentam coesão nula, consequência do remeximento das mesmas. Os parâmetros de resistência para as amostras remexidas são semelhantes entre si, mas distanciam-se dos mesmos parâmetros obtidos para a amostra indeformada. Este facto reforça a ideia de que para o mesmo tipo de solos residuais, a estrutura do solo e a existência de forças de ligação inter-partículas devidas à matriz mais fina ou a forças de “contacto” entre os grãos irregulares devido ao imbricamento destes, influencia de forma decisiva as características mecânicas intrínsecas deste tipo de solos.

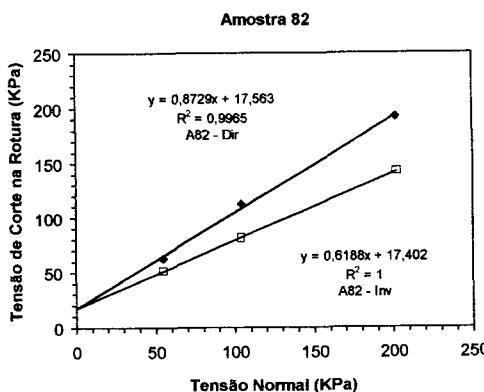


Figura 5.21 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada, do solo residual de um tonalito do maciço de Reguengos de Monsaraz.

5.5.2.4 – Compressibilidade

No local onde se colheu a amostra de solo 82, indeformada, para a realização do ensaio de corte directo, também se colheu a 3 m de profundidade um “bloco” de solo residual do qual se retirou uma amostra indeformada, que foi submetida ao ensaio de consolidação em célula edométrica. A curva de compressibilidade, índice de vazios *versus* logaritmo da tensão efectiva, do ensaio edométrico realizado na amostra 82, indeformada, é apresentada na Figura 5.22. Os parâmetros físicos, iniciais e finais, do provete submetido ao ensaio edométrico, constam no Quadro 5.27. Os parâmetros de compressibilidade do solo estudado são apresentados no Quadro 5.28.

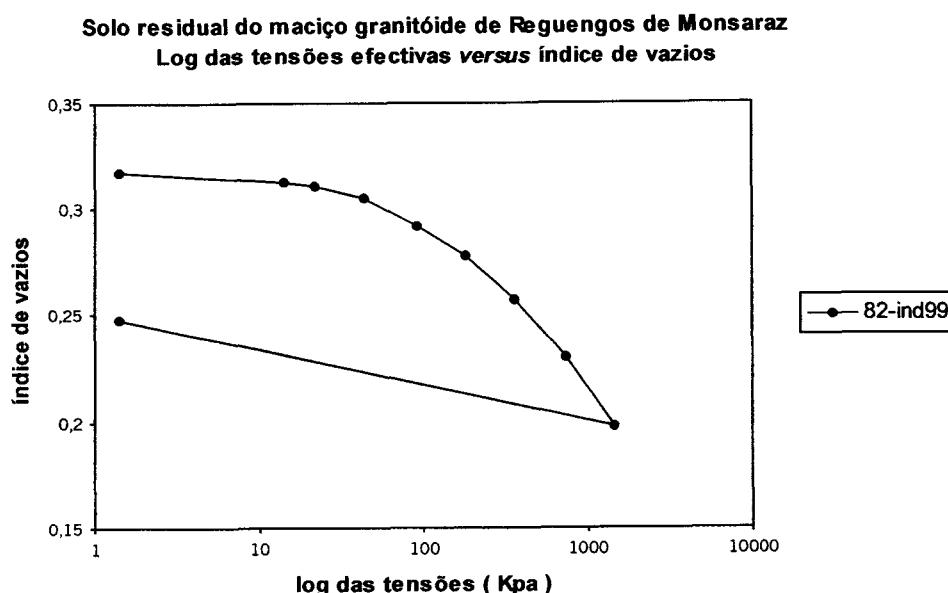


Figura 5.22 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada de um solo residual do maciço de Reguengos de Monsaraz.

Quadro 5.27 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	w_f (%)
82i99	22,36	20,20	0,317	10,3	88,0	0,198	0,248	12,8

Quadro 5.28 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaios edométrico do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	m_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	c_v (10^{-8} m ² /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
82i99	2,6 - 0,4	2,02 - 0,35	4,83 - 3,68	0,99 - 0,13	166	0,11	0,02

A curva de compressibilidade apresenta-se bastante fechada, porque o índice de vazios inicial (e_i) é próximo do índice de vazios final após a descarga (e_{f1}). Tal facto deve-se, fundamentalmente, ao índice de vazios que já era reduzido no início do ensaio e, apesar de as cargas aplicadas ao provete terem sido as mesmas que foram aplicadas aos outros solos residuais ensaiados, a redução deste parâmetro durante a consolidação foi menor, neste solo, o que se reflectiu no índice de compressibilidade (C_c), que é o menor de todos os solos residuais estudados.

Apesar do teor em água inicial (w_i) não ser muito elevado, o grau de saturação desta amostra foi o que atingiu maiores valores, devido ao reduzido índice de vazios. Esta situação trouxe também uma diminuição da permeabilidade determinada por este método (Quadro 5.28). Estes valores revelam que nesta amostra, a estrutura do solo encontra-se pouco aberta, estando os grãos maiores bem envolvidos pela matriz mais fina.

Na fase de carregamento do provete, a curva de compressibilidade (Figura 5.22) evolui de uma forma gradual, suave, sem diminuições bruscas do índice de vazios. Esta situação comprova, uma vez mais, a reduzida porosidade inicial deste solo, e à medida que as cargas vão sendo aplicadas, a água é expelida lentamente do provete, o que se traduz numa permeabilidade baixa, e os grãos de maiores dimensões vão sendo “arrumados” suavemente no seio da matriz constituída por materiais mais finos.

Quadro 5.29 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DE REGUENGOS DE MONSARAZ.

SOLOS		11	13	82
LOCALIZAÇÃO		EN 802 (Km22)	Vendinha	Monsaraz
DESCRIÇÃO		Areia siltosa com cascalho, cinzenta escura.	Areia siltosa com cascalho, cinzenta.	Areia bem graduada com silte, cinzenta clara.
PROPRIEDADES FÍSICAS “IN SITU”	W_o (%)	20,8	7,6	15,1
	γ_o (KN/m ³)	19,42	19,22	18,93
	γ_d (KN/m ³)	16,08	17,85	17,55
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	98,99	98,87	99,92
	< 2,00 mm	81,65	94,41	86,31
	< 0,425mm	38,96	34,31	30,15
	< 0,075mm	20,43	16,75	10,09
	< 0,002mm		3,12	2,99
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	31	31	33
	w_{Lc} (%)	37	32	37
	w_P (%)	25	23	28
	I_P (%)	6	8	5
	I_{Pc} (%)	12	9	9
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SM	SM	SW - SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-2-4	A-1-b
COMPACTAÇÃO	γ_d máx. (KN/m ³)		18,54	17,74
	Wópt. (%)		12,5	14,6
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	25	20	37
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,07	0,11	0,09
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	10	6,9	7,3
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$7,2 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-5}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,77	26,77	26,77
ÍNDICE DE VAZIOS “IN SITU”	e_o	0,665	0,5	0,517
POROSIDADE “IN SITU”	n (%)	39,9	33,3	34,1
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	36,1	37,6	41,1 (ind.)
	c (KPa)	0	0	17,56
EDOMÉTRICO	C_c			0,11
	C_s			0,02

5.6 – Solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo do Redondo

No maciço eruptivo do Redondo estão representados dois grandes afloramentos de rochas granitóides: a mancha do Redondo, de maiores dimensões e, a noroeste desta, a mancha de S.Miguel de Machede com menor representação espacial. Em conjunto, os dois maciços ocupam uma área aproximada de 170 Km². As rochas que constituem estes maciços são, predominantemente, granodioritos, mas estão intimamente associadas a quartzodioritos. Subordinadamente, ocorrem diferenciações básicas, dioritos e eventualmente gabros.

As rochas do complexo eruptivo do Redondo, essencialmente granodioritos passando frequentemente a tonalitos, encontram-se, habitualmente, deformadas. Em resultado da deformação, os minerais reorientaram-se e recristalizaram em parte, como o quartzo, conferindo a estes granitóides textura gnáissica, mais ou menos acentuada. Aparentemente, o afloramento de S. Miguel de Machede será mais básico, relativamente ao do Redondo, pois no primeiro, são mais frequentes os quartzodioritos relativamente aos granodioritos (Carvalhosa *et al.*, 1987).

O maciço intrusivo do Redondo encontra-se alterado em vastas áreas da região, ocorrendo, como produto final dessa alteração, solos residuais com espessuras, nos perfis expostos, que podem atingir 8 m. Trata-se de solos, geralmente areno-siltosos e areno-argilosos, que exibem tons cinzentos a cinzentos acastanhados.

5.6.1 – Dados compilados

A Carta de Materiais do Distrito de Évora – CMDE (JAE, 1980a), refere-se à análise de três amostras da mancha de saibros residuais do Redondo. Os resultados obtidos nesses ensaios constam no Quadro 5.30. As oscilações de valores verificadas aproximam-se dos valores encontrados para outros solos resultantes de quartzodioritos.

Quadro 5.30 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais do maciço eruptivo do Redondo.

Estudo	Análise granulométrica (% passada)			w _L (%)	I _P (%)	EA (%)
	# 200	# 40	# 10			
CMDE	13 - 20	26 - 51	83 - 99	24 - 27	NP - 9	20 - 43

As análises revelam tratar-se de solos areno-siltosos, correspondendo ao grupo SM, da Classificação do Sistema Unificado. Relativamente à Classificação AASHTO para fins rodoviários, os solos distribuem-se pelos subgrupos A-1-b (um solo) e A-2-4 (dois solos).

5.6.2 – Resultados experimentais

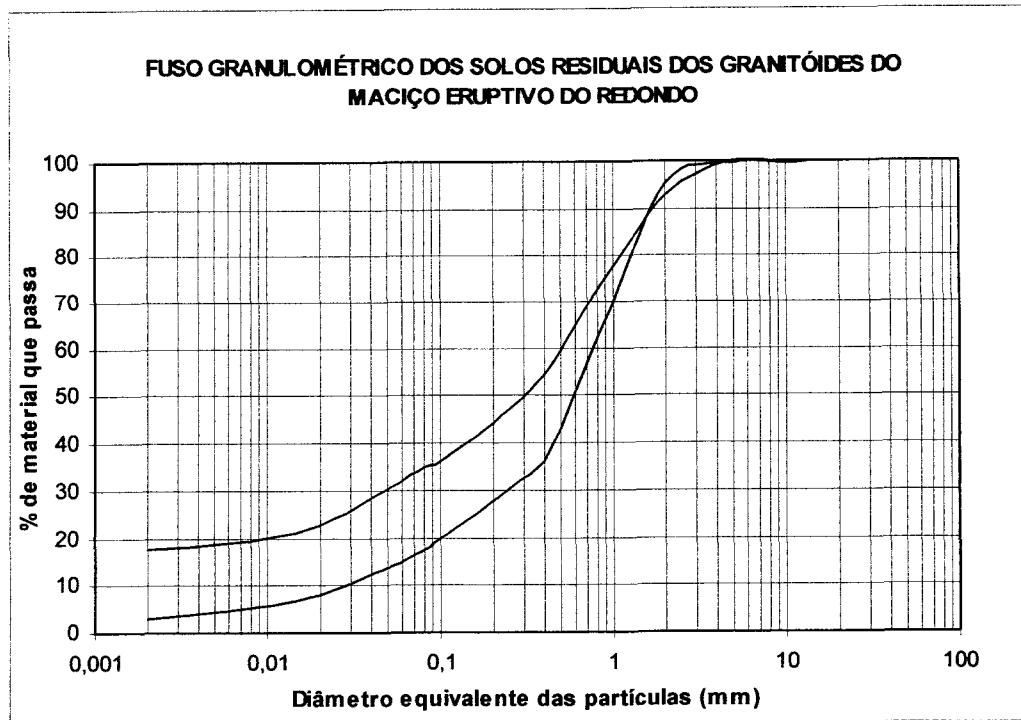
Na mancha de solos residuais do maciço eruptivo do Redondo, foram seleccionados dois locais de amostragem e prospecção, com o fim de se proceder ao estudo destes solos. Um dos locais situa-se numa pedreira desactivada, junto à estrada EN 381- Redondo – Reguengos de Monsaraz. Trata-se de um solo essencialmente quartzodiorítico, cinzento, mas possuindo numerosas lentículas e pequenas bolsadas resultantes de encraves de outras rochas granitóides e, o perfil de alteração apresenta uma espessura média de 5 m. O segundo local, uma saibreira de solo resultante da alteração de um granodiorito, avista-se bem da EN 254, e

situá-se a 3 Km do Redondo. Possui um solo mais grosseiro que o primeiro e apresenta tons mais claros, cinzento acastanhado a cinzento amarelado. O perfil do solo é mais homogéneo, relativamente à textura e mineralogia, no entanto, a passagem de solo residual a rocha sã, é menos brusca, observando-se um nível considerável de rocha branda alterada e, a espessura média do solo no perfil, ronda os 8 m.

5.6.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das amostras de solos residuais do maciço eruptivo do Redondo, são apresentadas na Figura 5.23. Ambos os solos apresentam granulometrias extensas ($Cu > 25$), mas o solo quartzodiorítico (amostra 15), o qual contém a maior percentagem de finos, é mal graduado ($Cc > 5$). O solo granodiorítico (amostra 16), é bem graduado e apresenta menor quantidade de finos (Quadro 5.31). Apesar da percentagem de argila ser bastante diferente nas duas amostras, a diferença é pouco notória na quantidade de silte, mas é muito sensível na quantidade de areia.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.23 – Curvas granulométricas dos solos residuais dos granitóides do maciço eruptivo do Redondo.

b) Consistência

O solo quartzodiorítico apresenta uma plasticidade baixa a média (Quadro 5.34), o que significa que os minerais argilosos existentes são próprios de uma argila magra e que a presença de uma componente siltosa considerável também condiciona essa plasticidade. O solo granodiorítico tem um comportamento não plástico, reforçando, neste caso, a ideia de que o silte e a areia fina têm um papel preponderante na consistência do solo relativamente à reduzida percentagem de argila que também é magra. O índice de consistência (I_C), que consta no Quadro 5.31, determinado nos materiais com dimensões inferiores a 0,425 mm da amostra 15, corresponde a um solo consistente. Relativamente à actividade coloidal (Ac) desta amostra, o valor obtido refere-se a uma amostra pouco activa, o que explica que não obstante a quantidade apreciável de argila no solo, a plasticidade deste é baixa; ou seja, também para este parâmetro contribui mais a qualidade que a quantidade dos minerais argilosos presentes no solo. O índice de liquidez (I_L) da referida amostra, demonstra que o solo no seu estado natural se encontra longe do limite de liquidez; ou seja, o seu teor em água natural teria que sofrer um acréscimo de 26% para que o solo apresentasse potencial para liquefazer, o que é muito pouco provável, para as condições pluviométricas e de drenagem da região.

Quadro 5.31 – Características gerais dos solos residuais do maciço eruptivo do Redondo.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D_{10}	Cu	Cc	w_L (%)	w_{Lc} (%)	w_P (%)	I_P (%)	I_{Pc} (%)
3 - 18	14 - 17	59 - 78	<0,001 - 0,03	25 - >500	2,78 - >5	26 - 32	32 - 36	NR-22	NP-10	NP-14
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I_L (%)	I_C (%)	w_R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
24-31	8 - 9	$3,7 \times 10^{-5}$ - $3,8 \times 10^{-4}$	0,11-0,16	26,4 - 27,1	0,57	-1,57	1,4	18	SM SC	A-1-b A-2-4

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas destes solos constam nos Quadros 5.31 e 5.34. O solo residual do quartzodiorito (amostra 15) é uma areia argilosa – SC; correspondendo na classificação AASHTO ao subgrupo A-2-4. O solo resultante do granodiorito (amostra 16) é uma areia siltosa – SM, possuindo melhores características para fins rodoviários – subgrupo A-1-b. Ambos os solos se enquadram nas classificações comuns para solos resultantes da alteração de granitóides dos tipos referidos.

d) Outras propriedades

Os valores do equivalente de areia (EA), não diferem muito nos dois solos estudados, correspondendo o menor valor a uma maior percentagem de finos, confirmando o facto de apesar desta percentagem ser substancialmente diferente entre os dois solos, o tipo de finos é sensivelmente o mesmo. Esta ideia também é confirmada pelos valores obtidos para a expansibilidade (Exp.) dos dois solos, que são semelhantes. Contudo, o solo mais argiloso revela uma expansibilidade ligeiramente superior ao outro. Os teores em matéria orgânica (MO) detectados são em ambos os casos insignificantes. Relativamente à permeabilidade (k),

registou-se o menor valor para o solo mais fino, como seria de esperar. O peso específico das partículas sólidas (γ_s) é superior no solo do quartzodiorito que compreende uma composição mais básica e uma maior percentagem de minerais máficos com densidades superiores.

5.6.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, constam no Quadro 5.34. Os valores do teor em água natural (w_o) dos solos residuais do maciço do Redondo são relativamente baixos, típicos de regiões onde a precipitação é reduzida. Os valores do peso volúmico seco (γ_d), determinados *in situ*, do solo residual do quartzodiorito é substancialmente superior ao do solo resultante da alteração do granodiorito. Este facto deve-se, por um lado à existência de uma percentagem superior de minerais mais densos, e por outro lado a uma maior percentagem de finos que preenchem melhor os espaços entre os grãos de maiores dimensões. Esta situação é confirmada pelos valores do índice de vazios (e_o) e da porosidade (n), manifestamente inferiores no primeiro solo, em oposição com o segundo solo que possui uma estrutura mais aberta, tendo consequentemente porosidade maior e peso volúmico seco inferior.

b) Compactação

No Quadro 5.34 constam os valores dos pesos volúmicos secos máximos ($\gamma_{dmáx}$) e os respectivos teores em água óptimos ($w_{ópt}$), respeitantes às amostras remexidas dos solos residuais do Redondo que foram submetidas ao ensaio de compactação tipo Proctor. Naturalmente, o solo que contém mais materiais finos (amostra 15), logo uma superfície específica maior, necessita de mais água para atingir o respectivo peso volúmico seco máximo, e que apresenta um valor inferior em relação ao solo mais grosseiro (amostra 16).

5.6.2.3 – Parâmetros de resistência

Efectuaram-se ensaios de corte directo numa amostra indeformada (nº15) e em duas amostras remexidas (nº15 e 16). Os gráficos das tensões de corte e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, relativos ao corte directo e inverso da amostra indeformada deste tipo de solo, são apresentados na Figura 5.24. As curvas de tensão de corte *versus* deslocamento horizontal, apresentam algumas irregularidades devidas ao deslocamento brusco de alguns grãos de maiores dimensões junto à superfície de corte, ou mesmo à quebra dos menos resistentes. Esta situação reveste-se de maior amplitude no corte inverso. No corte directo, estas curvas tendem a apresentar “picos” nas tensões de corte máximas, enquanto que no corte inverso, isso não acontece. Neste último, o que se verifica é que a tensão de corte vai sempre aumentando, até ao fim do ensaio; isto é, devido ao arrastamento das partículas junto à superfície de corte (que já se deu no corte directo, daí a ausência dos “picos”), o que vai promover um aumento de resistência gradual, à medida que a caixa de corte se desloca, atingindo sempre o seu máximo, no fim do ensaio. As rectas de Coulomb, relativas a estes ensaios, obtidas a partir das tensões de corte máximas são apresentadas na Figura 5.25. O ângulo de atrito obtido no corte directo é ligeiramente superior ao obtido a partir do corte inverso. Em contrapartida, a coesão no corte inverso é substancialmente superior à obtida no corte directo; o que possivelmente se deve ao corte de grãos menos

resistentes, que se processa naquele ensaio, uma vez que estes já não se conseguem deslocar sem quebrar.

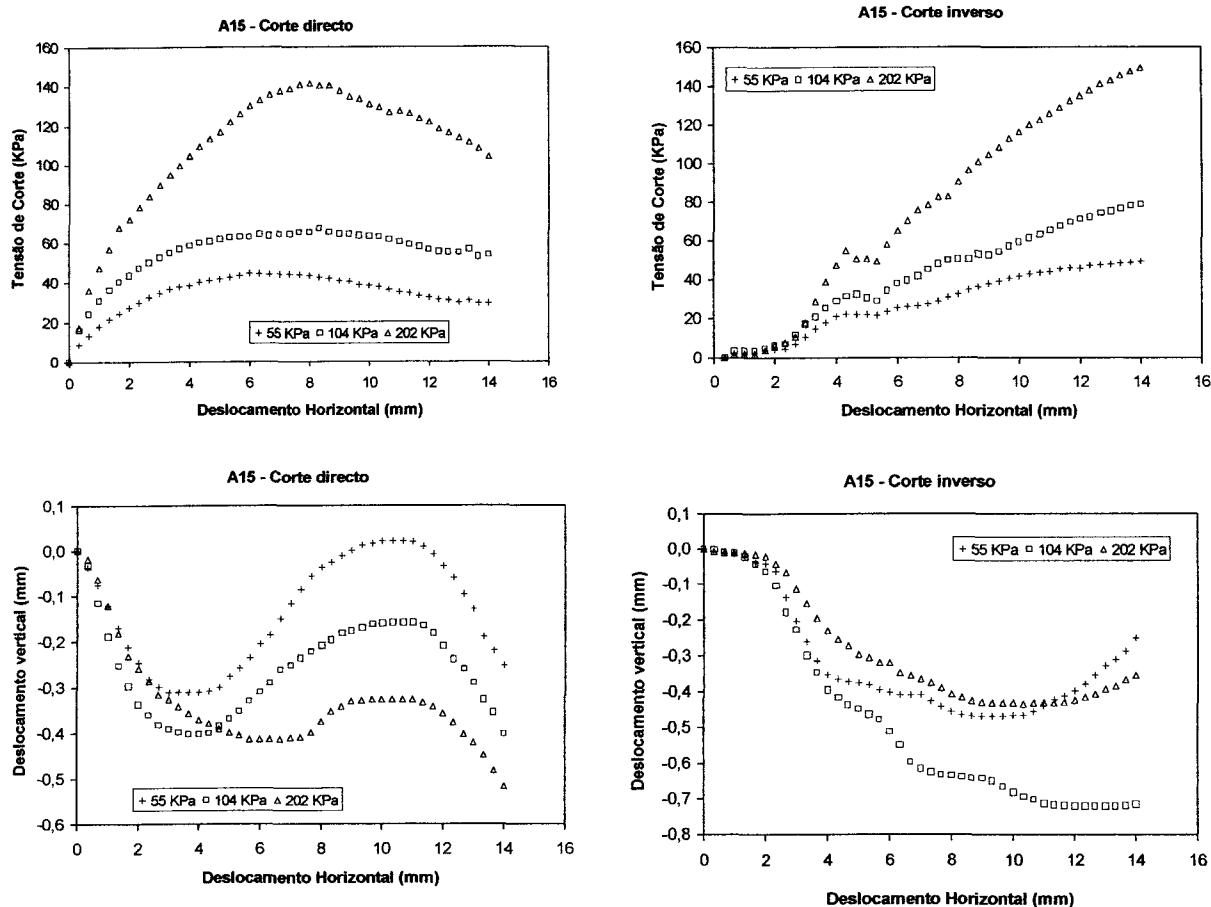


Figura 5.24 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada do solo residual de um granítóide do maciço eruptivo do Redondo.

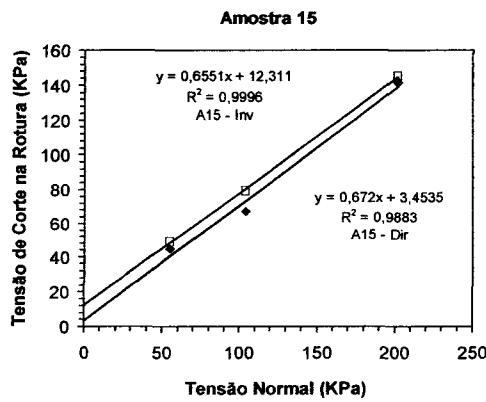


Figura 5.25 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada dos solos residuais dos granítóides do maciço do Redondo.

Os parâmetros de resistência respeitantes ao ensaio de corte directo efectuado nas amostras remexidas, 15 e 16, foram respectivamente: $\phi = 35,3^\circ$; $c = 3,49$ KPa e $\phi = 37^\circ$ e coesão nula.

O solo da amostra 16 é mais grosso, com menos finos e grãos essencialmente quartzosos, logo mais resistentes, factores que justificam um ângulo de atrito superior ao da amostra 15 (indeformada e remexida), e ausência de coesão devido à menor quantidade de finos assim como de grãos mais frágeis que se poderiam quebrar com o deslocamento relativo das duas meias caixas.

5.6.2.4 – Compressibilidade

Uma amostra indeformada do solo 16, colhida a 1m de profundidade, foi submetida ao ensaio edométrico. Cravou-se o anel de 99 mm de diâmetro num “bloco” de solo residual trazido do campo, e depois de alisados os topos, instalou-se o provete na célula edométrica, onde foi sujeito à aplicação dos mesmos escalões de carga a que foram submetidos os outros solos residuais. Na curva de compressibilidade, do ensaio edométrico respeitante a este ensaio, nota-se logo no primeiro escalão de carga, uma diminuição brusca do índice de vazios, e que nos escalões seguintes se processou de uma forma gradual e mais suave (Figura 5.26). Esta situação deve-se principalmente à estrutura aberta deste solo, confirmada pelo índice de vazios inicial elevado (Quadro 5.32), e que revela tratar-se de um solo residual maduro, onde grande parte dos finos já tinha sido lixiviada. Restaram então, pontes de ligação, entre os grãos maiores, suficientemente ténues para que com cargas mínimas se quebrem, traduzindo-se num aumento brusco de compressibilidade, logo nas primeiras cargas aplicadas.

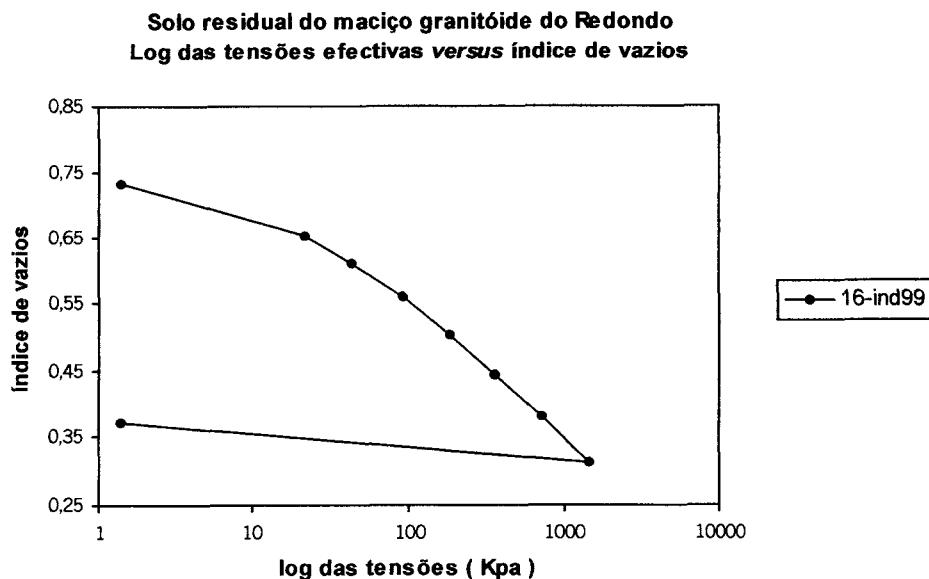


Figura 5.26 – Curva de compressibilidade obtida do ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada de um solo residual do maciço eruptivo do Redondo.

O teor em água inicial (w_i) é relativamente baixo, e o que geralmente acontece nestes casos, é que as reduzidas tensões iniciais efectivas permitem a entrada de água da célula para o provete, facto que favorece um decréscimo na força das ligações interpartículas e consequentemente o colapso da estrutura. Este raciocínio e a forma da curva de compressibilidade, explicam o valor da tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p) calculado para este solo (Quadro 5.33), e que se encontra entre os valores menores encontrados para este parâmetro neste tipo de solos residuais.

O valor do índice de compressibilidade (C_c) obtido para este solo, o mais elevado verificado nos solos residuais de granodioritos/quartzodioritos, neste estudo, está em conformidade com o referido comportamento. O valor do índice de expansibilidade (C_s) enquadrava-se nos valores encontrados para este parâmetro nos solos residuais de granitóides, uma vez que se trata de solos pouco expansivos (ver composição dos minerais de argila encontrados). No Quadro 5.33, também é possível constatar que o intervalo de variação dos coeficientes obtidos ao longo do ensaio de consolidação é superior à maioria dos solos de granodioritos e quartzodioritos analisados no presente estudo, pertencentes a manchas do distrito de Évora.

Quadro 5.32 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, da amostra indeformada do solo residual de um granitóide do maciço eruptivo do Redondo.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_0 (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	W_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	W_f (%)
16i99	16,18	15,20	0,734	6,8	24,6	0,314	0,372	20,3

Quadro 5.33 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual de um granitóide do maciço eruptivo do Redondo.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	m_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	c_v (10^{-8} m ² /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
16i99	6,0 - 0,9	3,84 - 0,66	13,4 - 0,56	5,33 - 0,04	50	0,23	0,02

Quadro 5.34 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO MACIÇO ERUPTIVO DO REDONDO.

SOLOS		15	16
LOCALIZAÇÃO		Piedade	Calado
DESCRIÇÃO		Areia argilosa, cinzenta.	Areia siltosa, cinzenta acastanhada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w_o (%)	6,3	8,5
	γ_o (KN/m ³)	19,22	16,97
	γ_d (KN/m ³)	18,04	15,69
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	100	99,28
	< 2,00 mm	93,03	95,25
	< 0,425mm	55,65	37,78
	< 0,075mm	34,17	16,85
	< 0,002mm	17,56	3,00
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	32	26
	w_{Lc} (%)	36	32
	w_p (%)	22	--
	I_p (%)	10	NP
	I_{pc} (%)	14	NP
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SC	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-2-4	A-1-b
COMPACTAÇÃO	γ_d máx. (KN/m ³)	18,73	19,03
	W_{opt} (%)	13,2	11,0
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	24	31
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,16	0,11
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	8,6	7,7
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$3,68 \times 10^{-5}$	$3,84 \times 10^{-4}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	27,07	26,38
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,5	0,681
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	33,3	40,5
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	33,9 (ind.)	37
	c (KPa)	3,45	0
EDOMÉTRICO	C_c		0,23
	C_s		0,02

5.7 – Solos residuais dos granitóides do complexo eruptivo da Vidigueira

O maciço granítóide da Vidigueira ocupa uma área relativamente pequena, 40 Km², junto à povoação com o mesmo nome, que pertence ao Distrito de Beja. Esta formação é constituída por rochas eruptivas que compreendem grande heterogeneidade mineralógica e textural, razão pela qual é frequentemente designada por complexo granítóide. Do ponto de vista petrográfico, os maciços rochosos incluem desde quartzodioritos de grão médio a fino cinzentos escuros, a granodioritos de grão médio cinzentos claros, passando por granitos de grão médio a grosseiro, por vezes porfiróide, róseos.

Os solos residuais dos granitóides da Vidigueira reflectem a heterogeneidade dos tipos litológicos que lhes deram origem. A variabilidade destes solos de alteração manifesta-se na cor, na granularidade e na textura. Trata-se, essencialmente, de areias grossas a médias, bem ou mal graduadas, por vezes com seixo fino, com mais ou menos silte, e raramente argilosas. A espessura dos solos residuais varia, nos locais amostrados, entre 3 a 8 m; verificou-se, no entanto, maior quantidade de solo residual nas saibreiras de solos resultantes de granitos. No seio destes solos, encontram-se, por vezes, blocos de rocha de dimensões consideráveis (2 ou 3 m), de forma arredondada, denunciando alteração diferencial, possivelmente potenciada pelo forte controle tectónico patente nestas formações rochosas.

5.7.1 – Dados compilados

Foram coligidos resultados respeitantes a 10 amostras de saibros da mancha da Vidigueira, a partir da Carta de Materiais do Distrito de Beja – CMDB (JAE, 1976), e que são apresentados no Quadro 5.35. As referidas amostras pertencem a solos que foram utilizados na construção de várias estradas do distrito, e da base aérea de Beja.

Quadro 5.35 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

Estudo	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	I _P (%)	EA (%)
	# 200	# 40	# 10			
CMDB	2 - 14	8 - 31	31 - 71	NR - 40	NP - 11	25 - 89

Os resultados coligidos na mancha da Vidigueira, demonstram que há uma significativa melhoria das características destes solos, relativamente aos solos dos granitóides das manchas anteriormente descritas, (ver dados coligidos das manchas de solos residuais de quartzodioritos e granodioritos), nomeadamente no que respeita à percentagem passada no peneiro 200 que é menor, assim como o aumento da percentagem de areia, seixo fino e valores do equivalente de areia. Estas características reflectem-se, portanto, nas classificações geotécnicas dos referidos solos (Figura 5.27). A maioria dos solos são arenosiltosos, bem ou mal graduados, e pertencem, geralmente, a dois subgrupos da Classificação AASHTO para fins rodoviários: A-1-b e A-2-4.

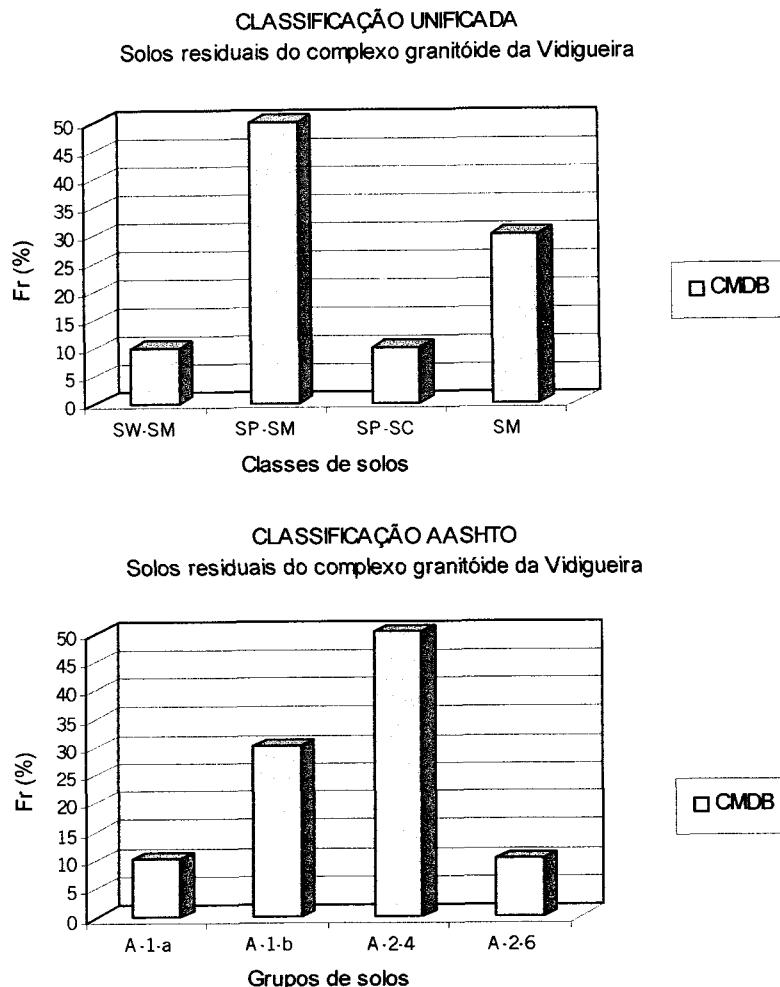


Figura 5.27 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

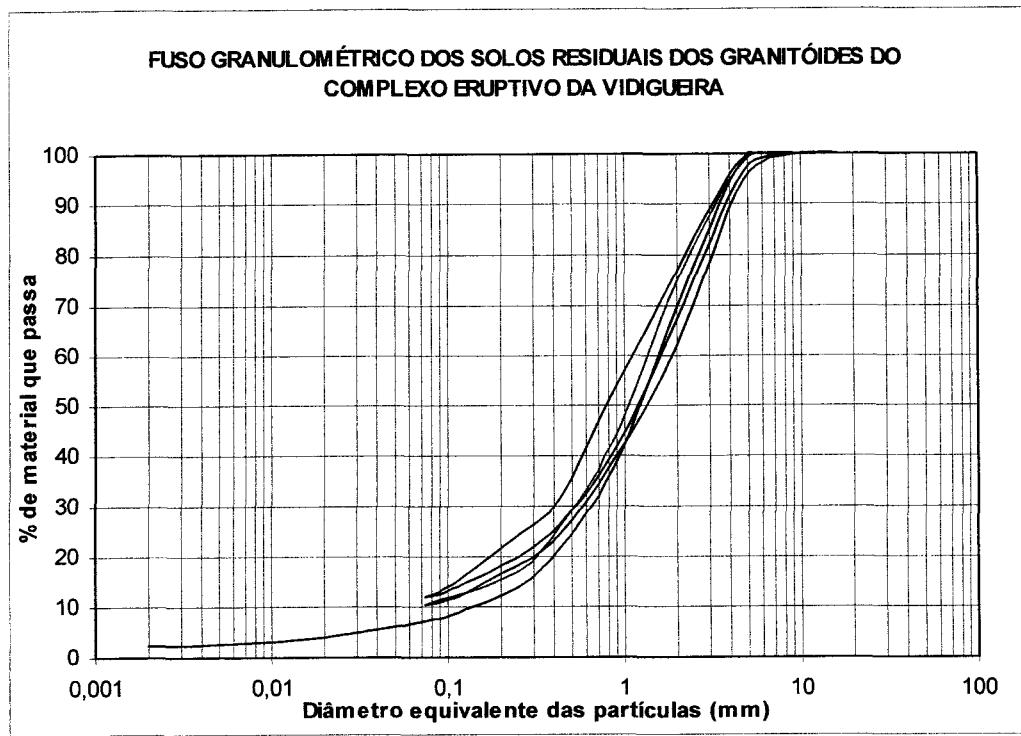
5.7.2 – Resultados experimentais

Na mancha de solos residuais resultantes da alteração das rochas do complexo granítóide da Vidigueira seleccionaram-se cinco locais de amostragem. Apesar de se tratar de uma mancha pequena, a heterogeneidade dos solos, registada pela observação dos perfis de alteração no campo, justifica aquele número. Todas as amostras foram colhidas em saibreiras, algumas delas, de grandes dimensões e ainda em exploração. As amostras 71 e 75, pertencem a solos de quartzodioritos, cinzentos acastanhados; as amostra 72 e 73, são solos castanhos avermelhados, resultantes de granitos róseos; a amostra 74 representa um solo residual castanho de um granodiorito cinzento claro.

5.7.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das amostras de solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira são apresentadas na Figura 5.28. Os parâmetros granulométricos e as restantes características gerais, destes solos, constam no Quadro 5.36.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.28 – Curvas granulométricas dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

Quadro 5.36 – Características gerais dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
3	4 - 10	52 - 65	0,05-0,14	11 - 32	2 - 3,1	24 - 33	33 - 35	21 - 26	2 - 10	8 - 12
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ _s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
23-30	6 - 19	1,1×10 ⁻⁴ - 5,8×10 ⁻⁴	0,06-0,09	26,2 - 26,4	1,58	(-1,5) - (-7,7)	2,5 - 8,7	19-25	SW-SM SM SC-SM	A-1-b A-2-4

Apesar da heterogeneidade observada nos solos residuais do referido complexo durante a prospecção de campo, verifica-se uma certa uniformidade na generalidade das suas características. A começar pela análise granulométrica, as curvas apresentam-se com desenvolvimento muito semelhante, resultando num fuso granulométrico estreito. A percentagem de areia grossa e seixo fino (>60%), predomina sobre todas as outras fracções mais finas. Os gráficos evidenciam granulometrias extensas e solos bem graduados, excepto

a amostra 74 ($Cc=3,1$) que, apesar de corresponder a um solo mal graduado, não se afasta muito dos outros.

b) Consistência

Apesar da pequena percentagem de argila existente na maioria dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira, todos eles apresentam plasticidade, embora baixa. Os valores encontrados para o índice de consistência (I_C), são muito elevados, pois os teores em água determinados *in situ* estão muito aquém do limite de liquidez (w_L). O índice de liquidez (I_L) determinado nestes solos, também comprova que os mesmos estão longe de atingir o potencial de liquefação. A amostra 74 é a que se encontra menos distante deste potencial, mesmo assim teria que ter um acréscimo no seu teor em água natural de 25%, o que é improvável, atendendo às condições climatéricas da região e às características de drenagem subjacentes a estes solos. A actividade coloidal determinada nas partículas mais finas do solo 72 ($Ac = 1,58$), demonstra que não obstante a reduzida percentagem de partículas com dimensões inferiores a 0,002 mm, os índices de plasticidade (I_P) determinados, denunciam actividade na fracção fina destes materiais.

c) Classificação geotécnica

Todos os solos analisados incluem essencialmente materiais areno-siltosos, bem graduados ou não (Quadros 5.36 e 5.42). A Classificação para fins rodoviários destes solos abrange os subgrupos A-1-b e A-2-4. Trata-se, portanto, de comportamentos muito homogéneos destes solos.

d) Outras propriedades

Os valores do equivalente de areia (EA) dos solos residuais dos granítóides da Vidigueira oscilam pouco e são relativamente baixos se levarmos em conta as percentagens de areia bastante elevadas e as respectivas classificações geotécnicas. Tal facto, deve-se, provavelmente, ao tipo de “finos” existente, plásticos e com actividade, e não tanto à sua quantidade que também é reduzida. Algumas destas amostras demonstraram expansibilidades (Exp.) consideráveis (Quadro 4.36), o que se justifica pela importante presença do mineral argiloso expansivo, esmectite, nestes solos (ver Cap. 4 – caracterização mineralógica). A permeabilidade (k) dos solos estudados, não varia muito e apresenta uma média superior à registada para os solos residuais, já referidos, de quartzodioritos e granodioritos. Os valores do peso específico das partículas sólidas (γ_s), além de serem semelhantes, aproximam-se dos valores característicos dos solos residuais de granitos. Os teores em matéria orgânica (MO) detectados são insignificantes.

5.7.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, constam no Quadro 5.37. O teor em água no estado natural (w_o), é praticamente constante em toda as amostras, isto porque a colheita das mesmas efectuou-se no mesmo dia, e porque os solos possuem características semelhantes. Os valores do peso volúmico no estado natural (γ_o) e seco (γ_d) são relativamente homogéneos, pelas mesmas razões. O índice de vazios *in situ* (e_o), revela tratar-se de solos

pouco porosos, naturalmente porque os grãos se encontram bastante imbricados uns nos outros.

b) Compactação

Efectuou-se o ensaio de compactação tipo Proctor em amostras dos solos residuais da Vidigueira e dos resultados obtidos constatou-se que possuem características de compactação muito semelhantes. Das curvas de compactação obtidas conclui-se que estes solos necessitam de pouca água para atingir o peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) considerável, conforme se apresenta nos Quadros 5.37 e 5.42. Estes resultados permitem prever para estes solos um bom comportamento quando compactados, sendo aptos para a construção de aterros, nomeadamente para a camada de coroamento.

Quadro 5.37 - Propriedades físicas dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

W_o (%)	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_o	n	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	W_{opt} (%)
7 - 9	18,8 - 19,4	17,5 - 18,1	0,443-0,503	30,7 - 33,5	19,3 - 20,4	8,5 - 9,9

5.7.2.3 – Parâmetros de resistência

a) Ensaio de corte directo

Realizaram-se dois ensaios de corte directo nos solos residuais dos granítóides da Vidigueira: um na amostra indeformada 72, o outro na amostra remexida 74. Os gráficos das tensões de corte e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, relativos ao corte directo e inverso da amostra indeformada, são apresentados na Figura 5.29, enquanto que as respectivas rectas de Coulomb, obtidas a partir das tensões de corte máximas são apresentadas na Figura 5.30.

As curvas ‘tensão de corte *versus* deslocamento horizontal’ do ensaio de corte directo desta amostra, apresentam resistências de “pico” pouco pronunciadas. O mesmo tipo de curvas, no corte inverso, apresentam algumas irregularidades devido à rotação e eventual rotura dos grãos angulosos dispostos junto à superfície de corte. É importante referir que o valor do ângulo de atrito obtido no corte directo é praticamente idêntico ao do corte inverso, ϕ (A72-dir) = 34,2° e ϕ (A72-inv) = 34,6°. A coesão determinada no corte directo é considerável para um solo granular com poucos finos, o que se pode interpretar como devendo-se em parte à “coesão interna” dos grãos de maiores dimensões e menos resistentes que se partem junto à superfície de corte; no ensaio de corte inverso, apesar de menor, a coesão é significativa, pelas razões anteriormente apontadas.

Os parâmetros de resistência determinados para a amostra 74 remexida (Quadro 5.42), demonstram que apesar da coesão ser nula, pois trata-se de um provete deformado com poucos finos, o valor do ângulo de atrito é próximo dos valores obtidos para a amostra indeformada, o que confirma a homogeneidade destes solos residuais.

b) Ensaio triaxial

Para a realização do ensaio triaxial, colheram-se amostras com amostradores de parede dupla mas, ao retirar a amostra, devido à fraca coesão entre as partículas, o solo desagregou-se em placas. Recorreu-se então a amostras remoldadas, tentando reproduzir o melhor possível as características físicas *in situ*. As amostras, com diâmetro igual a 102 mm, e com o dobro da altura, foram saturadas ($S > 95\%$), consolidadas e, posteriormente sujeitas ao corte não drenado, com leitura das pressões intersticiais (tensões neutras).

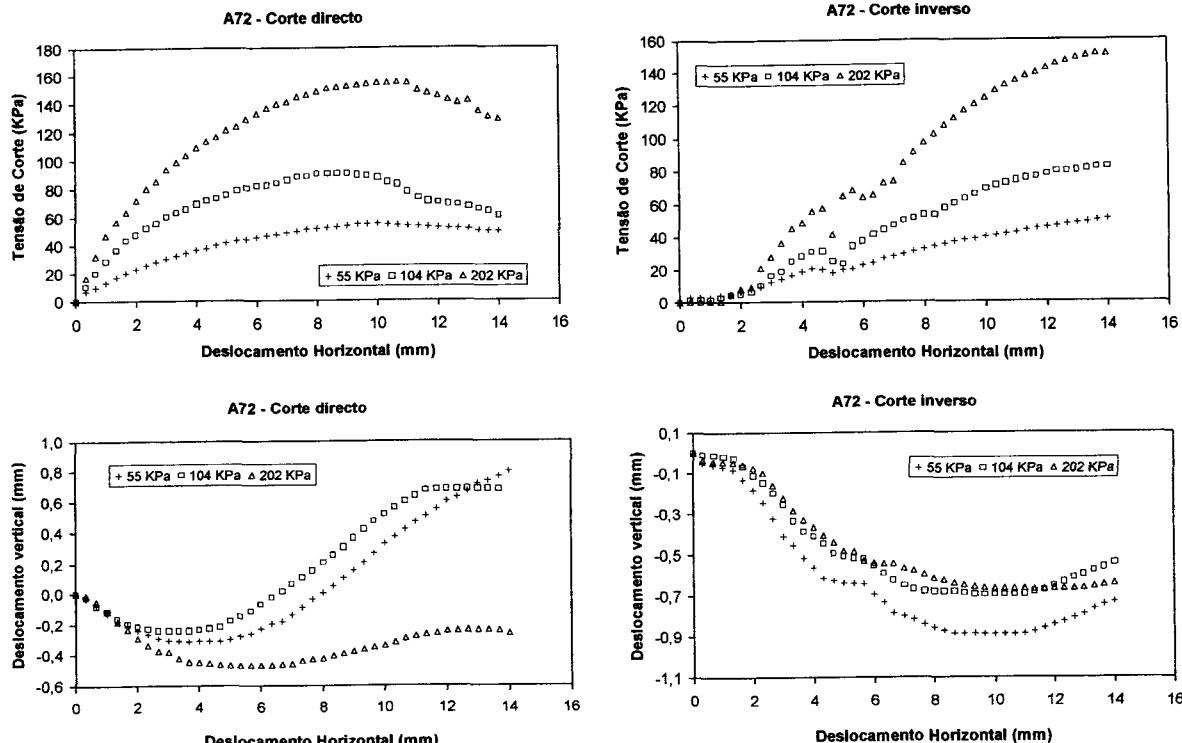


Figura 5.29 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

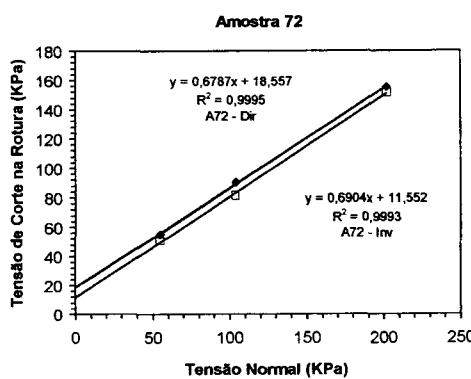


Figura 5.30 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

A velocidade de deformação imposta na fase de corte foi 0,2 mm/min.. As tensões confinantes (σ'_c) na fase de corte, foram iguais às da fase de consolidação para as três câmaras e foram 50, 100 e 200 KPa, respectivamente. Na fase de consolidação foram realizadas leituras, que permitiram obter dados para estimar o valor do coeficiente de permeabilidade. Os valores dos parâmetros de resistência em termos de tensões efectivas e tensões totais, bem como o módulo de deformabilidade tangente (Eti), constam no Quadro 5.38.

Quadro 5.38 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial do tipo consolidado não drenado (CU) em amostra remoldada do solo residual de um granítóide da Vidigueira.

σ'_c (KPa)	Parâmetros físicos iniciais e finais				Parâmetros geotécnicos obtidos				
	γ_d (KN/m ³)	W_i (%)	S (%)	W_f (%)	k (m/s)	Eti (MPa)	A_f	coesão	ângulo de atrito
50	17,75	8,6	97,7	17,7	$1,7 \times 10^{-6}$	34,099	0,25	$c = 0$ KPa	$\phi = 25,1^\circ$
100	17,65	8,5	99	17,5	$4,8 \times 10^{-7}$	33,852	0,16		
200	17,65	8,4	100	17,1	$8,9 \times 10^{-7}$	46,807	0,07		

O critério de rotura utilizado foi o de máxima tensão de desvio. Os gráficos respeitantes a este ensaio, são apresentados na Figura 5.31. As curvas ‘tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) versus extensão axial (ϵ_a)’, apresentam-se suavizadas e com tensões de “pico” pouco pronunciadas, tal como as relativas ao ensaio de corte directo. O ângulo de atrito obtido em termos de tensões efectivas é bastante superior ao valor do mesmo parâmetro em termos de tensões totais, pelo que se deduz que a componente das pressões intersticiais tem uma importância relevante na resistência ao corte determinada pelo ensaio triaxial no solo em estudo. No entanto, convém relembrar que este solo foi saturado, consolidado e submetido ao corte em condições não drenadas, pressupostos que dificilmente se concretizam neste tipo de solos residuais de granítóides *in situ*, porque geralmente, são solos não saturados e devido à sua estrutura, possuem permeabilidades que favorecem a drenagem. Acresce ainda que, nos locais de amostragem estudados, normalmente taludes de escavação, o ensaio triaxial não reproduz o estado triaxial *in situ*. O ensaio de corte directo acaba por caracterizar melhor a estabilidade destes solos em laboratório, uma vez que se aproxima mais das condições no terreno.

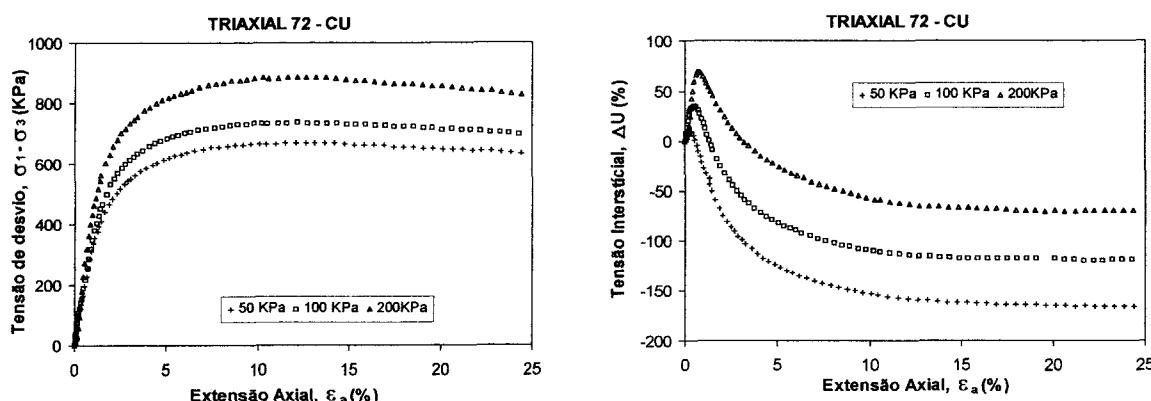


Figura 5.31 – Curvas obtidas do ensaio triaxial - CU realizado no solo residual de um granítóide do complexo da Vidigueira.

Pelas razões anteriormente expostas, decidiu-se efectuar um segundo ensaio triaxial no solo 72, em amostras remoldadas, mas mantendo as condições físicas *in situ*, nomeadamente o estado não saturado. As tensões confinantes e a velocidade de deformação imposta na fase de corte, foram idênticas às aplicadas no ensaio triaxial-CU da amostra saturada, consolidada e submetida ao corte não drenado. Os parâmetros físicos e geotécnicos relativos ao ensaio triaxial-UU, são apresentados no Quadro 5.39. As curvas ‘tensão-extensão’ e ‘variação volumétrica-extensão’ deste ensaio constam na Figura 5.32.

Quadro 5.39 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial-UU, em provetas não saturados, do solo residual de um granítóide do complexo da Vidigueira.

σ_c (KPa)	Parâmetros físicos iniciais				Parâmetros geotécnicos obtidos		
	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	E_{ti} (MPa)	coesão	ângulo de atrito
50	17,69	0,491	11,6	63,55	46,092	$c_u = 48,66$ KPa	$\phi_u = 37,2^\circ$
100	17,78	0,484	11,5	64,47	55,364		
200	17,71	0,489	11,4	62,71	58,150		

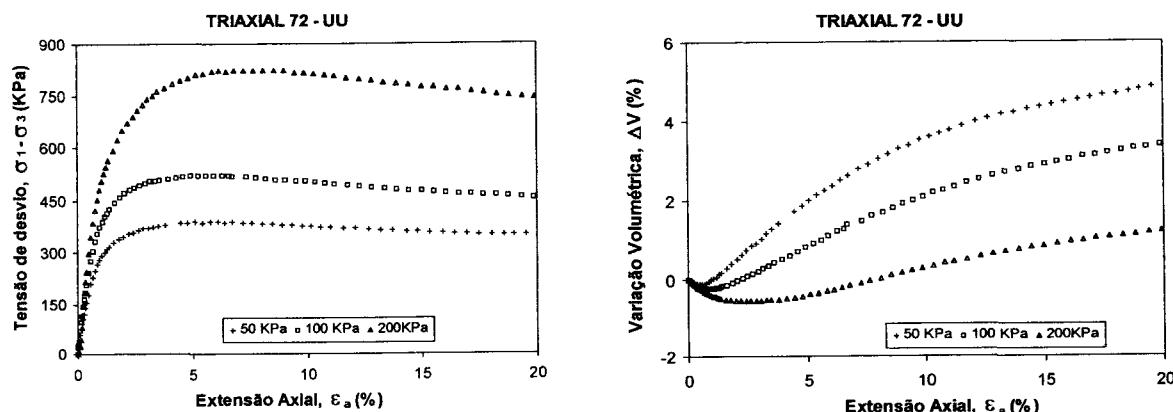


Figura 5.32 – Curvas de tensão de desvio e variação volumétrica *versus* extensão axial do ensaio triaxial-UU em amostras não saturadas do solo residual de um granítóide do complexo da Vidigueira.

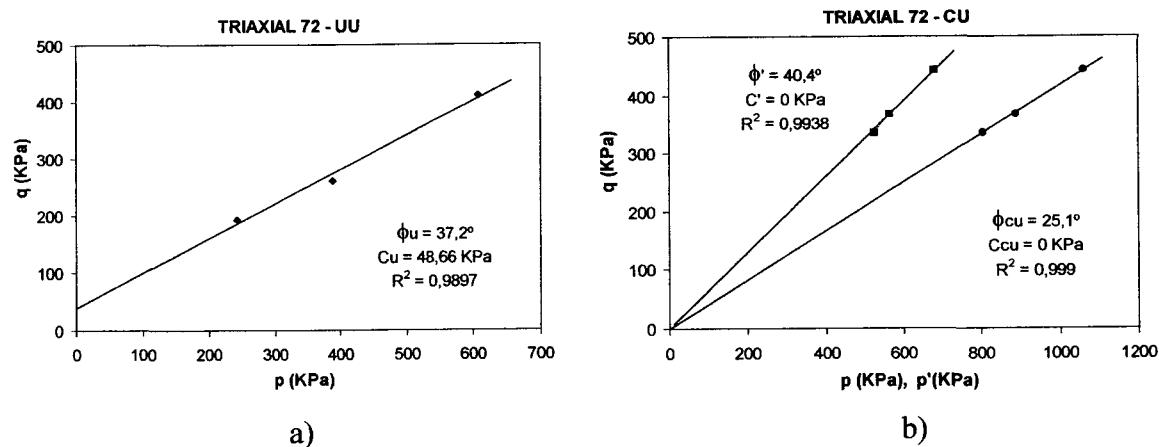


Figura 5.33 – Envoltorios de rotura dos ensaios triaxiais em amostras, a) não saturadas e b) saturadas, do solo residual de um granítóide do complexo da Vidigueira.

A tipologia das curvas ‘tensão-extensão’ obtidas nos dois tipos de triaxiais realizados neste solo é semelhante. São curvas suaves que apesar de apresentarem resistência de “pico”, pouco pronunciada. A evidência desta resistência reflecte o comportamento dilatante deste solo, devido, quer às características granulométricas (existência de muitos grãos grossos), quer ao índice de vazios inicial relativamente baixo, porque as partículas mantinham considerável imbricamento. Este facto também é confirmado pela curva ‘variação volumétrica-extensão’ (Figura 5.32). As variações de volume traduzem no início uma diminuição de volume, atingindo um valor mínimo, para depois aumentarem (dilatância) até tenderem para um patamar para valores elevados de deformação.

Comparando as envolventes de rotura patentes nos diagramas $p;q$ (Figura 5.33), respeitantes aos dois ensaios triaxiais, pode-se verificar que no ensaio CU, a coesão é nula, isto é, o solo remexido, à medida que se processa a rotura, tem um comportamento eminentemente atrítico e típico de solos granulares (arenosos ou areno-siltosos) em que a resistência não contempla factores de coesão estrutural (Viana da Fonseca, 1998). Mas no ensaio triaxial não saturado (Figura 5.33 b), verifica-se a existência de uma coesão elevada devido à coesão capilar (Atkinson, 1993), característica de solos granulares não saturados e por isso mais sujeitos ao efeito sucção.

O valor do ângulo de atrito obtido no ensaio triaxial-UU é mais próximo do valor deste parâmetro obtido no ensaio de corte directo, em amostra indeformada do mesmo solo, quando comparado com os valores determinados no ensaio triaxial-CU. Tal resultado, reforça a ideia de que os ensaios triaxiais realizados em solos não saturados aproximam-se mais das condições naturais de jazida uma vez que, geralmente, os solos residuais ocorrem acima do nível freático.

5.7.2.4 – Compressibilidade

Dado que os solos residuais dos granitóides da Vidigueira apresentam características geotécnicas muito homogéneas, optou-se por submeter apenas um solo ao ensaio de consolidação. Assim, de um “bloco” de solo da amostra 72, retiraram-se dois provetes indeformados, com diâmetros de 50 e 99 mm, cada um. As curvas de compressibilidade referentes a estes ensaios são apresentadas na Figura 5.34. Os parâmetros físicos iniciais e finais dos provetes submetidos ao ensaio edométrico bem como as suas características de compressibilidade constam respectivamente nos Quadros 5.40 e 5.41.

As curvas de compressibilidade dos solos residuais em estudo não diferem muito entre si, realçando-se o facto de que em ambas o ponto de cedência, apesar de pouco nítido, parece não se dar logo nos primeiros patamares de carga, ao contrário de outros solos residuais mencionados nesta dissertação. Isto demonstra que a estrutura do solo suporta as primeiras tensões aplicadas, cedendo só para tensões acima dos 100 KPa, o que se confirma, através dos valores da tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p) determinados (Quadro 5.41). Neste quadro constam, igualmente, o índice de compressibilidade (C_c) e o índice de expansibilidade (C_s), que, apesar de não diferirem muito, são ligeiramente superiores os valores destes parâmetros na amostra de maiores dimensões. É importante referir que o índice de vazios inicial (e_i) é próximo entre as duas amostras e, como se sabe, está provada a dependência entre aqueles parâmetros e este índice. Todavia, o teor em água inicial (w_i) é substancialmente diferente nas duas amostras, o que pode condicionar o andamento das curvas e os valores dos índices finais. Os intervalos de oscilação dos coeficientes a_v , m_v , c_v e k são mais amplos na amostra de diâmetro maior.

Apesar de se ter consciência que, à partida, numa amostra de maiores dimensões, a influência que o processo de amostragem pode ter na perturbação da mesma é inferior à perturbação de uma amostra de menores dimensões, por tudo o que foi referido e pelos resultados, não se pode provar isso. Além de que, por muito semelhantes que sejam os procedimentos de colheita da amostra, manuseamento da mesma e instalação no edómetro, os cuidados ou condições subjacentes a estas operações podem não ser exactamente iguais, e estas situações podem marcar a diferença.

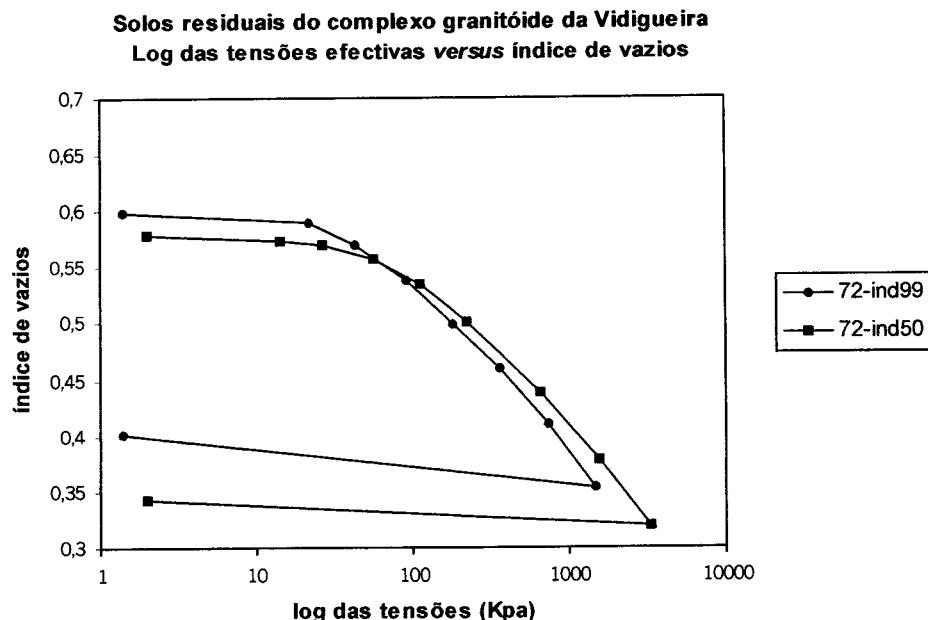


Figura 5.34 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos efectuados em amostras indeformadas de solo residual do complexo granítóide da Vidigueira.

Quadro 5.40 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de amostras indeformadas de solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	W_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	W_f (%)
72i50	17,46	16,57	0,580	5,2	23,8	0,320	0,342	12,5
72i99	18,53	16,38	0,599	13,4	59,6	0,354	0,402	16,9

Quadro 5.41 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaios edométrico dos solos residuais do complexo granítóide da Vidigueira.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	m_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	c_v (10 ⁻⁸ m ² /s)	k (10 ⁻¹⁰ m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
72i50	3,2 - 0,3	2,5 - 0,24	6,08 - 2,54	1,25 - 0,06	158	0,18	0,01
72i99	7,6 - 0,8	4,76 - 0,54	13,77 - 4,02	6,62 - 0,23	148	0,19	0,02

Quadro 5.42 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITÓIDES DO COMPLEXO ERUPTIVO DA VIDIGUEIRA.

SOLOS	71	72	73	74	75
LOCALIZAÇÃO	Vidigueira 1	Vila de Frades	S. Cucufate	Cuba	Vidigueira 2
DESCRIÇÃO	Areia argilo-siltosa, castanha acinzentada.	Areia bem graduada, com silte e seixo fino, castanha avermelhada.	Areia bem graduada, com silte e seixo fino, castanha avermelhada.	Areia siltosa, castanha avermelhada.	Areia mal graduada, com silte e seixo fino, castanha.
PROPRIEDADES FÍSICAS “IN SITU”	w_o (%)	8,3	8,6	6,6	8,0
	γ_o (KN/m ³)	18,93	19,42	19,32	18,83
	γ_d (KN/m ³)	17,55	17,85	18,14	17,46
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	99,2	98,64	94,78	96,38
	< 2,00 mm	77,23	69,47	62,07	67,20
	< 0,425mm	31,50	21,55	24,53	26,42
	< 0,075mm	12,00	7,15	10,39	12,10
	< 0,002mm		2,53		
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	25	30	24	33
	w_{Lc} (%)	32	35	33	35
	w_P (%)	21	26	22	23
	I_p (%)	4	4	2	10
	I_{pc} (%)	11	9	11	12
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SC-SM	SW-SM	SW-SM	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)	19,44	20,40	19,34	19,63
	$W_{ópt.}$ (%)	9,6	8,5	9,9	9,3
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	25	26	23	26
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,09	0,09	0,06	0,08
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	10,5	5,7	6,3	18,7
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$1,7 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,38	26,38	26,18	26,18
ÍNDICE DE VAZIOS “IN SITU”	e_o	0,503	0,478	0,443	0,5
POROSIDADE “IN SITU”	n (%)	33,5	32,3	30,7	33,3
CORTE DIRECTO	ϕ (o)		34,2 (ind.)		33
	c (kPa)		18,56		0
EDOMÉTRICO	C_c		0,19		
	C_s		0,02		

5.8 – Solos residuais do maciço granítico de Pias

O granito de Pias aflora numa área de aproximadamente 70 Km², mas de forma muito irregular. Do ponto de vista geográfico este maciço granítico é o mais meridional de Portugal. Trata-se de um granito de composição calco-alcalina, de grão médio, essencialmente biotítico, por vezes porfiróide com pequenos fenocristais (Carvalhosa *et al.*, 1970). As rochas apresentam geralmente tom cinzento claro, mas podem ocorrer variantes róseas. A região onde afloram estes granitos é praticamente plana, e predominam as extensas manchas rochosas cobertas ou não por solo residual granítico.

O número de saibreiras existente é reduzido na região de Pias. Em todos os locais onde se identificou o solo residual do granito de Pias, pode-se observar características muito homogéneas quanto à cor e textura. Este solo residual é fundamentalmente constituído por areias siltosas, por vezes argilosas, brancas acinzentadas. Trata-se de um solo relativamente fino, macio, bastante friável e fácil de colher, com pouco quartzo. Os perfis de alteração reconhecidos possuem diaclases “reliquia”, com diferentes direcções, junto às quais o solo apresentava um aspecto mais alterado, amarelado, denunciando claramente que a meteorização é controlada pelo diaclasamento.

5.8.1 – Dados compilados

Na Carta de Materiais do Distrito de Beja – CMDB (JAE,1976), constam os resultados de análises de amostras colhidas em duas saibreiras que pertencem à mancha dos solos residuais do granito de Pias e que constam no Quadro 5.43. Os valores expostos são análogos e confirmam a homogeneidade destes solos. Ambos os solos são areno-argilosos, possuindo plasticidade média e alta. Quanto à classificação AASHTO para fins rodoviários, prevê-se um comportamento regular na camada sob o pavimento.

Quadro 5.43 – Características coligidas, dos solos residuais do granito de Pias.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	Ip (%)	EA (%)	Classificação	
	# 200	# 40	# 10				Unificada	AASHTO
Saireira 16	20	35	67	55	27	27	SC	A-2-7(1)
Saireira 17	26	42	67	28	11	30	SC	A-2-6

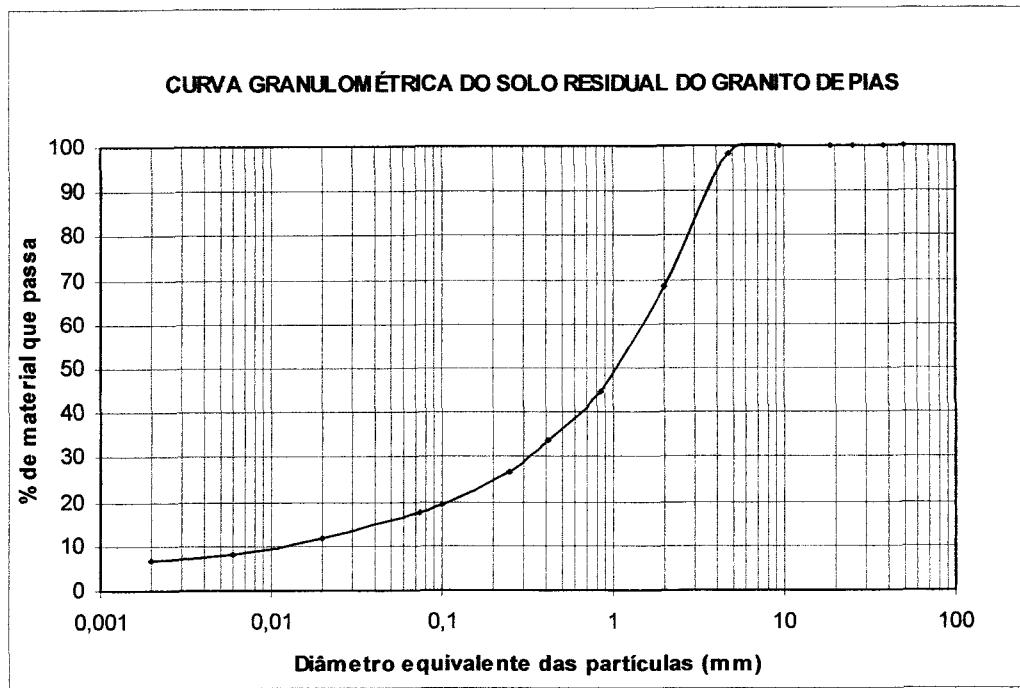
5.8.2 – Resultados experimentais

Devido à homogeneidade patente nos solos residuais do granito de Pias, e à exiguidade de locais favoráveis ao seu estudo e colheita para ensaios, seleccionou-se a melhor saibreira da região para prospecção e colheita da amostra 76. O referido local, uma saibreira situada a 5 Km de Pias, junto à EN 255-Moura/Pias, possui uma espessura aproximada de 6m. Para além da colheita de amostras remexidas e indeformadas, para posterior realização de ensaios em laboratório, realizaram-se vários ensaios penetrométricos que são descritos no Capítulo 6.

5.8.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

Pela análise da curva granulométrica de uma amostra do solo residual do granito de Pias (Figura 5.35), verifica-se tratar-se de uma granulometria extensa e de um solo mal graduado, se bem que com um valor de C_c muito próximo dos solos bem graduados (Quadro 5.44). A percentagem de finos é considerável, assim como a de argila, ainda que abaixo dos 30%. A percentagem de areia ronda os 50% e a percentagem de seixo fino (20%), é significativa.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grossa	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.35 – Curva granulométrica do solo residual do granito de Pias.

Quadro 5.44 – Características gerais do solo residual do granito de Pias.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D_{10}	C_u	C_c	w_L (%)	w_{Lc} (%)	w_p (%)	I_p (%)	I_{pc} (%)
7	11	51	0,022	68	3,3	42	47	27	15	20
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I_L (%)	I_C (%)	w_R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
28	14	$1,7 \times 10^{-5}$	0,04	26,1	2,17	-0,68	1,68	21	SM	A-2-7(0)

b) Consistência

Este solo apresenta uma plasticidade média e uma actividade coloidal elevada, o que significa que para a percentagem de argila registada, possui um índice de plasticidade elevado. A mais provável explicação para tal situação, é o facto de os minerais argilosos existentes naquela percentagem serem efectivamente plásticos e, que é natural que agregados destes minerais tenham sido contabilizados na fracção de silte, porque não se dispersaram, mas que revelam o seu comportamento plástico quando se analisa a consistência da fracção inferior a 0,425 mm. O índice de consistência (I_C), determinado nesta fracção, corresponde a solos consistentes, o que se justifica pela distância considerável entre o limite de liquidez (w_L) e o teor em água no estado natural (w_o), em relação ao índice de plasticidade (I_P). O limite de liquidez (w_L) é praticamente o dobro do teor em água no estado natural (w_o), e é o que determina um índice de liquidez (I_L) negativo. Para este solo apresentar potencial de liquefação, teria que atingir um teor em água no estado natural (w_o), de 42%, o que seria praticamente impossível nesta região do Baixo Alentejo interior, com períodos de seca extensos, e quando chove estes maciços terrosos patenteiam uma permeabilidade em pequeno através dos poros destes solos estruturados, e uma permeabilidade em grande devido às diaclases “reliquia”; esta última característica é uma constante na generalidade destes maciços de solos residuais.

c) Classificação geotécnica

O solo residual do granito de Pias, é classificado como SM - areia siltosa no Sistema Unificado, mas devido ao índice de plasticidade (I_P) médio, pertence ao subgrupo A-2-7(0) da Classificação AASHTO. Esta última está de acordo com os dados coligidos e confirma as reservas que se devem ter em linha de conta na eventual aplicação destes solos na camada sob o pavimento.

d) Outras propriedades

O valor do equivalente de areia (EA) da amostra 72 é comparável aos valores que para o mesmo parâmetro são expostos nos elementos coligidos (Quadro 5.43). Apesar da considerável percentagem de areia e seixo fino, a qualidade dos “finos” existentes nos solos residuais em estudo, impede a subida dos valores do referido parâmetro. A expansibilidade (Exp.) é considerável e, justificada pela presença significativa de esmectite entre os minerais argilosos detectados (ver Cap. 4 – caracterização mineralógica). A permeabilidade (k) é considerada média e típica de areias finas. O teor em matéria orgânica (MO) é praticamente inexistente. O peso específico das partículas sólidas (γ_s), é idêntico ao valor habitual para a densidade dos granitos, e substancialmente inferior ao dos granodioritos e quartzodioritos.

5.8.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, do solo residual do granito de Pias, constam no Quadro 5.47. O teor em água no estado natural ($w_o = 17\%$), é significativo para este tipo de solos e justifica-se: i) pela época do ano em que foi colhida a amostra de solo, mês de Janeiro, com dias seguidos com precipitação; ii) pela exposição ao sol directo limitada pela orientação do perfil, virado a Norte; iii) pela percentagem de partículas finas do solo que aumenta a capacidade de retenção da água capilar durante mais tempo. O índice de vazios *in*

situ (e_0), e consequentemente a porosidade (n) inerente ao solo, são frequentes neste tipo de solos residuais de granitos.

b) Compactação

Em solo da amostra 72 remexida, realizou-se o ensaio de compactação tipo Proctor. O peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}=17,85\text{ KN/m}^3$) e o respectivo teor em água óptimo ($w_{ópt}=15,6\%$), constam no Quadro 5.47. Este último, significa que este material tem capacidade para absorver uma considerável quantidade de água, devido à quantidade e qualidade dos seus “finos”, antes de atingir a máxima compacidade.

5.8.2.3 – Parâmetros de resistência

Realizou-se um ensaio de corte directo, seguido de corte inverso, numa amostra indeformada de solo residual do granito de Pias. Os gráficos respeitantes a este ensaio são apresentados na Figura 5.36.

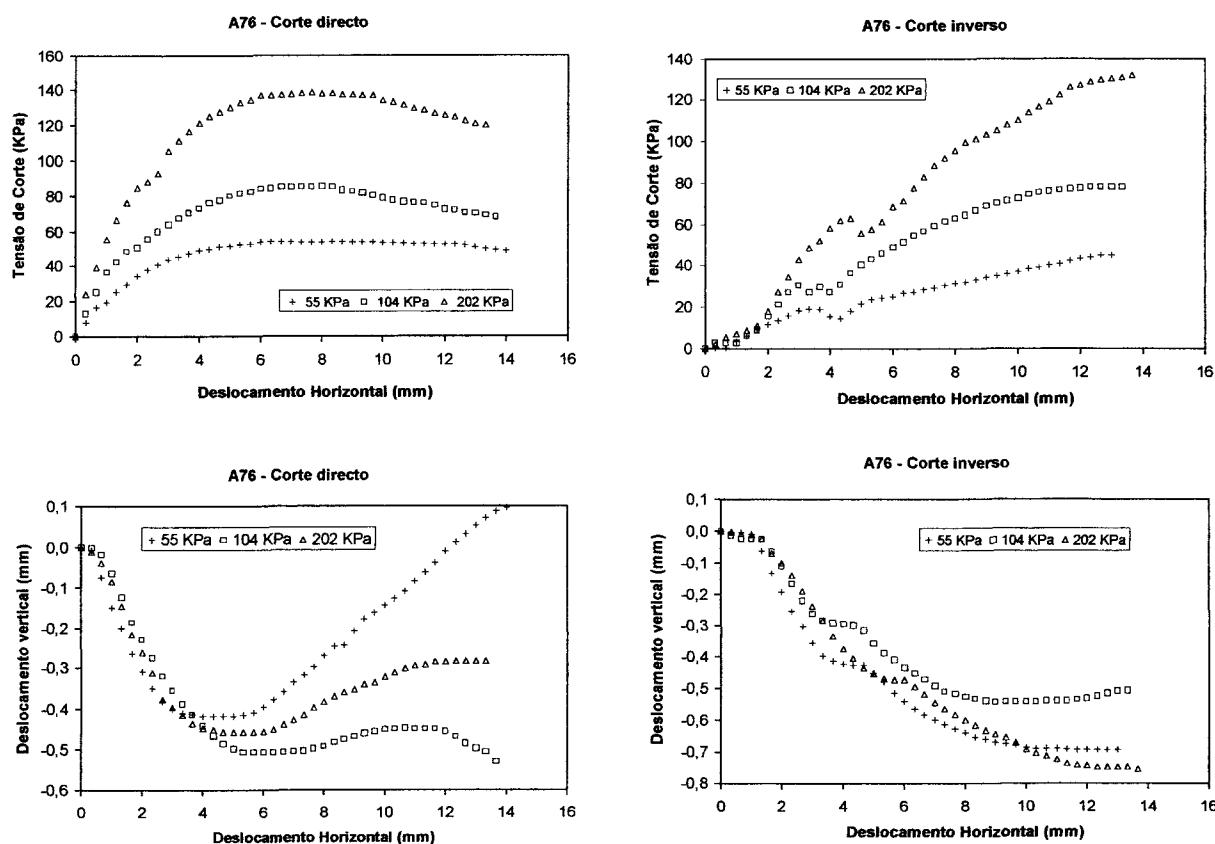


Figura 5.36 – Gráficos do ensaio de corte directo e inverso em amostra indeformada do solo residual do granito de Pias.

As curvas ‘tensão de corte *versus* deslocamento horizontal’ do ensaio de corte directo são relativamente suaves e apresentam resistências de “pico” pouco pronunciadas. Pelo contrário, o mesmo tipo de curvas mostra-se bastante irregular no corte inverso, atingindo-se a resistência ao corte máxima no final do ensaio. As curvas ‘deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal’ expõem as partes côncavas para cima, ou seja no caso do corte

directo e no início do ensaio há uma redução abrupta do índice de vazios até ao tempo de rotura, o que significa que o solo tem uma estrutura suficientemente aberta, para que o volume total do provete diminua devido ao arranjo das partículas, quando o mesmo é sujeito a solicitações de corte. Após a rotura, aquele volume aumenta devido à deslocação e rotação dos grãos junto à superfície cortada. No corte reversivo, o processo é invertido, com a inevitável sobreposição das duas meias-caixas, os grãos tendem a ocupar novamente os espaços vazios, diminuindo o volume total, apesar da rotação, e eventual rotura, de alguns grãos, que a irregularidade da curva demonstra. As rectas de Coulomb, obtidas a partir das tensões de corte máximas e, respeitantes a estes ensaios, são apresentadas na Figura 5.37.

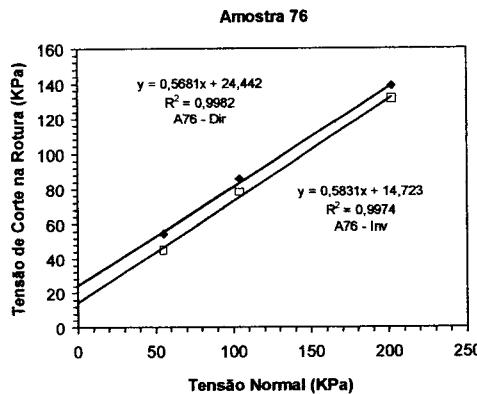


Figura 5.37 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada do solo residual do granito de Pias.

Os valores do ângulo de atrito são muito semelhantes, $\phi(A76\text{-dir})=29,6^\circ$ e $\phi(A76\text{-inv})=30,2^\circ$, sendo ligeiramente superior no corte inverso, possivelmente devido à resistência oferecida pelos grãos irregulares de maiores dimensões que entretanto se deslocaram junto à superfície de corte. Ao contrário, a coesão, decai praticamente para metade, no corte inverso em relação ao corte directo, o que realça a importância da estrutura destes solos residuais naquele parâmetro. Pondo a hipótese de posteriormente a estes cortes no solo, continuar a inverter o sentido da marcha, sucessivamente, haveria uma altura, nesse ensaio multi-reversivo, em que a coesão seria praticamente nula e a superfície de corte ficaria perfeitamente definida. Pela análise das rectas de Coulomb, verifica-se que os coeficientes de regressão linear são próximos da unidade, o que comprova a homogeneidade deste solo, favorecendo uma boa reproduzibilidade das características nos provetes das três caixas de corte.

5.8.2.4 – Compressibilidade

Uma amostra indeformada do solo residual do granito de Pias, foi submetida ao ensaio edométrico, num anel de 99 mm e, seguindo os procedimentos habituais. Através da análise da curva de compressibilidade referente a este ensaio (Figura 5.38), pode-se inferir que não houve um ponto de cedência nítido, havendo antes vários pontos ao longo da curva, em que se processa uma diminuição brusca do índice de vazios, seguidos por escalões de carga onde a compressibilidade varia menos. Esta situação sustenta a ideia de que a desestruturação deste solo evolui progressivamente à medida que se vão aplicando as sucessivas tensões, e não num momento único, no qual se dá o colapso total da estrutura.

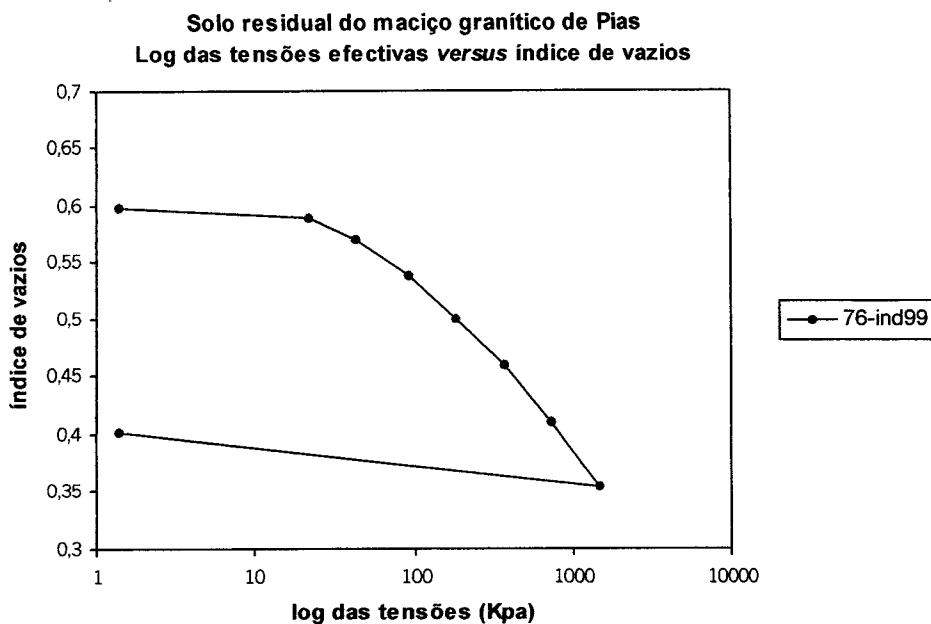


Figura 5.38 – Curva de compressibilidade obtida de ensaio edométrico efectuado em amostra indeformada do solo residual do maciço granítico de Pias.

Os parâmetros físicos iniciais e finais da amostra submetida ao ensaio de consolidação em célula edométrica constam no Quadro 5.45. As características de compressibilidade da referida amostra expõem-se no Quadros 5.46.

Quadro 5.45 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada de solo residual do maciço granítico de Pias.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_0 (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	W_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	W_f (%)
76ind99	17,75	15,98	0,637	11,2	47,0	0,368	0,439	17,1

Quadro 5.46 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaios edométrico do solo residual do maciço granítico de Pias.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	m_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	c_v (10^{-8} m ² /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
76ind99	7,1 - 0,7	4,38 - 0,52	16,59 - 0,52	7,31 - 0,08	85	0,18	0,02

Os valores obtidos para o índice de compressibilidade (C_c) e para o índice de expansibilidade (C_s) são usuais em areias siltosas resultantes da alteração de granitos. O valor determinado para a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p), corrobora a tendência de que os solos residuais que compreendem pesos volúmicos no estado seco (γ_d) mais baixos, são os que apresentam os menores valores para aquele parâmetro.

Quadro 5.47 – QUADRO SÍNTSE DO SOLO RESIDUAL DO MACIÇO GRANÍTICO DE PIAS

SOLO	76
LOCALIZAÇÃO	Pias
DESCRIÇÃO	Areia siltosa, branca acinzentada.
PROPRIEDADES FÍSICAS “ <i>IN SITU</i> ”	w_o (%) 16,8 γ_o (KN/m ³) 19,03 γ_d (KN/m ³) 16,28
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm 98,27 < 2,00 mm 68,60 < 0,425mm 33,84 < 0,075mm 17,67 < 0,002mm 6,90
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%) 42 w_{Lc} (%) 47 w_p (%) 27 I_p (%) 15 I_{pc} (%) 20
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA SM A.A.S.H.T.O. A-2-7 (0)
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³) 17,85 $w_{ópt.}$ (%) 15,6
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%) 28
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%) 0,04
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%) 14,1
PERMEABILIDADE	k (m/s) $1,7 \times 10^{-5}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³) 26,09
ÍNDICE DE VAZIOS “ <i>IN SITU</i> ”	e_o 0,602
POROSIDADE “ <i>IN SITU</i> ”	n (%) 37,6
CORTE DIRECTO	ϕ (o) 29,6 (ind.) c (KPa) 24,42
EDOMÉTRICO	C_c 0,18 C_s 0,02

5.9 – Solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália

O maciço granítico de Santa Eulália, conhecido pela sua estrutura subvulcânica com aspecto anelar (Gonçalves *et al.*, 1972, 1975), é, essencialmente, composto por duas variedades de granito: o granito róseo de grão médio a grosseiro, biotítico, de carácter alcalino, na zona periférica do maciço; e o granito cinzento de grão médio a fino com tendência porfiróide e carácter calco-alcalino. Estes granitos enquadram-se numa formação de forma irregular, a qual faz parte de um vasto maciço eruptivo com uma área aflorante de aproximadamente 480 Km². A leste encontra-se a povoação de Monforte, a oeste o Rio Caia, no limite norte situa-se Arronches e a sul, Barbacena.

O granito cinzento, que se apresenta bastante fracturado, ocorre junto à povoação de Santa Eulália, localizada no núcleo do maciço, numa área que sob o ponto de vista geomorfológico é aplanada. Os perfis de alteração deste granito são pouco espessos, e os solos resultantes são constituídos por areias siltosas, cinzentas claras a amareladas, mais ou menos fáceis de colher, de acordo com o estado de evolução do solo e do grau de estruturação do mesmo. Os locais de amostragem são exíguos.

O granito róseo alcalino, envolve o granito cinzento calco-alcalino, na estrutura anelar de Santa Eulália. O relevo da zona periférica é mais accidentado e as rochas encontram-se menos fracturadas. As espessuras de solo residual são maiores, em alguns locais, superiores a 10 m. O tipo de solo varia entre areia grossa a cascalho, com silte, rosa claro, rosa forte ou acastanhado. Os grãos de maiores dimensões são angulosos, irregulares, predominantemente constituídos por feldspato potássico róseo, e encontram-se perfeitamente imbricados uns nos outros, facto que, apesar da reduzida percentagem de matriz fina, permite a ocorrência de taludes praticamente verticais, neste tipo de solos. Os locais com espessuras grandes de solo residual abundam, mas a colheita de amostras indeformadas é dificultada pela forma irregular do grão e consequente imbricamento e, principalmente, devido ao tamanho do grão comparativamente com as dimensões dos amostradores. Após a difícil tarefa de retirar as amostras do seu posicionamento natural, o solo tende a desmoronar, devido à fraca coesão interpartículas.

5.9.1 – Dados compilados

Os solos residuais do maciço eruptivo de Santa Eulália constituíram objecto de ensaios laboratoriais no âmbito de três estudos geológicos e geotécnicos fundamentais: CMDP – Carta de Materiais do Distrito de Portalegre (JAE, 1983a); A6-B/Elv - Autoestrada Marateca/Elvas - sublanço Borba/Elvas (JAE/BRISA, 1999) e IP2-Monf. – Portalegre/Monforte e Variante de Monforte (JAE, 1985). No Quadro 5.48 são apresentados o tipo e o número de ensaios compilados por estudo. Os intervalos de variação das características de identificação e compactação coligidas dos estudos consultados constam no Quadro 5.49.

Através da análise do Quadro 5.49, constata-se tratar-se de solos, na generalidade, de grão grosseiro com poucos finos. Na verdade, os solos residuais do granito róseo de Santa Eulália enquadram-se entre os mais grosseiros do Alto Alentejo, onde os maiores grãos correspondem aos feldspatos potássicos que preservam quase na integra a forma e dimensão que herdaram da rocha-mãe. Apesar da baixa percentagem de finos, alguns destes solos revelam certa plasticidade. Os valores do equivalente de areia são, por seu turno, dos mais elevados nos solos estudados, apresentando um valor médio para este parâmetro de 50%. Os

valores do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e do teor em água óptimo ($w_{ópt}$), obtidos no ensaio de compactação tipo Proctor modificado, demonstram as excelentes características de compacidade dos mesmos, tendo sido utilizados na camada de coroamento de aterros da A6-Autoestrada e do IP2, registando-se um excelente comportamento quando compactados.

Quando se comparam os valores das características coligidas dos três estudos, notam-se algumas diferenças. Este facto deve-se em parte à variedade de locais de amostragem, que compreende a Carta de Materiais do Distrito de Portalegre, cujo objectivo principal é caracterizar os solos oriundos de todas as saibreiras identificadas, independentemente da sua aplicação posterior. Daí resulta um intervalo de variação de dados superior aos respeitantes a obras específicas, como a A6 ou o IP2, onde apenas se referem os locais ao longo do traçado. Relativamente aos valores da A6, estes dizem respeito somente aos ensaios efectuados nos solos de uma única e grande saibreira em Barbacena, com o objectivo de aplicar os mesmos na construção deste empreendimento, pelo que se comprehende a homogeneidade e a excelência dos valores expostos.

Quadro 5.48 – Tipo e número de ensaios laboratoriais coligidos, relativos aos solos residuais dos granitos do maciço eruptivo de Santa Eulália.

Estudos	Análises granulométricas	Limites de consistência	w_o	EA	Compactação	CBR	Classificação	
							AASHTO	Unificada
CMDP	26	26		26			26	26
A6-B/Elv.	3	3		3	3	3	3	3
IP2-Monf.	7	7	7	6	5	5	7	7
TOTAL	36	36	7	35	8	8	36	36

Quadro 5.49 – Intervalos de variação das características coligidas, correspondentes aos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			w_L (%)	I _P (%)	w_o (%)	EA (%)	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	$w_{ópt}$ (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDP	1 - 17	4 - 38	13 - 76	NR-36	NP-14		20-86			
A6-B/Elv.	6 - 10	12 - 20	31 - 51	NR	NP		43-53	20,1-20,6	6,2-7,4	38-42
IP2-Monf.	8 - 39	20 - 63	50 - 91	26-35	3-15	2-11	11-26	18,9-20,5	7,4-12,6	16-30
TOTAL	1 - 39	4 - 63	13 - 91	NR-36	NP-15	2-11	11-86	18,9-20,6	6,2-12,6	16-42

As classificações geotécnicas dos solos residuais, cujas propriedades foram coligidas, constam na Figura 5.39. Estes solos residuais são constituídos, essencialmente, por areias bem graduadas, por vezes mal graduadas, com mais ou menos silte. Raramente podem ocorrer solos argilosos, mas quando acontece, deve-se principalmente ao adiantado estado de decomposição dos feldspatos. Na maioria dos casos os solos pertencem aos subgrupos A-1-a da Classificação AASHTO para fins rodoviários, o que reafirma uma vez mais o seu excelente comportamento na camada sob o pavimento.

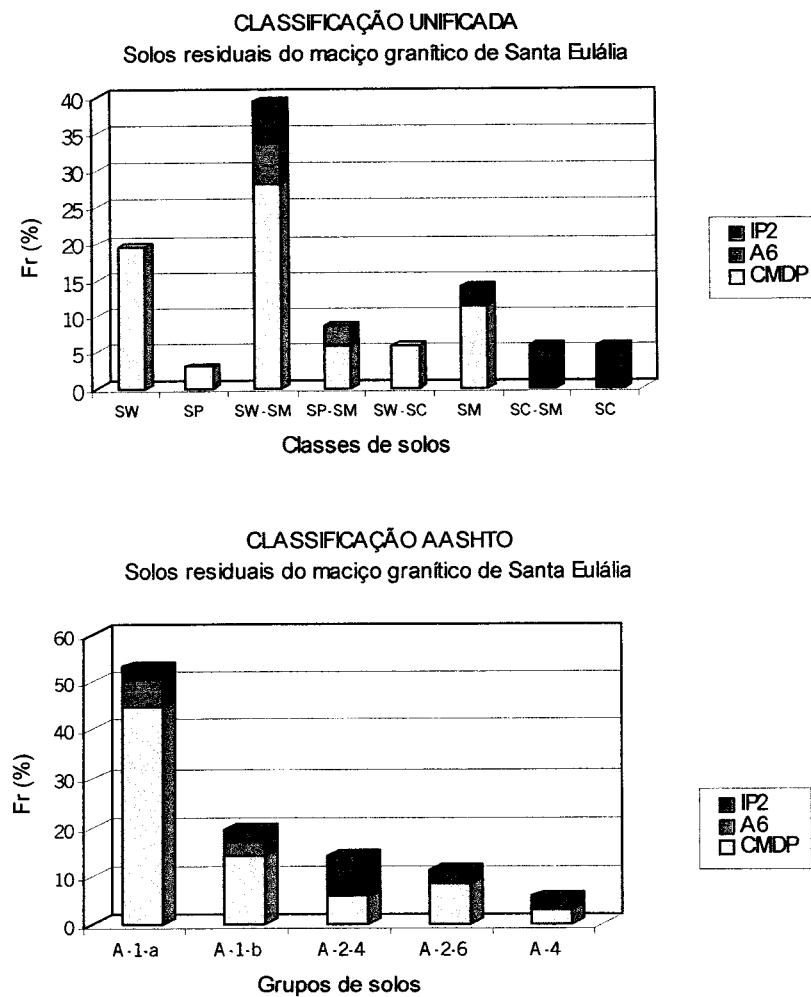


Figura 5.39 – Classificações geotécnicas dos solos residuais graníticos de Santa Eulália.

5.9.2 – Resultados experimentais

Na mancha de solos residuais de granitos do maciço eruptivo de Santa Eulália, foram seleccionados sete locais de amostragem. Dois deles, amostras 20 e 70, pertencem aos solos resultantes da alteração do granito cinzento calco-alcalino, localizado no núcleo do maciço. São solos areno-siltosos, cinzento esbranquiçados ou amarelados, cujos grãos de areia, de dimensões geralmente médias, são predominantemente quartzosos. As amostras foram colhidas em perfis de alteração de reduzida espessura (3 a 4 m), sobrejacentes aos maciços rochosos que lhes deram origem, os quais devido às suas qualidades petrográficas, estão a ser explorados em pedreiras, nos arredores da localidade de Santa Eulália. Os restantes cinco locais de amostragem, situam-se em pedreiras ou saibreiras inseridas na zona periférica da estrutura anelar onde abundam os solos residuais de grão grosso: rosa claro, na zona oeste (amostras 17, 18 e 19), a rosa forte e acastanhado, na zona sudeste (amostra 43 e 47). Trata-se sobretudo de areias grossas, cascalhentas, cujos grãos de maiores dimensões são de feldspato potássico.

As espessuras do solo residual róseo são maiores que as relativas ao solo cinzento, o qual é mais suscetível à alteração, e erosão, e consequentemente, apresenta menores espessuras e

ocorre em áreas aplanadas. Para o efeito, contribui certamente a natureza calco-alcalina do granito cinzento em contraponto ao carácter alcalino do granito róseo.

5.9.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

No fuso granulométrico dos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália (Figura 5.40), é possível distinguir duas populações de solos: uma, corresponde aos solos residuais do granito cinzento calco-alcalino e, segundo as curvas granulométricas que se apresentam a tracejado, são solos essencialmente constituídos por areias médias a finas; outra, respeitante aos solos residuais do granito róseo alcalino, tem as curvas granulométricas desenhadas a cheio, e nelas predominam as areias grossas e seixos finos a médios (Quadro 5.54).

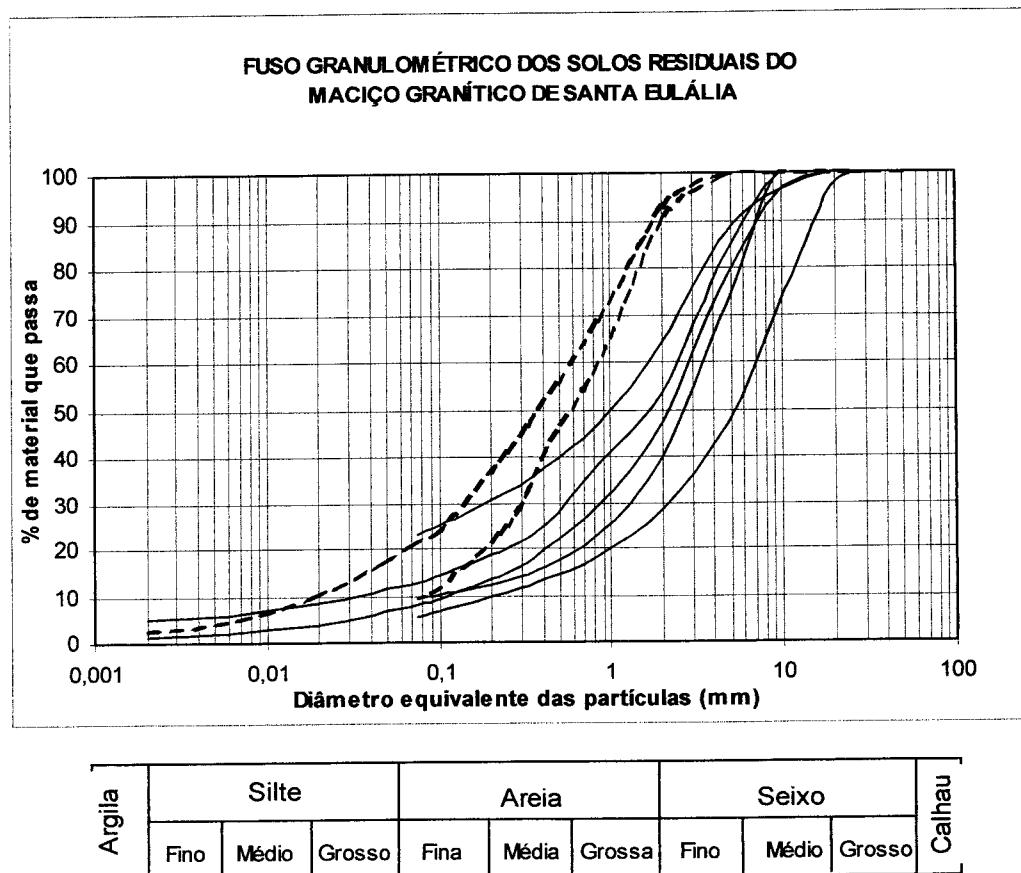


Figura 5.40 – Curvas granulométricas dos solos residuais graníticos de Santa Eulália.

A percentagem de argila, determinada em algumas amostras dos solos residuais estudados, não ultrapassa 5%. No entanto, em certos casos pontuais, esta percentagem pode atingir 10%. A percentagem de “finos” (fracção $< 0,075$ mm) é em geral baixa, ficando aquém de 30%, nos solos amostrados. Esta constatação corrobora as informações dos dados coligidos (Quadro 5.49), excepto casos pontuais que ocorrem no traçado do IP2. É na percentagem de areia que os dois grupos de solos da mancha de Santa Eulália se distanciam mais. Na verdade, nos solos cinzentos, aquele parâmetro varia entre 72 e 80 %, enquanto que nos solos róseos, o intervalo de variação é de 22 a 42 %. Também se nota uma grande diversidade nos coeficientes granulométricos, Cu e Cc , (Quadro 5.50), o que se explica pela presença

predominante de solos mal graduados, ao contrário do que se passa com a maioria dos solos residuais das restantes manchas de solos residuais granítóides estudadas.

Quadro 5.50 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
1 - 5	6 - 22	22 - 80	0,002 - 0,22	11 - 800	1,4 - 11,8	24 - 37	32 - 39	NP-28	NP-14	NP-15
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
24-46	4 - 13	$1,8 \times 10^{-4}$ - $3,3 \times 10^{-5}$	0,04-0,29	24,8 - 26,5	0,98	(- 1,25) - (-17)	2,25 - 18	18 - 28	GP-GM SM SW-SM SP-SM SC	A-1-a A-1-b A-2-4 A-2-6

b) Consistência

A maioria dos solos estudados são não plásticos (NP), ou apresentam uma plasticidade muito baixa ($I_p < 5\%$). No entanto, em ambientes favoráveis e situações casuais, podem ocorrer solos com plasticidade média ($I_p = 14\%$), (Quadro 5.54). De qualquer forma, determinou-se para a amostra 43, uma actividade média (Quadro 5.50), o que significa que apesar da baixa percentagem de argila, a presença desta, influencia efectivamente o comportamento dos solos. A influência dos minerais argilosos no comportamento dos solos, é deveras superior ao das fracções mais grosseiras, pelo que basta uma pequena percentagem de “argila”, para condicionar o comportamento final dos solos reais, no que respeita à plasticidade, expansibilidade, deformabilidade e resistência (Folque, 1996).

Relativamente aos valores obtidos para o índice de liquidez (I_L) e índice de consistência (I_C), mais uma vez se prova que o teor em água no estado natural (w_o), (Quadro 5.54), determinados nestes materiais associados às respectivas características de consistência, remetem-nos para consistências elevadas e susceptibilidade à liquefação praticamente nula. Os valores do limite de retracção (w_R) são próximos dos obtidos para o limite de plasticidade (w_P), o que é comum em materiais predominantemente areno-siltosos.

c) Classificação geotécnica

É de assinalar a diversidade existente nas classificações dos solos residuais dos granitos do maciço eruptivo de Santa Eulália (Quadros 5.50 e 5.54), facto que já foi referido e explicado, na análise dos parâmetros granulométricos destes solos. Todavia, predominam as areias grossas siltosas, bem ou mal graduadas, com mais ou menos cascalho nos solos róseos; e as areias médias a finas, siltosas, bem graduadas, nos solos cinzentos. Através da Classificação AASHTO para fins rodoviários, deduz-se que na generalidade dos casos, estes materiais revelam um excelente desempenho na camada sob o pavimento. Estas conclusões são sustentadas pelos dados coligidos (Figura 5.39).

d) Outras propriedades

Os valores do equivalente de areia (EA), determinados para os solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália, são, normalmente, superiores aos valores obtidos para os solos residuais de granodioritos e quartzodioritos dos maciços eruptivos previamente mencionados, os quais circundam a cidade de Évora. Estes resultados prendem-se naturalmente com a quantidade e qualidade dos “finos” existentes nos solos resultantes da alteração dos diferentes tipos litológicos, assim como com a percentagem da fracção arenosa que é, em regra, superior nos solos de granitos, quando comparada com a mesma percentagem para os solos dos restantes granitóides. Ao contrário, os valores do peso específico das partículas sólidas (γ_s) dos granitos, são, geralmente, inferiores aos dos solos dos restantes granitóides. A causa é atribuída à menor densidade dos minerais principais constituintes dos granitos, em contraposição à maior densidade nos minerais dos granodioritos e quartzodioritos.

O valor mais elevado para a expansibilidade (Exp.), registou-se para a amostra 19, (Quadro 5.54), a qual continha a maior percentagem de “finos” e o maior índice de plasticidade (I_p), verificados para o grupo de amostras seleccionadas na mancha de solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália. Quanto à permeabilidade, esta atinge os maiores valores até agora registados para este parâmetro, excepto a amostra 19, o que significa que os poucos “finos” existentes, não são suficientes para colmatar o trajecto da água por entre os grãos mais grosseiros. Os teores em matéria orgânica (MO), continuam a ser desprezíveis, notando-se, no entanto, um ligeiro aumento deste teor no solo proveniente de uma saibreira bastante antiga (amostra 17), na qual as águas de escorrência poderiam ter transportado alguns complexos orgânicos e depositá-los no seio do solo residual, ao longo dos anos.

5.9.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, foram avaliadas simultaneamente com a amostragem e constam no Quadro 5.51. Os valores do teor em água no estado natural (w_o) determinados nos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália, são os mais baixos até agora registados. Para tal, contribuem, quer as condições climatéricas das semanas em que se efectuaram as determinações, assim como a baixa percentagem de “finos”, condições favoráveis de drenagem e consequentemente fraca capacidade de retenção da água por parte destes solos. Os valores do peso volúmico no estado natural (γ_o) e seco (γ_d), não variam muito. No entanto, refira-se que os menores valores para este último parâmetro, pertencem aos solos mais grosseiros (amostras 43 e 47), aos quais também correspondem os maiores valores do índice de vazios *in situ* (e_o), (Quadro 5.54). Por outro lado, os menores valores para este índice, pertencem aos solos cinzentos, constituídos pelas areias mais finas deste conjunto de amostras.

Quadro 5.51 – Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítico de Santa Eulália.

w_o (%)	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_o	n	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	$w_{ópt}$ (%)
2 - 11	17,1 - 18,3	15,5 - 17,2	0,471 - 0,709	32,0 - 41,5	(I) 18,0 - 18,1 (II) 19,7 - 21,4	(I) 16,3 - 16,5 (II) 6,2 - 10,5

b) Compactação

Com base nos parâmetros de compactação obtidos, peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e teor em água óptimo ($w_{ópt.}$), pode-se inferir a existência de dois grupos de solos nesta mancha (Quadro 5.51). O grupo I, respeitante aos solos cinzentos, de areias mais finas, com valores menores de $\gamma_{dmáx}$ e maiores valores de $w_{ópt.}$. No grupo II, incluem-se os solos róseos grosseiros com valores de $\gamma_{dmáx}$ superiores e de $w_{ópt.}$ bastante mais baixos, comparáveis aos dados coligidos (Quadro 5.49). Neste último grupo, encontram-se materiais com excelentes características de resistência, e deformabilidade reduzida, quando compactados.

5.9.2.3 – Parâmetros de resistência

Nos solos residuais dos granitos de Santa Eulália, não foi possível colher amostras com qualidade suficiente para serem designadas por “indeformadas”, devido à dimensão do grão, à baixa percentagem de “finos” e teores em água *in situ* reduzidos. Neste contexto, optou-se por realizar seis ensaios de corte directo, em amostras remexidas, mas garantindo o teor em água e a densidade dos solos no estado natural, e utilizando uma caixa de corte de 100cm². Os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, constam no Quadro 5.54. Da análise dos valores obtidos, constata-se que todas as amostras apresentam ângulos de atrito superiores a 30°, o que corrobora a ideia de solos residuais resistentes ao corte. Os valores mais baixos para este parâmetro registaram-se nas amostras 20 e 70 de solos cinzentos de grão mais fino. Em relação à coesão, esta apresentou valores nulos para todas as amostras, excepto a amostra 43, que, além de apresentar alguma plasticidade, continha o teor em água natural mais elevado, neste grupo de amostras. Os restantes solos foram ensaiados com teores em água muito baixos e acrescentando o facto de serem amostras remexidas, justifica a ausência de coesão.

Devido às condicionantes na obtenção de amostras indeformadas destes solos, tentou-se, com êxito, colher prismas de solo com dimensões aproximadas de 50×50×50 cm³, os quais foram cuidadosamente envoltos em gaze e parafina, e transportados para o Laboratório de Geotecnia do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. Assim, os provetes da amostra de solo 43, um dos mais grosseiros desta mancha, foram sujeitos ao corte directo numa caixa de corte com uma área de 20×20 cm², e tensões normais de 500, 1000 e 1500 KPa. A recta de Coulomb, obtida para este ensaio, a partir das tensões normais e respectivas tensões de corte máximas, é apresentada na Figura 5.41. O ângulo de atrito ($\phi=38,7^\circ$) obtido no ensaio destes “megaprovetes”, não difere muito do ângulo de atrito determinado nas caixas mais pequenas ($\phi=37,8^\circ$), o que prova que apesar da diferença nas áreas de solo a cortar, 400 e 100 cm², respectivamente, este parâmetro não é influenciado significativamente. Por outro lado, a coesão aumentou consideravelmente, especialmente devido a dois factores: as tensões normais aplicadas nestes “megaprovetes” são substancialmente superiores às tensões aplicadas nos provetes menores; nos provetes maiores ocorrem bastantes minerais, principalmente feldspato potássico, com diâmetros aparentes de 1 e 2 cm, que sendo submetidos a tais forças normais e de corte, sofrem rotura, ou seja, para a coesão total medida, também contribui a coesão intrínseca destes grãos.

É notória uma certa dispersão dos três conjuntos de valores (τ, σ), relativamente à recta de Coulomb; este facto deve-se essencialmente à heterogeneidade textural e mineralógica que, geralmente, patenteiam as amostras indeformadas deste tipo de solos residuais. Esta heterogeneidade é mais relevante em amostras de grandes dimensões, pois no campo, as amostras distanciam-se, necessariamente, umas das outras. Por outro lado, o uso de caixas de

corte de maiores dimensões é mais ajustado para ensaiar solos residuais que apresentam predominantemente, fracções grosseiras, nomeadamente areia e cascalho, uma vez que o volume de amostra ensaiado é maior, e portanto, mais representativo. Para tirar conclusões mais definitivas, seria necessário recorrer a um estudo mais vasto recorrendo a mais amostras com estas dimensões.

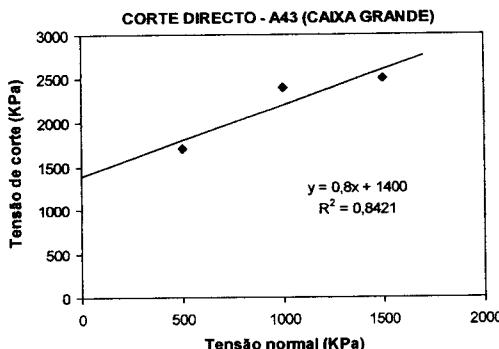


Figura 5.41 – Recta de Coulomb deduzida do ensaio de corte directo em amostras indeformadas com 400 cm^2 de área, nos solos residuais de granitos de Santa Eulália.

5.9.2.4 – Compressibilidade

Foi possível colher uma amostra indeformada, num anel de 50 mm de diâmetro, no solo cinzento de grão fino (amostra 70). Então, realizou-se um ensaio edométrico nessa amostra indeformada, e um segundo ensaio numa amostra deformada, do mesmo tipo de solo, de dimensões iguais.

Através da análise das curvas de compressibilidade (Figura 5.42), é possível verificar-se claramente o ponto de cedência da amostra indeformada, a partir do qual resulta a desestruturação brusca da amostra. Chama-se a atenção para esta quebra das ligações interparticulares que acontece somente para o incremento de tensão de 222,3 para 443,1 KPa, pelo que se determinou uma tensão de pré-consolidação “virtual” ($\sigma'_p = 398\text{ KPa}$), (Quadro 5.53) a mais elevada de todos os solos residuais analisados no presente estudo. Este valor deve-se, principalmente, às características intrínsecas do solo residual deste granito de Santa Eulália, mas também pode ter havido alguma contribuição do atrito lateral oferecido pelas paredes do anel do edómetro ao provete indeformado, enquanto este é sucessivamente carregado. Isto é, em última análise, a perturbação da amostragem, pode ter sido significativa, e este efeito é tanto maior, quanto menor for a amostra, e neste caso utilizou-se um anel com apenas 5 cm de diâmetro. Por outro lado, na curva de compressibilidade da amostra deformada, a redução do índice de vazios concretiza-se de um modo gradual, e o gráfico desenha-se de uma forma suavizada. Nesta comparação de curvas, é evidente a inexistência de ligações interparticulares na amostra deformada.

Em relação aos parâmetros físicos (Quadro 5.52), a amostra indeformada do solo residual do granito cinzento de Santa Eulália, é a que apresenta menor peso volúmico seco inicial (γ_d) e maior índice de vazios inicial (e_0), e consequentemente, insere-se no grupo de solos com maiores valores de índice de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s), registado nos solos residuais de granitos.

A grande variação dos valores dos restantes coeficientes de compressibilidade, para a amostra indeformada, (Quadro 5.53), é sustentada pela considerável diminuição do índice de vazios durante o ensaio, até se atingir a tensão de consolidação máxima. As maiores variações destes coeficientes registaram-se logo no início do ensaio, assistindo-se posteriormente a uma estabilização desse gradiente, a partir do terceiro escalão, com uma diminuição mais suave dos valores, pelo que aquela discrepância inicial pode dever-se, além do elevado e_0 , a problemas de ajustamento do aparelho de ensaio.

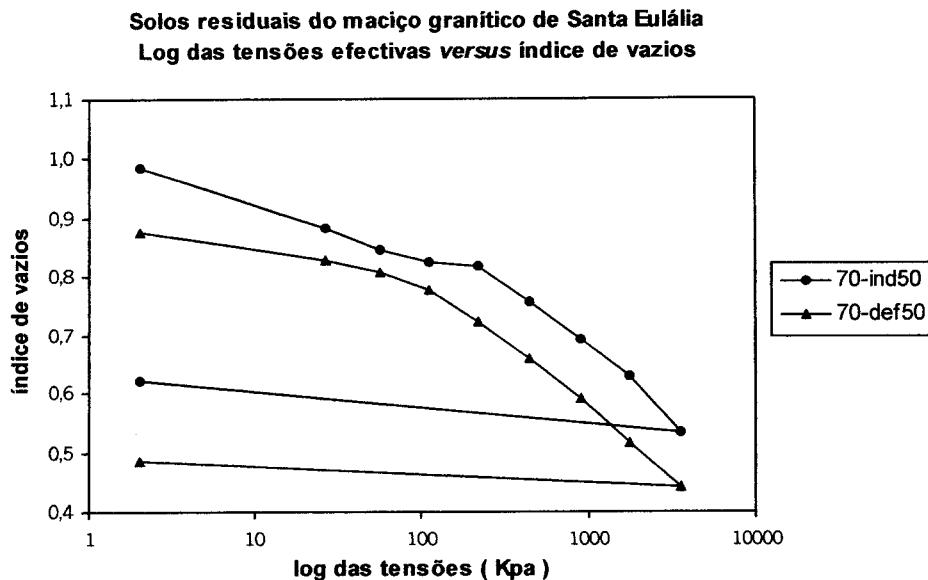


Figura 5.42 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos em duas amostras, indeformada e deformada, de solo residual do maciço granítico de Santa Eulália.

Quadro 5.52 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada e outra deformada de um solo residual do maciço granítico de Santa Eulália.

Amostras	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_0 (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	W_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	W_f (%)
70-ind50	14,32	13,32	0,984	9,4	25,3	0,533	0,620	21,5
70-def50	15,59	13,83	0,876	12,9	38,8	0,439	0,486	16,4

Quadro 5.53 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico do solo residual cinzento do maciço granítico de Santa Eulália.

Amostras	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	m_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	c_v (10^{-8} m ² /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
70-ind50	41,7 - 0,5	20,9 - 0,32	5,57 - 1,46	2,33 - 0,05	398	0,31	0,03
70-def50	17,7 - 0,4	9,45 - 0,28	7,13 - 1,06	1,99 - 0,03		0,26	0,01

Quadro 5.54 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE SANTA EULÁLIA.

SOLOS		17	18	19	20	43	47	70
LOCALIZAÇÃO		Mon-forte 1	Mon-forte 2	Mon-forte 3	St ^a . Eulália 1	Chacins	Barbacena	St ^a . Eulália 2
DESCRÍÇÃO		Areia mal graduada com silte e cascalho rosa.	Areia bem graduada com silte e cascalho rosa.	Areia argilosa com cascalho rosa.	Areia bem graduada com silte, cinzenta clara.	Areia siltosa com cascalho rosa escuro.	Casca-lho mal gradua-do com areia e silte, rosa.	Areia siltosa, cinzen-ta amare-lada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	W _o (%)	6,2	6,6	5,5	1,8	10,3	11,0	1,8
	γ _o (KN/m ³)	18,14	18,34	17,55	17,16	17,06	17,85	17,36
	γ _d (KN/m ³)	17,06	17,16	16,67	16,87	15,50	16,08	17,06
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	72,28	78,10	87,69	99,98	83,4	46,97	100
	< 2,00 mm	40,04	47,35	64,45	90,10	53,6	28,62	92,81
	< 0,425mm	15,98	20,04	37,86	41,18	25,2	13,51	52,04
	< 0,075mm	9,40	8,21	22,86	9,88	12,9	5,63	21,13
	< 0,002mm		1,36			5,12		2,37
LIMITES DE ATTERBERG	w _L (%)	24	25	37	24	30	29	27
	w _{Lc} (%)	32	33	38	36	37	35	39
	w _P (%)	--	--	23	--	25	28	27
	I _P (%)	NP	NP	14	NP	5	1	0
	I _{Pc} (%)	NP	NP	15	NP	12	7	12
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SP- SM	SW- SM	SC	SW- SM	SM	GP-GM	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-a	A-1-a	A-2-6 (0)	A-1-b	A-1-b	A-1-a	A-2-4
COMPACTAÇÃO	γ _d máx. (KN/m ³)	19,71	21,38	20,01	18,14	20,30	20,10 (m)	17,95
	W _{ópt} . (%)	10,5	7,5	10,2	16,5	9,6	6,2	16,3
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	37	40	24	46	41	46	32
MATERIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,29	0,07	0,04	0,08	0,10	0,12	0,07
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	7,6	6,8	13,3	5,2	4,1	8,4	7,6
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$1,8 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-5}$		$5,4 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$
PÉSOS ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ _s (KN/m ³)	25,99	26,18	25,99	24,81	26,48	26,09	25,89
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e _o	0,523	0,526	0,559	0,471	0,709	0,622	0,517
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	34,3	34,5	35,8	32,0	41,5	38,3	34,1
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	36,5	36,1	35,8	33,8	37,8		32,0
	c (KPa)	0	0	0	0	6,17		0
EDOMÉTRICO	C _c							0,31
	C _s							0,03

5.10 – Solos residuais do maciço granítico de Elvas

A leste de Elvas aflora um granito cinzento, biotítico, de grão grosso a médio, por vezes porfiróide (Gonçalves *et al.*, 1970). A área aflorante é uma das mais reduzidas dos maciços estudados, aproximadamente 16 Km², mas apesar disso, este maciço apresenta alguma variedade química, mineralógica e textural (Cap. 3). Em certos locais estas rochas evidenciam bastante deformação e fracturação.

A heterogeneidade patente nas formações rochosas, reflecte-se na natureza dos solos residuais resultantes da sua alteração. Assim, enquanto em alguns locais ocorrem solos essencialmente areno-siltosos, cinzentos, amarelados ou acastanhados, outros predominam os siltes arenosos praticamente brancos com ténues manchas cinzentas, pois neste caso possuem poucos minerais maficos.

Embora se trate de uma zona aplanada, com algumas “bolas” de granito expostas, a espessura de solo residual é reduzida. Seleccionaram-se dois locais em que a profundidade de amostragem não ultrapassou um metro. São solos com pouca coesão, de onde se destacam os grãos mais resistentes à alteração, quartzosos, de forma irregular, que se encontram disseminados numa matriz siltosa, resultante da meteorização de minerais como o feldspato potássico, plagioclase, biotite em grande parte cloritizada, esfena, etc.

5.10.1 – Dados compilados

Esta pequena mancha de solos residuais do granito de Elvas é atravessada, entre outras, por uma obra rodoviária, o IP7-EN4 – Elvas-Fronteira do Caia (JAE, 1987), numa extensão de 10 Km. O autor do estudo geológico-geotécnico refere grande espessura de solos residuais, quase não havendo afloramentos ao longo do traçado. De qualquer modo, seleccionaram-se apenas duas amostras pertencentes à referida mancha, cujos resultados dos ensaios laboratoriais constam no Quadro 5.55.

Quadro 5.55 – Características coligidas relativas aos solos residuais do granito de Elvas.

Amostra	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	Ip (%)	EA (%)	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	W _{ópt} (%)	CBR (95%)	Classificação	
	# 200	# 40	# 10							AASHTO	Unificada
S1	19	60	93	26	NP	32	20,3	9,5	24	SM	A-2-4
S2	13	33	66	NR	NP	25				SM	A-1-b

Embora as amostras tenham sido colhidas em locais distintos, as propriedades expostas não diferem muito; pelo contrário, ambos os solos são areno-siltosos (SM), com comportamento não plástico, e valores de equivalente de areia pouco afastados. As características de compactação e a Classificação AASTHO, sugerem tratar-se de materiais com aptidão para a construção de aterros e leitos de pavimentos, como aliás se veio a comprovar pela sua utilização, para esses mesmos fins, na referida obra rodoviária.

5.10.2 – Resultados experimentais

Como já foi mencionado, a representatividade espacial dos solos residuais do granito de Elvas é reduzida, em extensão e em espessura, pelo que foi possível seleccionar apenas dois

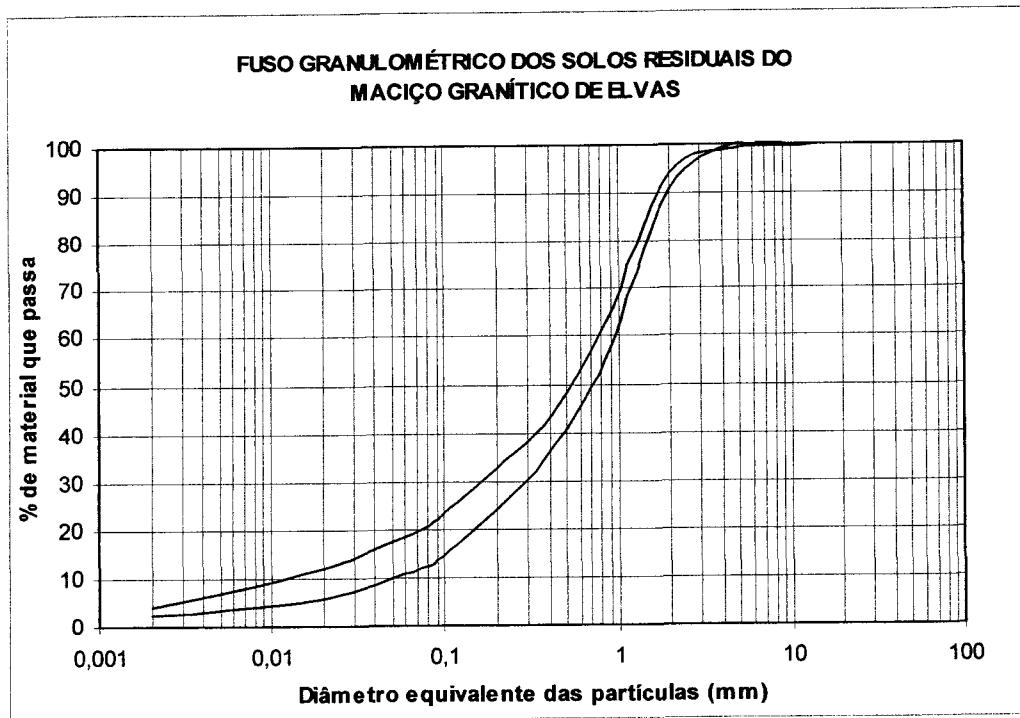
locais onde o solo residual se encontrava exposto: a amostra 68, no local da Padeira, onde foi possível colher solo num talude de escavação de uma estrada camarária, e a amostra 69, que foi colhida numa saibreira de pequenas dimensões nas imediações da Torre da Sé.

A amostragem remexida foi relativamente fácil de realizar, porque o solo encontrava-se praticamente “solto”, devido à fraca coesão entre as partículas mais grosseiras. Por esse mesmo motivo, não foi possível concretizar a amostragem indeformada, com a agravante de o teor em água no estado natural (w_0), no dia da colheita, ser reduzido (Quadro 5.57) e, desse modo, contribuir decisivamente para a ineficácia da tarefa.

5.10.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das amostras dos solos residuais do granito de Elvas, patenteadas na Figura 5.43, referem-se a materiais com distribuições semelhantes das fracções granulométricas. Assim, ambos os solos são bem graduados, com uma percentagem de areia elevada (Quadro 5.56), predominantemente constituída por areia grossa ($> 40\%$). A percentagem de “finos” está em conformidade com os dados coligidos e a fracção argilosa é diminuta.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.43 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítico de Elvas.

Quadro 5.56 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Elvas.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{LC} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{PC} (%)
2 - 4	10 - 16	74 - 79	0,01 - 0,05	19 - 59	1,9 - 2,6	27 - 33	29 - 37	24 - 29	3 - 4	5 - 8
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ _s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
45-46	11	9,6×10 ⁻⁵ - 2,2×10 ⁻⁴	0,31-0,33	25,8	0,71 - 1,62	(- 6,05) - (-6,37)	7,05 - 7,37	23 - 28	SM	A-1-b

b) Consistência

Apesar da reduzida percentagem de argila, os solos apresentam alguma plasticidade, o que confere ao solo da amostra 68, propriedades de um solo activo enquanto o solo da amostra 69 é pouco activo. Os valores elevados do índice de consistência (I_C) e os reduzidos valores do índice de liquidez (I_L), explicam-se pelo facto do teor em água natural (w_o) destes solos ser muito baixo, facto que aliado a um índice de plasticidade (I_P) também baixo, afasta qualquer hipótese do solo entrar em liquefação.

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítico de Elvas corroboram a homogeneidade destes solos, bem patente nas propriedades de identificação dos mesmos, e confirmam os dados coligidos. São materiais areno-siltosos (SM) e pertencem ao subgrupo A-1-b da Classificação AASHTO para fins rodoviários.

d) Outras propriedades

Em relação às restantes propriedades determinadas para os solos residuais do maciço granítico de Elvas e expostas no Quadro 5.56, verifica-se uma grande concordância entre os valores registados para as duas amostras que os representam. Salienta-se a analogia dos resultados de ensaios como: equivalente de areia (EA), expansibilidade (Exp.), permeabilidade (k), peso específico das partículas sólidas (γ_s) e teor em matéria orgânica (MO). No que se refere a este último parâmetro, o valor registado para os solos residuais do granito de Elvas, foi o mais elevado de todos os solos residuais estudados, o que certamente está relacionado com o facto das suas amostras terem sido colhidas a menos de um metro de profundidade, ou seja estes solos estavam mais acessíveis às águas de infiltração que transportam elementos orgânicos da superfície e os vão depositando nas camadas mais superficiais dos solos. De qualquer forma, o teor determinado não deve influir nas propriedades geomecânicas principais. Apenas a expansibilidade pode ser ligeiramente majorada.

5.10.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, constam no Quadro 5.57. Salienta-se a parecenza entre as duas amostras, no que respeita a estas propriedades. Os valores reduzidos do teor em água no estado natural (w_o), estão naturalmente relacionados com as condições climatéricas na altura da colheita, com a facilidade de drenagem e com a forte evaporação a que as camadas superficiais dos solos alentejanos estão sujeitos, quando o sol é intenso. O peso volúmico seco *in situ* (γ_d) é relativamente baixo, característica dos solos resultantes da alteração de granitos alcalinos, que possuem uma estrutura relativamente aberta.

b) Compactação

O peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e o respectivo teor em água óptimo ($w_{ópt.}$), foram obtidos a partir do ensaio de compactação do tipo Proctor normal (Quadro 5.57). Os valores coligidos para os mesmos parâmetros (Quadro 5.55) foram obtidos a partir do Proctor modificado. É notório o afastamento entre os resultados, pelo que se conclui que para estes solos residuais do granito Elvas, essencialmente constituídos por areia grossa quartzosa, com coesão praticamente inexistente, é recomendável o uso da compactação pesada ou mesmo compactação por vibração, para se atingir melhores resultados no que concerne à diminuição do índice de vazios e consequente diminuição da deformabilidade e aumento da resistência.

5.10.2.3 – Parâmetros de resistência

Como não foi possível obter amostras indeformadas com qualidade aceitável nos solos residuais do maciço granítico de Elvas, decidiu-se realizar dois ensaios de corte directo em amostras remexidas colhidas nos locais seleccionados. O procedimento utilizado nos ensaios foi idêntico ao seguido para as amostras remexidas dos restantes solos residuais estudados.

Os parâmetros de resistência ao corte (ϕ e c), constantes no Quadro 5.57, revalidam uma vez mais a constância das propriedades mecânicas nos solos em estudo. A coesão é nula, apesar de se ter aumentado o teor em água para $w_i = 10\%$; o ângulo de atrito ($35,7^\circ < \phi < 36^\circ$) é comum em solos arenosos ($33^\circ < \phi < 45^\circ$).

5.10.2.4 – Compressibilidade

Não se efectuou ensaio edométrico nas amostras de solos residuais do maciço granítico de Elvas, devido à dificuldade na obtenção de amostras indeformadas.

Quadro 5.57 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE ELVAS.

SOLOS		68	69
LOCALIZAÇÃO		Padeira	Torre da Sé
DESCRIÇÃO		Areia siltosa, branca acinzentada.	Areia siltosa, cinzenta amarelada.
PROPRIEDADES FÍSICAS “IN SITU”	w_o (%)	4,8	4,9
	γ_o (KN/m ³)	17,16	17,85
	γ_d (KN/m ³)	16,28	16,97
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	100	99,0
	< 2,00 mm	90,8	94,1
	< 0,425mm	37,4	44,5
	< 0,075mm	12,1	19,9
	< 0,002mm	2,47	4,24
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	33	27
	w_{Lc} (%)	37	29
	w_P (%)	29	24
	I_P (%)	4	3
	I_{Pc} (%)	8	5
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SM	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-1-b
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{d \text{ máx.}}$ (KN/m ³)	18,14	18,25
	W _{opt.} (%)	13,6	12,2
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	45	46
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,31	0,33
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	10,6	10,5
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$2,2 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-5}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	25,79	25,79
ÍNDICE DE VAZIOS “IN SITU”	e_o	0,584	0,520
POROSIDADE “IN SITU”	n (%)	36,9	34,2
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	35,7	36
	c (KPa)	0	0

5.11 – Solos residuais do maciço granítico do Vimieiro

O maciço granítico do Vimieiro ocorre numa área relativamente grande, sensivelmente de 350 Km², de orientação geral E -W, com limites próximo das povoações de Vimieiro, Pavia, S. Gregório, Ciborro e Brotas. Trata-se, geralmente, de granitos grosseiros a médios, porfiróides, biotíticos, de composição calco-alcalina e frequentemente associados a pegmatitos (Zbyszewski *et al.*, 1980). Este granito de duas micas, essencialmente biotítico, apresenta megacristais de feldspato potássico, branco ou rosado. A textura é hipidiomórfica-granular, por vezes com vestígios de deformação. A fracturação é uma constante, principalmente no lado oeste.

As formações graníticas do maciço do Vimieiro apresentam variações de fácies ao longo da extensa área em que afloram, o que consequentemente se repercute na vasta gama de texturas evidenciadas nos respectivos solos residuais. Assim, na periferia do maciço, do lado leste, junto a Vimieiro, o granito é grosseiro a médio de duas micas, pelo que resulta dele um solo arenoso bem graduado; no centro, junto a S. Gregório, o granito é de grão grosseiro, porfiróide, intimamente associado a pegmatitos, pelo que resultam dele solos mal graduados com forte componente (> 50 %) de seixo; no lado oeste, junto a Sabugueiro, o granito é de grão médio, biotítico, por vezes porfiróide, tectonizado, com nítida foliação, originando uma areia fina silto-argilosa. A cor dos solos é muito variada ocorrendo, essencialmente, os tons de cinzento e amarelo, passando por castanho, rosa, branco, etc. Trata-se de solos com alguma coesão, pois admitem taludes verticais, os quais em casos particulares ultrapassam os 10 m de altura.

5.11.1 – Dados compilados

No âmbito do estudo dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro foi consultada a Carta de Materiais do Distrito de Évora – CMDE (JAE, 1980a). Os resultados aí coligidos dizem respeito aos ensaios efectuados em 10 amostras destes solos e constam no Quadro 5.58. Acerca destes dados, é de salientar que a percentagem de “finos” é sempre inferior a 20 %, e que dos 10 solos analisados, 9 possuem comportamento não plástico, apresentando apenas um solo, colhido na Gafanhoeira junto a Sabugueiro na zona oeste do maciço, um índice de plasticidade (I_p) de 18%.

Quadro 5.58 – Características coligidas dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.

Estudo	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	I_p (%)	EA (%)
	# 200	# 40	# 10			
CMDE	5 - 19	12 - 42	29 - 86	NR - 41	NP - 18	26 - 65

Relativamente à Classificação Unificada dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro, (Figura 5.44), é notória a diversidade de classes inerente aos mesmos e reflexo da sua heterogeneidade geotécnica, sustentada pela já referida variedade textural dos solos estudados. No que respeita à Classificação AASTHO para fins rodoviários, predominam os solos do grupo A-1, com excepção do solo colhido mais a oeste do maciço, o único com plasticidade média.

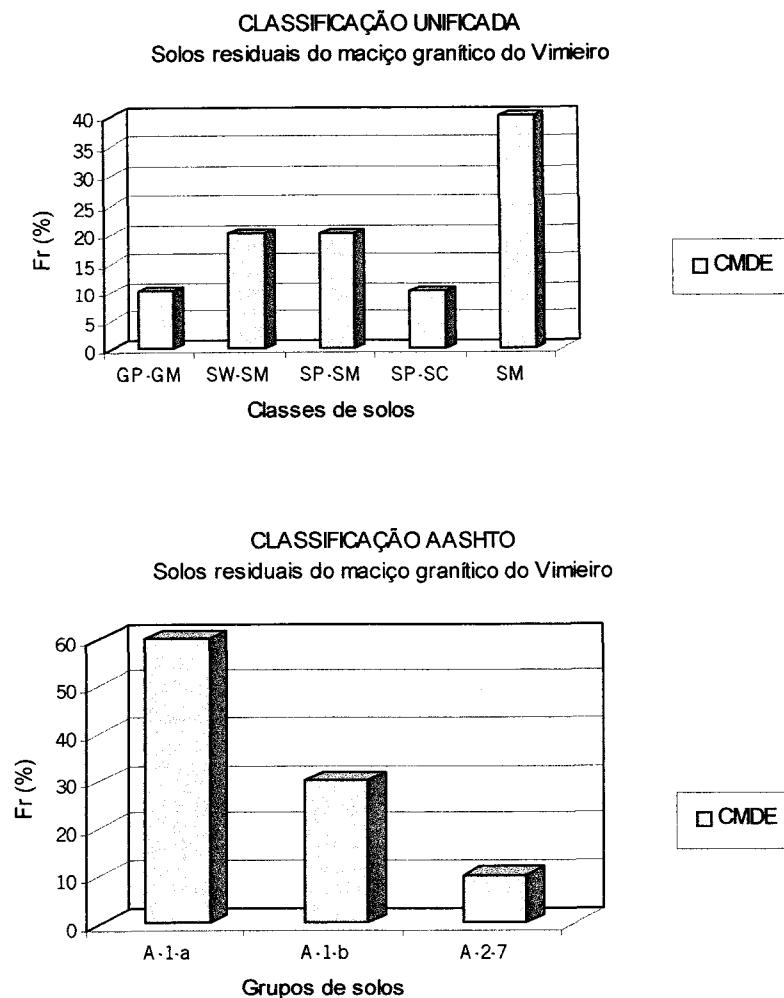


Figura 5.44 - Classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.

5.11.2 – Resultados experimentais

Na selecção de locais de prospecção e amostragem dos solos residuais estudados, houve a preocupação de abranger o mais possível a vasta área onde ocorrem estes solos, assim como as principais variedades texturais dos mesmos. Deste modo, consideram-se cinco locais de amostragem: dois deles na zona leste do maciço (amostras 41 e 42); dois na zona central (amostras 40 e 45); e a amostra 46 na parte ocidental da mancha.

Todas as amostras foram colhidas em pedreiras em exploração ou abandonadas, excepto a amostra 45, a mais grosseira de todas, que foi recolhida nos taludes de escavação, do aterro sanitário de Arraiolos, os quais se mantinham verticais com uma altura superior a 10 m e extensão além dos 100 m.

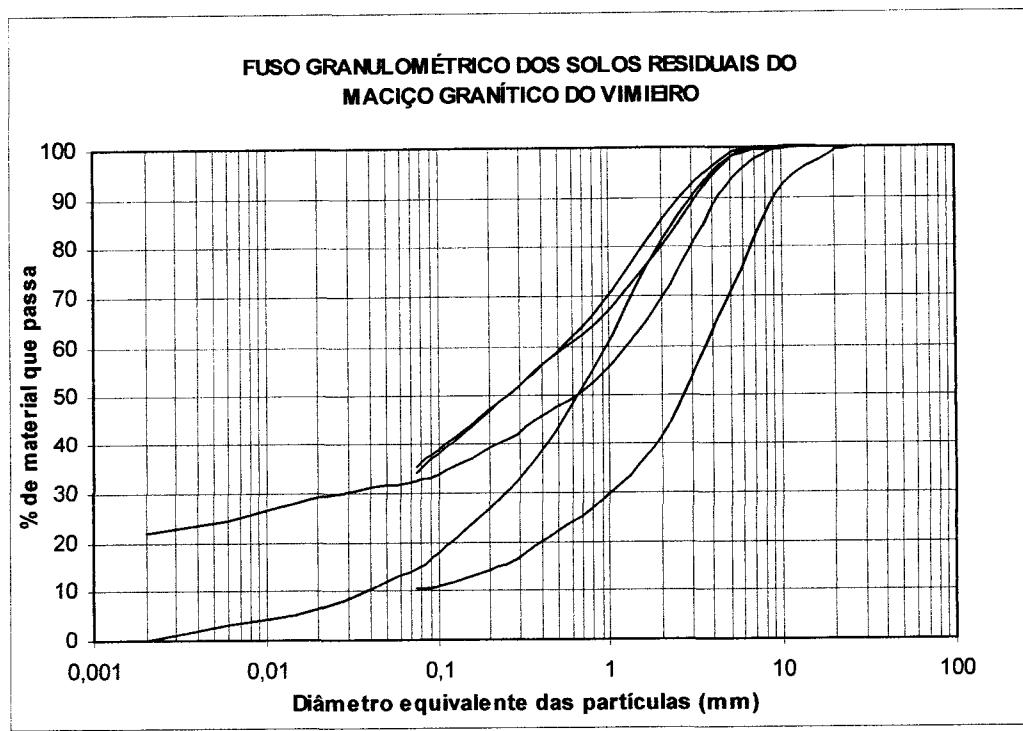
5.11.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

O fuso granulométrico, respeitante às amostras analisadas, é apresentado na Figura 5.45. No topo do fuso, as curvas granulométricas dos solos 40 e 42, são praticamente coincidentes e

pertencem a solos residuais jovens, de cor cinzenta clara, situados logo acima do maciço rochoso e que sofreram ainda pouca lixiviação, por isso são os que apresentam maior percentagem de “finos”. Logo a seguir está a curva do solo residual jovem, amostra 46, cinzento claro, mal graduado e com uma grande percentagem de argila (22%) relativamente a outros solos residuais deste tipo. Chama-se a atenção para a curva do solo 41, que apesar de ser colhido próximo do solo 42, pertence a um nível de alteração superior, situado por baixo do solo orgânico, ou seja trata-se de um solo residual maduro, bem graduado, amarelado, que já sofreu forte lixiviação, resultando daí uma considerável perda de “finos”, (Quadro 5.63). Por fim, a curva correspondente ao solo 45, mal graduado, o mais grosseiro de todos, com uma percentagem de cascalho superior a 30 % e percentagem de “finos” inferior a 11 %, evidenciando forte lixiviação e coloração variável.

Pela análise dos parâmetros granulométricos expostos no Quadro 5.59, verifica-se que os intervalos de variação dos respectivos valores são consideráveis, o que vem reforçar a ideia de uma significativa variedade textural inerente a estes solos.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Caihau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.45 - Fuso granulométrico dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.

b) Consistência

Relativamente aos limites de consistência e respectivos índices, nota-se uma grande dispersão (Quadro 5.59). Por exemplo, existem solos de comportamento não plástico ou de baixa plasticidade, mas o solo da amostra 46 possui um índice de plasticidade, $I_p = 30\%$, (alta plasticidade). É de salientar que a amostra deste solo foi colhida junto a Sabugueiro, local próximo da Gafalhoeira, de onde provem a única amostra com plasticidade, constante

nos dados coligidos (ver 5.11.1), situando-se ambas no extremo ocidental do maciço granítico do Vimieiro. A referida amostra é também a única em que foi possível determinar actividade coloidal ($Ac = 1,37$).

Em relação aos valores do limite de liquidez (w_L) determinados nos solos estudados, nota-se uma maior uniformidade nos valores obtidos através do cone penetrométrico BS, quando comparados com os valores obtidos com a Concha de Casagrande. Esta situação explica-se pelo facto de para os valores mais altos deste limite (Quadro 5.63), o método do cone ser mais conservativo, passando-se o inverso para os valores mais baixos do referido limite.

Quadro 5.59 - Características gerais dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D_{10}	Cu	Cc	w_L (%)	w_{Lc} (%)	w_P (%)	I_p (%)	I_{pc} (%)
2 - 22	8 - 20	31 - 67	0,001 - 0,06	26 - 1300	0,69 - 4,6	27 - 63	37 - 61	NP-33	NP-30	NP-28
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I_L (%)	I_C (%)	w_R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
18-53	5 - 25	$4,8 \times 10^{-7}$ - $1,7 \times 10^{-5}$	0,01 - 0,22	25,7 - 26,4	1,37	(- 0,44) - (-2,38)	1,16 - 3,38	18 - 30	SM SP-SM SC-SM SC	A-1-b A-2-4 A-2-7 A-6

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas dos solos mencionados confirmam a grande variedade nos valores dos parâmetros geotécnicos característicos dos mesmos (Quadro 5.59). A correspondência entre as duas classificações, Unificada e AASHTO, pode ser confirmada no Quadro síntese 5.63.

d) Outras propriedades

No que concerne ao equivalente de areia (EA), também se registou alguma dispersão. Nota-se que este parâmetro é mais influenciável pela qualidade dos “finos” e não tanto pela sua quantidade. Isto pode-se comprovar, se compararmos o EA = 53% da amostra 41, não plástica, com o EA = 35% da amostra 45, a mais grosseira de todas e com menos “finos”, mas com um $I_p = 10\%$, e finalmente com o EA = 18% da amostra 46, com um $I_p = 30\%$, (Quadro 5.63). Quanto à expansibilidade, destaca-se o valor da amostra 46 (Exp. = 25%), que é bastante significativo e mais do dobro da expansibilidade dos restantes solos residuais. Chama-se a atenção que o solo em causa é o que apresenta maior I_p , menor EA e cuja análise mineralógica (Cap.4), evidenciou a maior intensidade do pico ou máximo de difracção (001) da esmectite.

Relativamente à permeabilidade (k), os valores obtidos, para além de pertencerem a um intervalo de valores superior à maioria das manchas de solos residuais, traduzem para os solos estudados uma permeabilidade média a baixa. O valor mais baixo para este parâmetro pertence à amostra 46, a mais argilosa. A percentagem de “finos” é, nestes solos, significativa, mais de 30% em três deles, comparativamente com outros solos resultantes de granítóides. Assim, as partículas finas vão colmatando gradualmente os vazios entre os grãos mais grosseiros, quando se processa a circulação de água.

No que respeita ao peso específico das partículas sólidas (γ_s), a variação dos valores é reduzida (Quadro 5.59), porque apesar da já referida, e considerável variedade textural, os aspectos químicos e mineralógicos são análogos, logo a densidade dos minerais é semelhante e reproduz de certa forma, a natureza da rocha de origem, assim como a evolução/alteração que esta sofreu.

Finalmente, relativamente aos teores em matéria orgânica (MO), pode-se inferir que as amostras mais argilosas, retêm uma quantidade superior de MO (Quadro 5.63).

5.11.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

No que se refere às propriedades físicas determinadas *in situ*, cujo intervalo de valores consta no Quadro 5.60, há a salientar, que os valores do teor em água que os solos possuíam no campo, são na generalidade superiores aos comumente determinados para os solos residuais de granítóides. Este facto deve-se, naturalmente, além das condições meteorológicas que precederam a ocasião da colheita, a uma mais elevada percentagem de “finos”, evidenciada na maioria destes solos residuais (Quadro 5.63). Destaca-se deste conjunto de solos, a amostra 45, que é a mais grosseira, com menos percentagem de “finos”, e que apresenta simultaneamente o menor teor em água no estado natural (w_o) e o menor peso volúmico seco *in situ* (γ_d); logicamente também é o solo com maior índice de vazios *in situ* (e_o) e porosidade (n) no campo.

Quadro 5.60 - Propriedades físicas dos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro.

w_o (%)	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_o	n	$\gamma_{dmáx}$ (KN/m ³)	$w_{ópt}$ (%)
6 - 20	16,2 - 20,0	15,3 - 17,2	0,514 - 0,705	34,0 - 41,4	17,0 - 20,0	9,8 - 14,4

b) Compactação

Com base nos parâmetros de compactação, ($\gamma_{dmáx}$) e ($w_{ópt}$), constantes nos Quadros 5.60 e 5.63, pode-se verificar que a amostra 41 se destaca do conjunto, pelas melhores características de compactação, sendo simultaneamente o melhor solo do ponto de vista geotécnico, maior valor de equivalente de areia e comportamento não plástico. Os restantes solos demonstram características próximas entre si, apresentando a amostra 46, com mais “finos”, o maior ($w_{ópt}$), como seria de esperar e pelas razões já referidas noutros subcapítulos.

5.11.2.3 – Parâmetros de resistência

Nos solos residuais do maciço granítico do Vimieiro, houve dificuldades na colheita de amostras indeformadas com qualidade aceitável, pelo que se optou pela realização de quatro ensaios de corte directo em amostras remexidas, com uma área de 100 cm². Os valores dos parâmetros de resistência, ϕ e c , relativos a estes ensaios, constam no Quadro 5.63. Pela análise destes resultados, conclui-se que todas as amostras evidenciam coesão, sendo a amostra 46, a mais argilosa, a que apresenta o maior valor para este parâmetro. Por outro lado, é também nesta amostra, que foi registado o menor ângulo de atrito, relativamente a todos os solos residuais de granítóides, analisados. Esta situação reflecte a grande influência

que a fracção argilosa desempenha no comportamento distorcional dos solos em geral, e nos solos residuais em particular.

Com o objectivo de obter amostras indeformadas de grandes dimensões, no solo mais grossoiro da mancha granítica do Vimieiro (amostra 45), parafinaram-se “blocos” de solo com dimensões aproximadas de $50 \times 50 \times 50$ cm³. Os provetes retirados destes blocos, foram submetidos ao ensaio de corte directo, numa caixa de corte com 400 cm² de área e tensões normais de 500, 1000 e 1500 KPa. A recta de Coulomb, obtida a partir das tensões normais e respectivas tensões de corte máximas, consta na Figura 5.46.

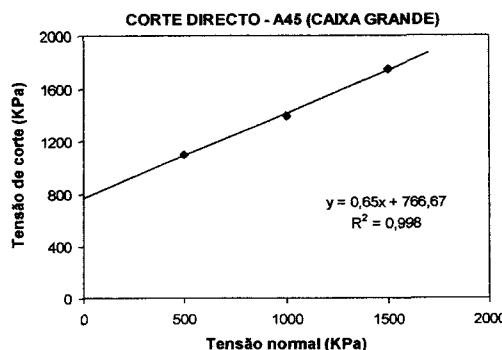


Figura 5.46 – Recta de Coulomb deduzida do ensaio de corte directo em provetes indeformados com 400 cm² de área em solos graníticos do Vimieiro.

O ângulo de atrito ($\phi = 33,0^\circ$) determinado a partir da caixa de grandes dimensões, é inferior ao obtido na caixa de 100 cm² ($\phi = 39,2^\circ$); o inverso se passa com os correspondentes valores de coesão, $c = 0,767$ MPa e $c = 10,1$ KPa, respectivamente. Acerca destes resultados, há que ressalvar o facto das tensões normais serem manifestamente diferentes, e apesar dos provetes ensaiados terem sido colhidos no mesmo local, existe uma certa não uniformidade lateral e vertical registada nestes perfis de solos residuais, o que naturalmente se reflecte nas características de resistência. Contudo, é interessante verificar a evidência de linearidade, nos três conjuntos de valores (τ, σ), patente na Figura 5.46, o que não se verificou no ensaio referente ao solo da amostra 43 (Figura 5.41), pertencente ao maciço granítico de Santa Eulália, efectuado com o mesmo aparelho e com iguais dimensões de provetes.

5.11.2.4 – Compressibilidade

Dos cinco locais de amostragem, apenas num deles foi possível colher amostra indeformada (amostra 41). Assim, para além da realização do ensaio edométrico em amostra indeformada com 99 mm de diâmetro, decidiu-se realizar mais dois ensaios em amostras deformadas do mesmo solo, mas com diâmetros diferentes, 50 e 99 mm, para investigar a influência do tipo e tamanho da amostra nas características de compressibilidade destes solos. Os parâmetros iniciais e finais dos provetes ensaiados, constam no Quadro 5.61, enquanto as características de compressibilidade dos referidos provetes figuram no Quadro 5.62.

Analizando as curvas de compressibilidade patentes na Figura 5.47, constata-se que no ensaio da amostra indeformada, a quebra de ligações interparticulares e o consequente aumento dos assentamentos devido ao incremento de tensão, se processa apenas a partir do 4º escalão de carga. Isto significa que o solo manteve-se estruturado até à referida carga, e quando se deu o incremento de tensão vertical de 183,1 para 365,8 KPa, o solo começou a

desestruturar-se, o que está de acordo com a tensão de pré-consolidação “virtual” ($\sigma'_p = 224$ KPa). Em relação à curva da amostra deformada de maior diâmetro, 41def99, verifica-se que os assentamentos, se dão logo a partir do 1º escalão, e sucedem-se gradualmente até ao fim do carregamento. Note-se que esta amostra iniciou o ensaio com um índice de vazios considerado elevado (Quadro 5.61). Por fim, na curva de compressibilidade correspondente à amostra deformada de menor diâmetro, 41d50, nota-se uma redução brusca do índice de vazios, logo no início do ensaio, mais precisamente no 2º escalão, seguida de uma redução mais suave deste índice, no escalão seguinte. Estes reajustamentos iniciais, devem-se possivelmente a adaptações da amostra ao aparelho, e são mais evidentes em amostras pequenas.

Solos residuais do maciço granítico do Vimieiro
Log das tensões efectivas versus índice de vazios

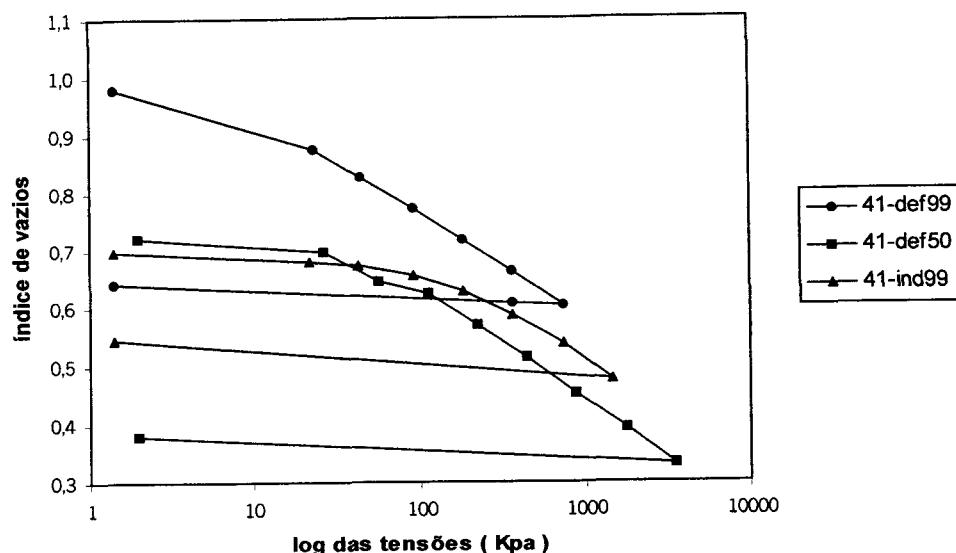


Figura 5.47 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos realizados em amostras de um solo residual do maciço granítico do Vimieiro.

Quadro 5.61 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada e duas deformadas de um solo residual do maciço granítico do Vimieiro.

Amostras	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	w_f (%)
41-ind99	17,37	15,20	0,695	14,4	54,1	0,476	0,544	20,6
41-def99	15,00	12,94	0,981	16,0	42,7	0,602	0,642	18,7
41-def50	16,57	14,91	0,719	10,6	38,5	0,331	0,379	16,6

Relativamente aos valores do índice de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s), constantes no Quadro 5.62, estes apresentam uma certa uniformidade de valores, apesar das diferentes condições físicas e de amostragem, iniciais; pelo que se deduz que neste caso

prevalecem as características intrínsecas do solo, ou seja idêntico nos três ensaios, ao invés das condicionantes físicas e de amostragem.

No que se refere aos coeficientes de compressibilidade é visível uma variação muito maior ao longo do ensaio nas amostras deformadas relativamente às amostras indeformadas (Quadro 5.62), o que é causado pela deformação das amostras. Uma vez mais é evidente a dependência que estes coeficientes demonstram em relação ao índice de vazios inicial.

Quadro 5.62 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico em amostras de um solo residual do maciço granítico do Vimieiro.

Amostras	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	m_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	c_v (10^{-8} m 2 /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
41-ind99	4,7 - 0,8	2,76 - 0,54	8,06 - 3,85	2,23 - 0,22	224	0,21	0,02
41-def99	51,6 - 1,6	25,9 - 0,99	56,11 - 0,96	154,2 - 0,1		0,20	0,02
41-def50	9,9 - 0,4	5,76 - 0,25	19,07 - 1,04	11,13 - 0,03		0,21	0,02

Quadro 5.63 – QUADRO SÍNTSESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DO VIMIEIRO.

SOLOS	40	41	42	45	46
LOCALIZAÇÃO	Bardeiras	Vimieiro 1	Vimieiro 2	S. Gregório	Sabugueiro
DESCRIÇÃO	Areia argilosa, cinzenta clara.	Areia siltosa, cinzenta amarelada.	Areia argilo-siltosa, cinzenta clara.	Areia mal graduada com silte e cascalho, cinzenta clara.	Areia siltosa, cinzenta clara.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w_o (%)	20,2	18,2	14,4	6,19
	γ_o (KN/m ³)	19,81	20,01	19,61	16,18
	γ_d (KN/m ³)	16,48	16,97	17,16	15,30
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	93,7	97,6	98,46	69,43
	< 2,00 mm	80,2	81,2	85,27	41,81
	< 0,425mm	56,6	39,2	56,83	22,24
	< 0,075mm	35,3	14,6	34,10	10,51
	< 0,002mm		2,29		32,21
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	33	30	27	40
	w_{Lc} (%)	41	39	37	48
	w_p (%)	22	NP	21	30
	I_p (%)	11	NP	6	10
	I_{pc} (%)	19	NP	16	18
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SC	SM	SC-SM	SP-SM
	A.A.S.H.T.O.	A-6 (2)	A-1-b	A-2-4	A-2-4 (0)
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)	17,65	20,01	18,34	18,83
	Wópt. (%)	12,0	9,8	11,7	11,8
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	20	53	24	35
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,22	0,09	0,22	0,01
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	6,2	6,5	5,4	10,0
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$7,5 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-5}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARCÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	25,99	25,69	26,09	26,09
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,577	0,514	0,520	0,705
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	36,6	34,0	34,2	41,4
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	33,1	35,0		39,2
	c (KPa)	12,6	0,67		10,1
EDOMÉTRICO	C_c		0,21		
	C_s		0,02		

5.12 – Solos residuais do maciço granítico de Fronteira

O maciço granítico de Fronteira situa-se cerca de 1 Km a leste da vila com o mesmo nome, num alinhamento tectónico W-E, entre os maciços de Santa Eulália e Ervedal, (Gonçalves *et al.*, 1975). Apresenta forma aproximadamente circular, com cerca de 30 Km² de área e 6 Km de diâmetro. Encontra-se quase totalmente arrasado, constituindo parte da extensa superfície de erosão do Alentejo. Contudo, destacam-se, pontualmente, afloramentos, onde são visíveis formas de erosão em caos de blocos, aspecto típico e comum nestas paisagens graníticas.

O aspecto das rochas é bastante homogéneo em todo o maciço. Trata-se de granitos de grão médio, leucocráticos, biotíticos, com feldspatos brancos e/ou acizentados e quartzo abundante. Em alguns locais a granularidade torna-se um pouco mais grosseira, atingindo às vezes ligeiro carácter porfiróide. Este aspecto verifica-se, em particular, na periferia do maciço (Palácios, 1976).

Os solos residuais do granito de Fronteira, ocorrem frequentemente em toda a extensão do plutão, evidenciando espessuras consideráveis, geralmente 4 metros e no máximo 8 metros. As propriedades observadas nos perfis destes solos, em particular a textura e coloração, reflectem a homogeneidade mencionada para o maciço granítico. Assim, estes solos consistem essencialmente de areias siltosas, cinzentas claras e esbranquiçadas.

5.12.1 – Dados compilados

Nas fichas de caracterização de solos constantes na Carta de Materiais do Distrito de Portalegre (JAE, 1983a), compilaram-se os resultados de análises efectuadas em duas amostras provenientes dos solos residuais do maciço granítico de Fronteira (Quadro 5.64). Os dados coligidos traduzem a natureza areno-siltosa das amostras, de comportamento não plástico ou de baixa plasticidade. A percentagem de “finos” (fracção inferior à malha do peneiro #200), não ultrapassa 30%, e o equivalente de areia (EA) fica abaixo de 40%. Para fins rodoviários, os solos analisados sugerem um bom comportamento na camada sob o pavimento.

Quadro 5.64 – Características coligidas dos solos residuais do granito de Fronteira.

Amostras	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	I _P (%)	EA (%)	Classificação	
	# 200	# 40	# 10				Unificada	AASHTO
S35	27	57	88	41	8	22	SM	A-2-5
S36	6	17	51	25	NP	38	SW-SM	A-1-b

5.12.2 – Resultados experimentais

Devido à já mencionada homogeneidade dos solos residuais do granito de Fronteira, e devido à reduzida área do maciço granítico que deu origem a estes solos, seleccionaram-se apenas dois locais de amostragem. Ambos se situam nos taludes de escavação da estrada de maior importância (EN-243) que atravessa o referido maciço na direcção E-W.

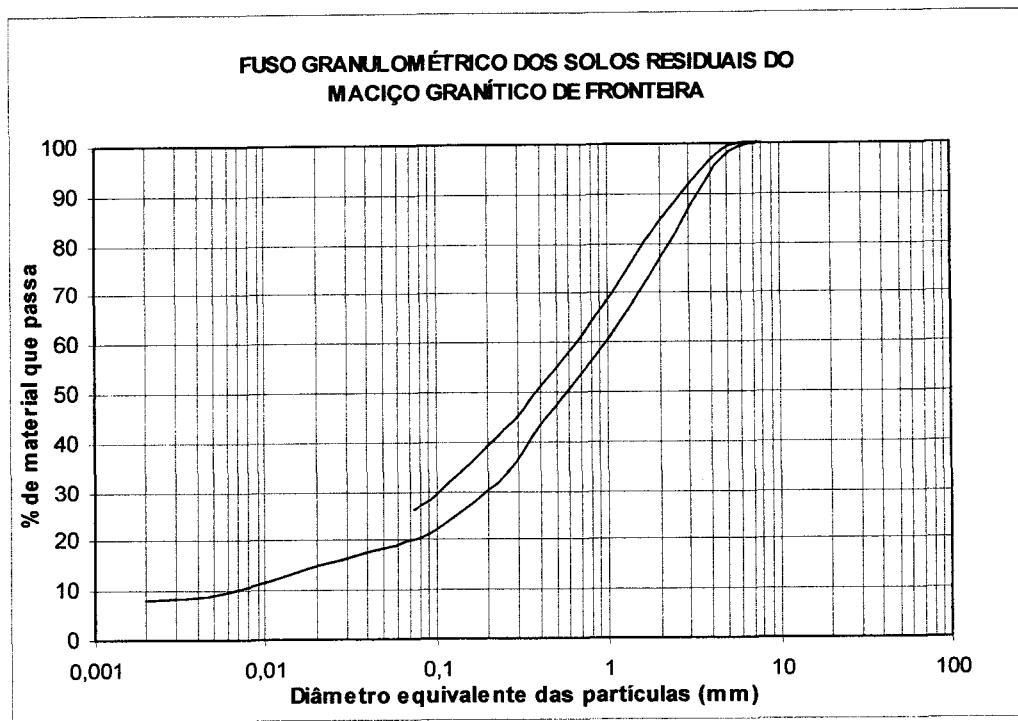
Os perfis de alteração apresentam-se sub-verticais e homogéneos, apenas cortados por algumas diaclases “reliquia”. A espessura dos solos nos locais de amostragem varia entre 4 e

6 m. Nos taludes virados a Sul, onde a exposição do sol é grande, o solo apresenta-se mais seco, duro, difícil de colher; nos taludes virados a Norte, portanto abrigados da exposição solar, os perfis de alteração são mais espessos, o solo é mais húmido e mais friável e, consequentemente, mais fácil de colher.

5.12.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas pertencentes aos solos residuais amostrados reproduzem distribuições granulométricas análogas (Figura 5.48), que são apoiadas pelos respectivos parâmetros granulométricos (Quadro 5.65). Apesar de exprimirem granulometrias extensas, os solos são mal graduados, por deficiência de uma fracção granulométrica.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.48 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítico de Fronteira.

b) Consistência

A percentagem de argila determinada nos solos residuais em estudo, está acima da média dos valores frequentemente registados para estes solos residuais de granitóides. Talvez por isso, e reforçado pela respectiva actividade coloidal, que é significativa, estes solos apresentam uma plasticidade média, que vai condicionar as restantes propriedades geotécnicas (Quadro 5.65). O índice de consistência (I_C) e o índice de liquidez (I_L) revalidam uma vez mais a elevada consistência e estabilidade destes solos.

Quadro 5.65 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Fronteira.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
8	12 - 18	57 - 59	0,006 - 0,002	158 - 320	7 - 11	42 - 43	43 - 45	28 - 30	13 - 14	13 - 17
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
21-23	14	$1,4 \times 10^{-4}$ - $5,4 \times 10^{-4}$	0,01 - 0,09	26,3 - 26,4	1,62	(- 1,16) - (-1,43)	2,16 - 2,43	23 - 25	SM	A-2-7

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas dos solos residuais do maciço granítico de Fronteira corroboram a uniformidade das propriedades registadas. Assim, ambos os solos são arenosiltosos (SM), e pertencem ao subgrupos A-2-7. Segundo a Classificação AASHTO para fins rodoviários, deduz-se um comportamento regular na camada sob o pavimento, devido à influência da plasticidade da fracção “fina”.

d) Outras propriedades

As restantes propriedades analisadas corroboram a homogeneidade dos solos estudados. Contudo, chama-se a atenção para os seguintes aspectos: o equivalente de areia (EA) está de acordo com a percentagem de “finos” e a plasticidade dos mesmos; o mesmo se passa com a expansibilidade (Exp.). A permeabilidade (k) é semelhante entre as amostras e o peso específico das partículas sólidas (γ_s), para além de ser idêntico, é típico e comum de solos resultantes de granitos calco-alcalinos com tendência alcalina (Gonçalves, 1971).

5.12.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

O teor em água no estado natural (w_o) apresenta um valor, para a amostra 48, que é duplo do determinado para a amostra 49 (Quadro 5.68), apesar de serem considerados solos idênticos nas já mencionadas características e de terem sido colhidos no mesmo dia. Esta situação, bem como os valores algo distintos do índice de vazios *in situ* (e_o), só se justifica pelas diferentes condições de jazida para as duas amostras (ver 5.12.2).

b) Compactação

O teor em água óptimo (w_{opt}) obtido do ensaio de compactação tipo Proctor é superior a 12%, devido à considerável quantidade de partículas finas, que em conjunto, possuem maior superfície específica, logo uma maior capacidade de retenção de água. Estes valores estão de acordo com os respectivos valores do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), os quais se encontram abaixo da média registada para os solos residuais de granitos.

5.12.2.3 – Parâmetros de resistência

Devido à homogeneidade e à friabilidade dos solos residuais do granito de Fronteira, verificadas no campo e confirmadas em laboratório, apenas se efectuou um ensaio de corte directo em amostras remexidas numa caixa de 100 cm². Pelos parâmetros de resistência obtidos (Quadro 5.68), verifica-se que o ângulo de atrito ($\phi = 35,4^\circ$) é típico de solos arenosos e a coesão é reduzida ($c = 0,6$ KPa), o que é natural, pois trata-se de uma amostra desestruturada, e como é sabido, para a coesão destes solos residuais, contribui substancialmente a existência de ligações interparticulares patentes na jazida natural.

5.12.2.4 – Compressibilidade

Pelas razões anteriormente expostas, submeteram-se dois provetes (um indeformado e outro deformado) da amostra 48 ao ensaio de consolidação em célula edométrica com 50 mm de diâmetro, cujos parâmetros físicos e de compressibilidade constam nos Quadros 5.66 e 5.67, respectivamente.

Através da análise das curvas de compressibilidade (Figura 5.49), verifica-se que na amostra indeformada, a cedência da estrutura do solo evidenciou-se a partir do 2º escalão de carga, o que é comprovado pela tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p), (Quadro 5.67), a qual se encontra entre os menores valores determinados para este parâmetro nos solos residuais de granitos e que comprova a existência de ligações interparticulares consideradas ténues no solo residual do granito de Fronteira. Este facto está de acordo com as designações “solo friável”, “fácil de colher” e “fraca coesão” característicos deste solo.

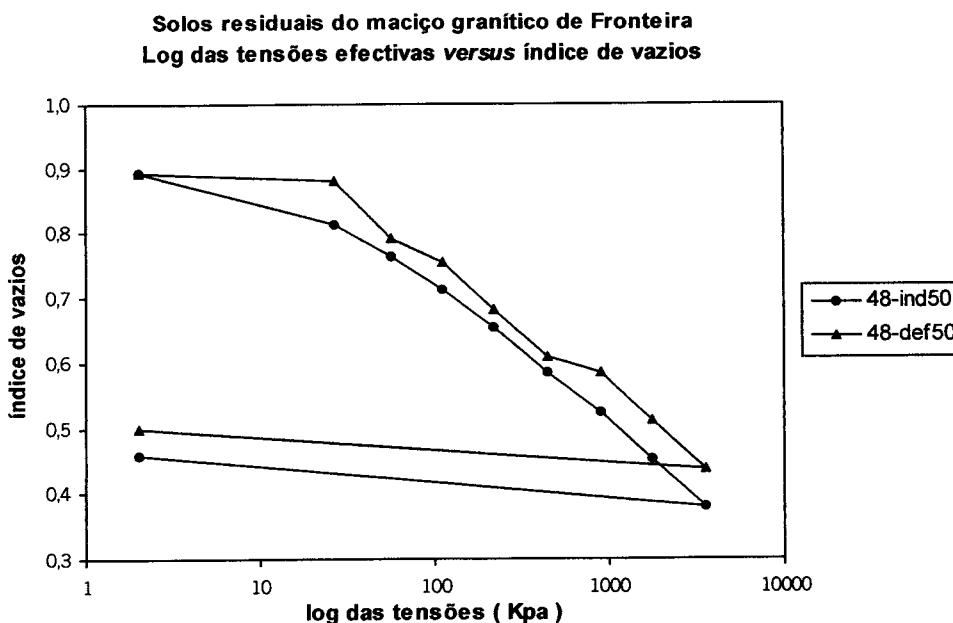


Figura 5.49 – Curvas de compressibilidade obtidas de ensaios edométricos realizados em amostras de um solo residual do maciço granítico de Fronteira.

Relativamente à curva de compressibilidade pertencente à amostra deformada, nota-se uma grande irregularidade no troço descendente, o que possivelmente se justifica com ajustes sucessivos entre a amostra e o aparelho. No entanto, é de salientar que no final, ambas as amostras apresentam valores iguais para os índices de compressibilidade (C_c) e de

expansibilidade (C_s), o que significa que se as condições iniciais do ensaio, em particular índice de vazios e dimensões da amostra, forem idênticas, estes solos, após a quebra de ligações interparticulares, ou seja para tensões elevadas, evoluem para um comportamento semelhante aos dos solos sedimentares.

Relativamente aos restantes coeficientes de compressibilidade, uma vez mais se prova que a variabilidade existente ao longo do ensaio é muito maior nas amostras deformadas comparativamente às indeformadas (Quadro 5.67).

Quadro 5.66 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada e de outra deformada de um solo residual do maciço granítico de Fronteira.

Amostras	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	W_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	W_f (%)
48-ind50	15,40	13,93	0,892	10,8	32,3	0,379	0,460	16,9
48-def50	16,48	13,93	0,893	14,7	56,4	0,438	0,5	15,8

Quadro 5.67 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostras de um solo residual do maciço granítico de Fronteira.

Amostras	Características de compressibilidade						
	a_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	m_v (10 ⁻⁴ KPa ⁻¹)	c_v (10 ⁻⁸ m ² /s)	k (10 ⁻¹⁰ m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
48-ind50	16,2 - 0,8	8,93 - 0,52	3,87 - 0,95	3,55 - 0,05	68	0,24	0,02
48-def50	28,8 - 0,4	15,3 - 0,27	8,05 - 0,73	12,93 - 0,02		0,24	0,02

Quadro 5.68 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE FRONTEIRA.

SOLOS	48	49	
LOCALIZAÇÃO	S. Saturnino	Fronteira	
DESCRIÇÃO	Areia siltosa, cinzenta clara.	Areia siltosa, cinzenta clara.	
PROPRIEDADES FÍSICAS “ <i>IN SITU</i> ”			
w_o (%)	14,9	7,92	
γ_o (KN/m ³)	16,28	17,06	
γ_d (KN/m ³)	14,12	15,79	
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA			
< 4,75 mm	97,10	98,91	
< 2,00 mm	77,00	84,67	
< 0,425mm	43,80	51,60	
< 0,075mm	20,30	26,10	
< 0,002mm	8,04		
LIMITES DE ATTERBERG			
w_L (%)	43	42	
w_{Lc} (%)	43	45	
w_P (%)	30	28	
I_P (%)	13	14	
I_{Pc} (%)	13	17	
CLASSIFICAÇÃO			
UNIFICADA	SM	SM	
A.A.S.H.T.O.	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	
COMPACTAÇÃO			
$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)	17,65	18,44	
Wópt. (%)	13,8	12,1	
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	23	21
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,01	0,09
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	13,7	13,9
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$1,4 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-4}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,28	26,38
ÍNDICE DE VAZIOS “ <i>IN SITU</i> ”	e_o	0,861	0,671
POROSIDADE “ <i>IN SITU</i> ”	n (%)	46,3	40,1
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	35,4	
	c (KPa)	0,6	
EDOMÉTRICO	C_c	0,24	
	C_s	0,02	

5.13 – Solos residuais do maciço granítico de Ervedal

A leste da povoação de Ervedal aflora um maciço eruptivo, ao qual foi atribuído o nome da referida localidade, e situa-se no extremo ocidental do alinhamento tectónico W-E, que une este maciço com os maciços eruptivos de Fronteira e Santa Eulália. Trata-se de um maciço de forma irregular, ligeiramente arredondado, com uma área aproximada de 35 Km². Para além do corpo principal do maciço eruptivo de Ervedal, ocorrem pequenos afloramentos de rochas idênticas que, por se situarem nas imediações dele, foram designados por satélites (Gonçalves *et al.*, 1975).

Os tipos petrográficos que constituem o maciço granítico são diversificados, embora com maior incidência de granitos de grão médio a grosseiro, calco-alcalinos, biotíticos. O quartzo é abundante em cristais de dimensões variadas. Os cristais de plagioclase, inconsistentemente euédricos, apresentam-se muitas vezes zonados. O único mineral máfico desta variedade de granitos é a biotite (Gonçalves *et al.*, 1975).

Como seria de esperar, os solos residuais resultantes da alteração do granito de Ervedal, consistem geralmente em solos areno-siltosos, de grande extensão granulométrica, essencialmente quartzosos, com tons que variam desde o cinzento ao amarelo acastanhado.

Não obstante, a proximidade entre os maciços graníticos de Ervedal e Fronteira, 8 Km entre os respectivos limites, os solos possuem características, textura e cor, diferentes. A própria geomorfologia inerente a cada maciço é distinta, estando associado ao maciço de Ervedal um relevo mais acidentado e portanto, com afloramentos rochosos mais exuberantes, assim como espessuras de solo residual com uma variabilidade maior, frequentemente 4 metros e no máximo 15 metros.

5.13.1 – Dados compilados

Em face dos dados laboratoriais coligidos da Carta de Materiais do Distrito de Portalegre - CMDP (JAE, 1983a), constantes no Quadro 5.69, pode-se inferir o seguinte: trata-se de solos com reduzida percentagem de “finos”, essencialmente constituídos por areia grossa e seixo; revelam um comportamento não plástico ou ligeiramente plástico, que se reflecte nos valores do equivalente de areia, considerados muito bons. Em suma, as quatro amostras analisadas são muito homogéneas e as classificações geotécnicas correspondentes, remetem-nos para o grupo de solos com excelentes características, sob o ponto de vista de aplicação em obras de engenharia em geral e rodoviárias em particular.

Quadro 5.69 – Características coligidas dos solos residuais do granito de Ervedal.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			w _L (%)	I _P (%)	E _A (%)	Classificação	
	# 200	# 40	# 10				Unificada	AASHTO
CMDP	4 - 8	13 - 24	40 - 64	NR - 28	NP - 6	47 - 70	SW - SM	A-1-a A-1-b

5.13.2 – Resultados experimentais

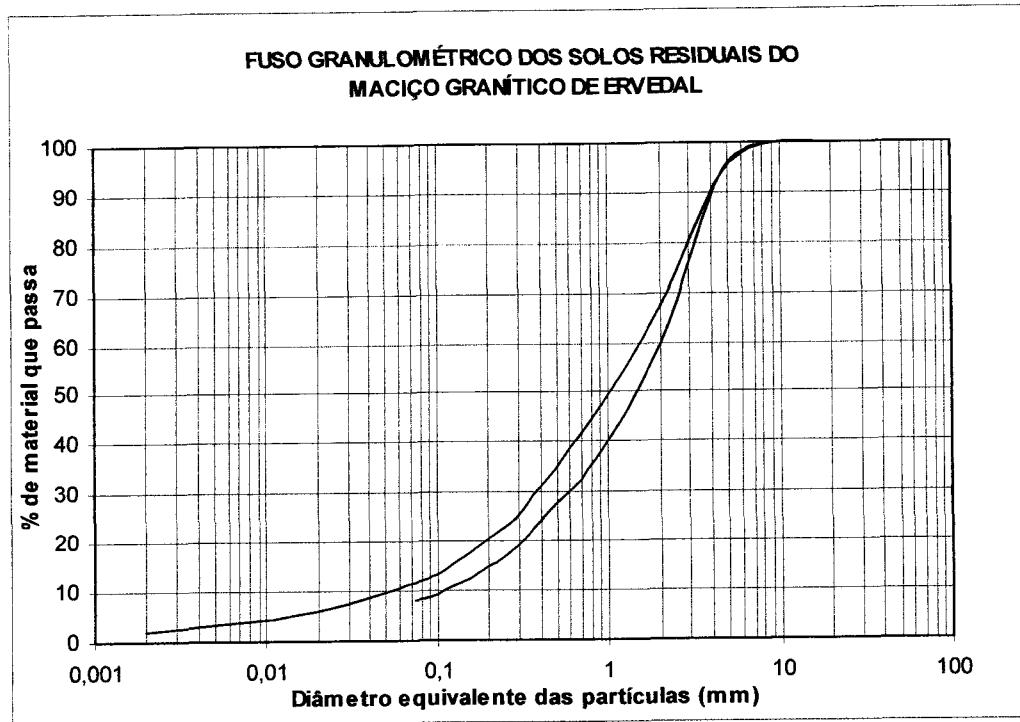
Como se trata de uma mancha de solos residuais relativamente pequena, com uma aparente uniformidade de características, seleccionaram-se somente dois locais de amostragem. A amostra 51 foi colhida numa saibreira activa com uma extensão lateral considerável, superior

a 200 metros, e uma altura que ultrapassa os 15 metros. A amostra 52 foi retirada de um talude de escavação de uma estrada, cuja altura do perfil de alteração apresentava aproximadamente 4 metros.

5.13.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das amostras pertencentes aos solos residuais do granito de Ervedal (Figura 5.50), são quase coincidentes, assim como os parâmetros granulométricos correspondentes, muito semelhantes (Quadro 5.70). A percentagem de argila é insignificante e a percentagem de silte é reduzida, predominando as fracções arenosas e de seixo fino.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.50 – Curvas granulométricas dos solos residuais do maciço granítico de Ervedal.

b) Consistência

Os solos em estudo são não plásticos ou ligeiramente plásticos, o que está de acordo com os dados coligidos. A actividade é nula, a consistência elevada, e não é possível o solo entrar em liquefação em condições naturais.

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas das amostras dos solos residuais do granito de Ervedal corroboram a uniformidade das suas características. Trata-se de areias bem graduadas com silte, com um previsível excelente comportamento na camada sob o pavimento.

Quadro 5.70 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Ervedal.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
2	8 - 10	52 - 56	0,05 - 0,1	20 - 30	1,8 - 1,9	30	34 - 37	27 - 30	0 - 3	7
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ _s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
42-44	10-11	1,1×10 ⁻⁴ - 3,1×10 ⁻⁴	0,1 - 0,14	26,3 - 26,4	0	(- 7,27)	8,27	26 - 30	SW-SM	A-1-b

d) Outras propriedades

Os valores de equivalente de areia (EA) são considerados bons e são semelhantes entre si. Os pesos específicos das partículas sólidas (γ_s) são análogos aos solos residuais do granito de Fronteira, o que é compreensível, porque a mineralogia da rocha-mãe é comparável. A expansibilidade (Exp.) é que pode ser considerada elevada para a quase inexistência de argila. Mas esta situação deve-se possivelmente à estrutura cristalina da esmectite, que se apresenta muito mais aberta ou desorganizada nos solos residuais de Ervedal relativamente aos de Fronteira, portanto com uma maior capacidade de retenção de água (Cap. 4), embora a quantidade deste mineral de argila seja menor nos solos residuais de Ervedal.

5.13.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

Relativamente às propriedades físicas determinadas *in situ*, constantes no Quadro 5.71, verifica-se que, apesar da distância entre os locais de amostragem, aproximadamente 7 Km, as condições de jazida são muito semelhantes, nomeadamente no que se refere aos valores do teor em água no estado natural (w_o), peso volúmico seco (γ_d) e índice de vazios (e_o). É de assinalar que a estrutura dos solos residuais do granito de Ervedal é menos aberta, com menor índice de vazios, que a dos solos residuais do granito de Fronteira, o que está certamente relacionado com a boa graduação daqueles solos, bem como as já mencionadas condições de jazida.

b) Compactação

No que respeita aos parâmetros de compactação, w_{ópt.} e γ_{dmáx.}, patentes no Quadro 5.71, estes corroboram a excelência das características geotécnicas dos solos estudados, naturalmente melhores quando comparados com os solos residuais da mancha de Fronteira.

5.13.2.3 – Parâmetros de resistência

Perante a dificuldade na obtenção de amostras indeformadas, devido à friabilidade dos solos, optou-se por fazer o ensaio de corte directo e inverso na amostra 52, remexida. As curvas correspondentes ao corte directo (Figura 5.51), são bastante suaves, e as curvas tensão-deformação não exibem “pico”, pois o solo possuía um índice de vazios inicial elevado ($e_i = 0,818$), ou seja encontrava-se particularmente solto no início do ensaio e, conforme avança o processo de deformação, vai densificando, e a cedência de energia que caracteriza o “pico” não tem razão de ocorrer, ou melhor, ocorreu logo no início do processo e rapidamente deixou de ter lugar. Em consonância com este raciocínio, estão as diminuições de volume que ocorrem logo no início do processo e se prolongam, embora com menos intensidade, até ao final do ensaio. Pelo contrário, no corte inverso as curvas são bastante irregulares, devido ao revolvimento das partículas, especialmente os grãos quartzosos de maiores dimensões, que são obrigados a rodar no sentido inverso, quando a marcha da caixa de corte é invertida, o que aliás é típico dos solos residuais dos granítóides. Desta situação resulta um ângulo de atrito no corte inverso ($\phi = 35,8^\circ$), superior ao determinado no corte directo ($\phi = 31,9^\circ$), tal como se demonstra pelas respectivas rectas de Coulomb, constantes na Figura 5.52.

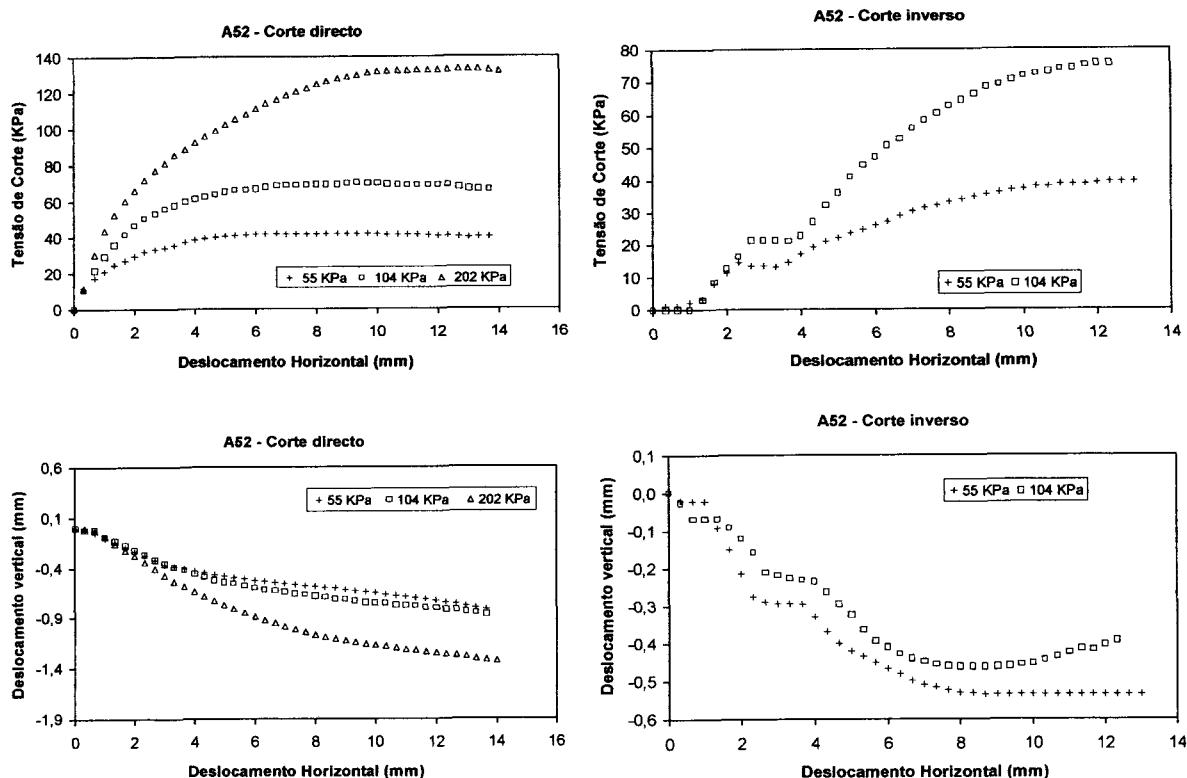


Figura 5.51 – Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra remexida de solo residual do granito de Ervedal.

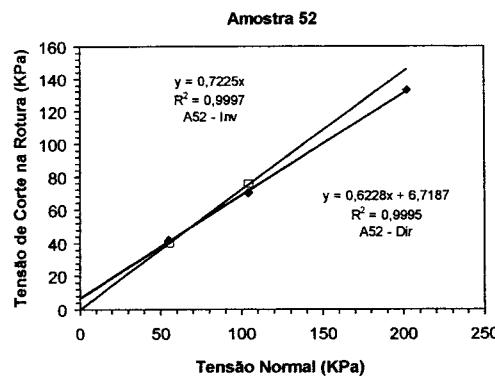


Figura 5.52 – Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra remexida de um solo residual do granito de Ervedal.

5.13.2.4 – Compressibilidade

Não se efectuou ensaio edométrico nestas amostras, devido à dificuldade na obtenção de amostras indeformadas.

Quadro 5.71 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE ERVEDAL.

SOLOS	51	52	
LOCALIZAÇÃO	Ervedal	Figueira de Barros	
DESCRIÇÃO	Areia bem graduada com silte, amarela acastanhada.	Areia bem graduada com silte, cinzenta amarelada.	
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"			
w_o (%)	5,2	7,9	
γ_o (KN/m ³)	17,46	18,04	
γ_d (KN/m ³)	16,67	16,77	
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA			
< 4,75 mm	94,78	94,30	
< 2,00 mm	59,67	67,30	
< 0,425mm	24,93	31,80	
< 0,075mm	7,88	11,70	
< 0,002mm		2,16	
LIMITES DE ATTERBERG			
w_L (%)	30	30	
w_{Lc} (%)	34	37	
w_p (%)	27	30	
I_p (%)	3	0	
I_{pc} (%)	7	7	
CLASSIFICAÇÃO			
UNIFICADA	SW- SM	SW- SM	
A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-1-b	
COMPACTAÇÃO			
$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)	18,63	18,34	
$W_{ópt.}$ (%)	9,6	10,8	
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	44	42
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,10	0,14
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	10,7	10,2
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$3,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,28	26,38
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,576	0,573
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	36,6	36,4
CORTE DIRECTO	ϕ (o)		31,9
	c (KPa)		6,71

5.14 – Solos residuais do maciço granítico do Gavião

O maciço do Gavião ocorre a Norte da povoação de Gavião, numa extensão aproximada de 8 Km². Este maciço é constituído por granitos hercínicos, que sofreram forte cataclase o que lhes confere, quase sempre, textura gnaissica. Esta formação de natureza calco-alcalina, é representada por granitos de grão médio, de duas micas, predominantemente moscovíticos (Zbyszewski *et al.*, 1981).

As rochas graníticas ocorrem, frequentemente, bastante alteradas e diaclasadas, atravessadas por filonetes de quartzo branco. Os solos resultantes da alteração podem atingir espessuras consideráveis, superiores a 10 m, para o que contribui o carácter accidentado do terreno. Trata-se de solos residuais constituídos por areias grossas a médias, siltosas, de cor amarela acastanhada.

5.14.1 – Resultados experimentais

Tratando-se da mais pequena mancha de solos residuais de granitos, mas que manifestam uma certa heterogeneidade aparente, procedeu-se à colheita de amostras em dois locais, junto à povoação de Gavião: a amostra 84, retirada de uma saibreira que expõe uma espessura de solo superior a 10 m e cerca de 100 m de largura; e a amostra 85, extraída das escavações para as fundações de um edifício junto ao IP2, onde a espessura de solo exposto é aproximadamente 3 m.

5.14.1.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As distribuições granulométricas relativas aos solos amostrados no maciço granítico de Gavião, constantes na Figura 5.53, são idênticas para as fracções grosseiras, mas vão-se distanciando à medida que a dimensão do grão diminui. Esta situação está relacionada com a maturidade dos solos. Isto é, um solo que está há mais tempo exposto aos agentes de meteorização e que possui uma espessura de alteração maior, é provável que tenha sofrido uma maior lixiviação dos “finos”; como parece ser o caso do solo da amostra 84 em oposição ao solo 85, o qual é mais jovem, com mais “finos” e micas. Trata-se de solos com uma granulometria extensa, bem graduados, embora com oscilações nas fracções granulométricas inferiores ao seixo fino.

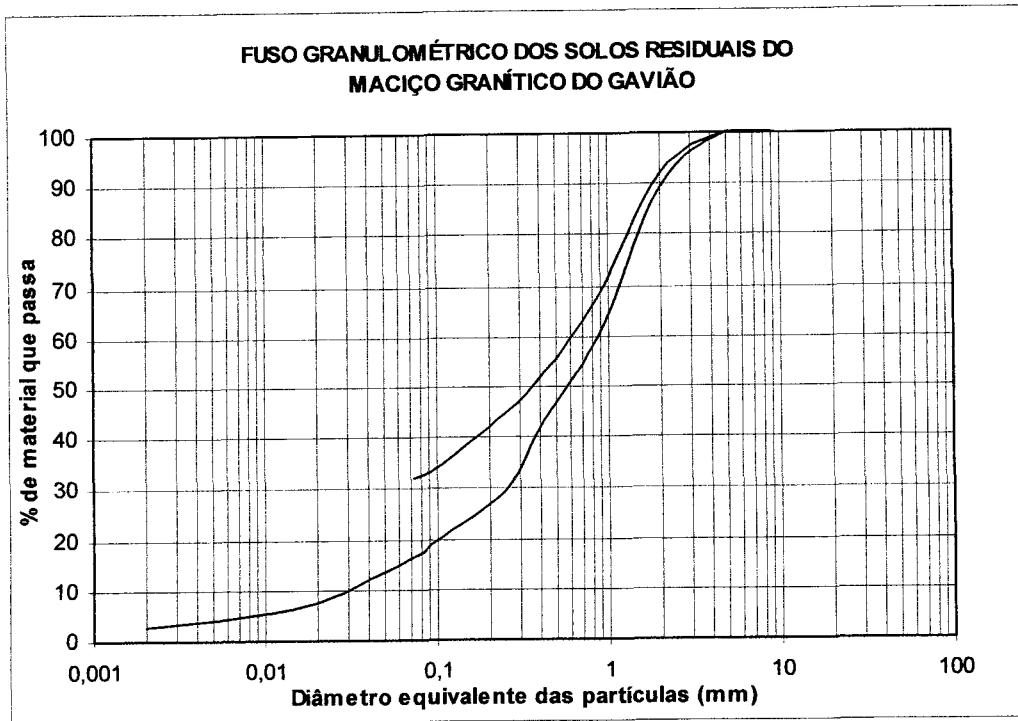
b) Consistência

Os solos residuais estudados são dotados de alguma plasticidade (Quadro 5.72), não obstante a baixa percentagem de argila. Este facto reflecte-se na actividade do solo que é elevada. Constituem materiais com índice de consistência (I_C) e índice de liquidez (I_L) tais, que permitem à partida garantir a sua “rigidez” e improbabilidade em liquefazer, para condições naturais.

c) Classificação geotécnica

Apesar de se considerarem solos areno-siltosos com boas características geotécnicas, pertencem aos subgrupos A-2-4 e A-2-5 da Classificação AASHTO para fins rodoviários. Significa que a fracção que passa no peneiro 0,425 mm tem as características dos grupos A-4

e A-5; sendo de assinalar, uma vez mais, a importância das fracções finas no comportamento geotécnico dos solos.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.53 – Distribuições granulométricas dos solos residuais do granito Gavião.

Quadro 5.72 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico do Gavião.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{LC} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{PC} (%)
3	14	60 - 73	0,03	28	2,5	36 - 43	37 - 48	28 - 36	7 - 8	9 - 12
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
22-37	6 - 15	$1,7 \times 10^{-5}$ - $2,1 \times 10^{-5}$	0,03 - 0,04	26,4	2,92	(-2,48) - (-3,20)	3,48 - 4,20	25 - 33	SM	A-2-4 A-2-5

d) Outras propriedades

Os valores do equivalente de areia (EA) e expansibilidade (Exp.), estão de acordo com a percentagem de “finos” das respectivas amostras, ou seja, o menor valor de EA e o maior de Exp., pertencem à amostra 85 com uma percentagem de “finos” (fracção < 0,075 mm) superior a 30 % (Quadro 5.75). Em relação às restantes propriedades, nomeadamente,

permeabilidade (k), teor em matéria orgânica (MO) e peso específico das partículas sólidas (γ_s), os resultados são idênticos para os dois solos (Quadro 5.72).

5.14.1.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ*, (Quadro 5.75), são semelhantes nas duas amostras de solo, à excepção do teor em água no estado natural (w_o), porque embora as amostras tenham sido colhidas na mesma altura do dia, o solo 84 estava virado para Sul, com maior exposição dos raios solares, ao contrário do solo 85, virado para Norte.

b) Compactação

Analizando os parâmetros de compactação, $w_{ópt.}$ e $\gamma_{dmáx.}$, determinados para o solo 85 e patentes no Quadro 5.75, é notória a sua dependência, principalmente do $w_{ópt.}$, em relação à quantidade de material fino presente no solo, mais de 50 % dos grãos são de dimensões inferiores a 0,425 mm.

5.14.1.3 – Parâmetros de resistência

Efectuou-se o ensaio de corte directo e inverso em três provetes indeformados do solo 84, o mais grosseiro. As respectivas curvas ‘tensão-deformação’ e rectas de Coulomb constam nas Figuras 5.54 e 5.55.

O valor do ângulo de atrito ($\phi = 38,1^\circ$), obtido no ensaio de corte directo, é considerado bastante bom e está de acordo com a granulometria dos grosseiros; a coesão resultante deste ensaio é nula, facto não sustentado pelo comportamento deste solo residual no seu estado natural, uma vez que possui coesão devido ao ‘cimento’, constituído pelo material fino, com o qual as ligações entre as partículas mais grossas são estabelecidas, o que permite taludes subverticais *in situ* de altura apreciável. Em face desta constatação, a ausência de coesão nos resultados do ensaio, deve-se possivelmente à quebra dessas mesmas ligações durante a fase de consolidação, porque à escala da amostra estas são frágeis, mas multiplicadas por um número próximo do infinito, no campo, são suficientemente fortes para permitir uma estrutura coesa, e manter ‘paredes verticais’ de solos residuais com cerca de 10 m de altura. O facto do teor em água inicial ser significativamente baixo ($w_i = 6\%$), também contribui para a ausência de coesão neste ensaio. Deste modo, na resistência ao corte, foram privilegiados os mecanismos de atrito entre partículas em contacto.

Por outro lado, no corte inverso do mesmo solo, houve aumento do teor em água, pois esta encaminhou-se, entretanto, para a superfície de corte parcialmente exposta pelo desfasamento das duas meias caixas, o que concorreu para a ligeira coesão verificada, assim como para a lubrificação entre os grãos, reduzindo o atrito entre os mesmos ($\phi = 36,8^\circ$).

É de assinalar que as interpretações elaboradas para cada ensaio, num determinado solo residual, nem sempre podem ser extrapoladas para outros solos residuais, devido ao carácter singular deste tipo de solos. Além do mais, para um dado solo residual a resposta a solicitações cisalhantes não é unívoca, como já foi demonstrado.

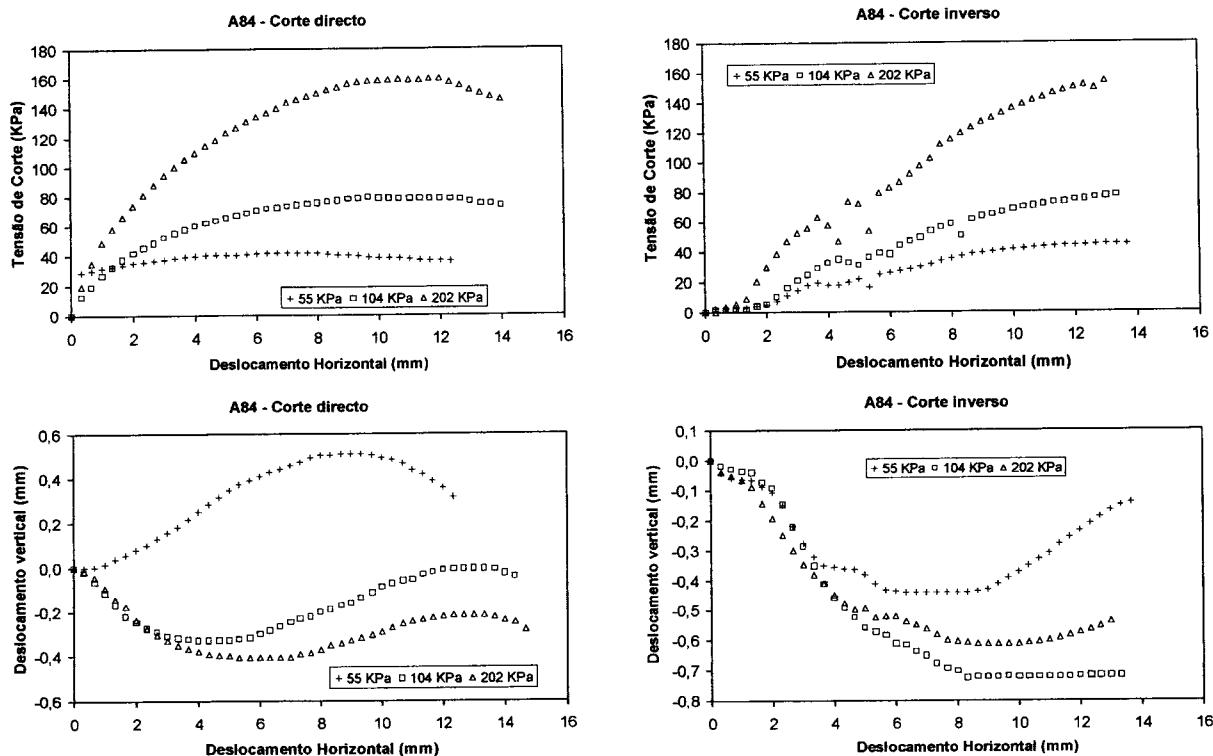


Figura 5.54 - Gráficos do ensaio de corte de directo e inverso em amostra indeformada de um solo residual do granito do Gavião.

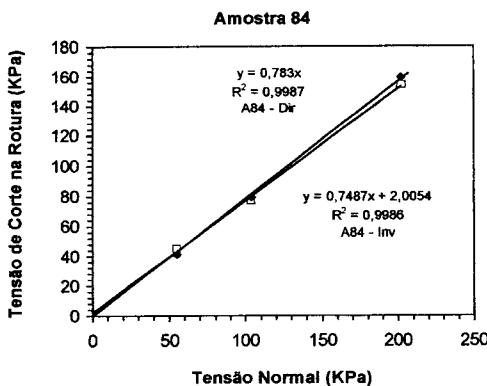


Figura 5.55 - Rectas de Coulomb, obtidas dos ensaios de corte directo e inverso, em amostra indeformada de um solo residual do granito do Gavião.

5.14.1.4 – Compressibilidade

Realizou-se um ensaio de consolidação em amostra indeformada do solo 84, utilizando um anel edométrico com 99 mm de diâmetro. Pela análise da curva de compressibilidade (Figura 5.56), pode-se constatar que houve uma cedência brusca da estrutura do solo, logo no 3º acréscimo de tensão, o que está de acordo com a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p) determinada para esta amostra (Quadro 5.74) e que em última análise reforça a ideia, já mencionada, de ligações ténues entre as partículas mais grosseiras.

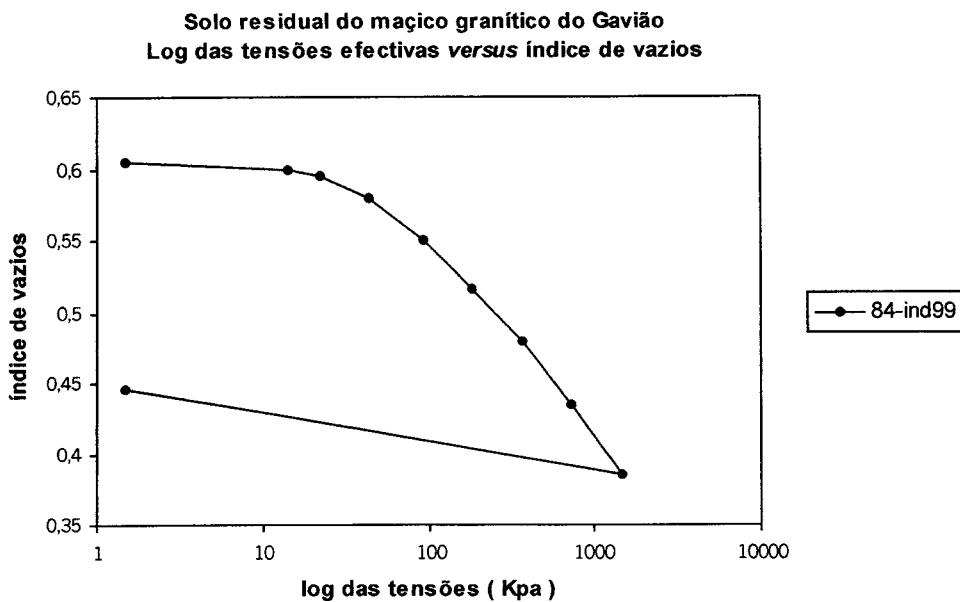


Figura 5.56 – Curva de compressibilidade obtida de ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico do Gavião.

Quadro 5.73 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico do Gavião submetida ao ensaio edométrico.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	w_f (%)
84-ind99	19,12	16,48	0,605	14,7	72,5	0,386	0,445	16,9

Quadro 5.74 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de um solo residual do maciço granítico do Gavião.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	m_v (10^{-4} KPa ⁻¹)	c_v (10^{-8} m ² /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
84-ind99	5,6 - 0,6	3,66 - 0,46	5,21 - 3,53	1,94 - 0,17	79	0,16	0,02

Os índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s) obtidos, traduzem a natureza essencialmente granular dos solos estudados, com poucas partículas finas que são os materiais responsáveis por grandes compressões ou expansões. Os restantes coeficientes de compressibilidade (Quadro 5.74) apresentam intervalos de variação modestos, em consonância com o material ensaiado.

Quadro 5.75 – QUADRO SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DO GAVIÃO.

SOLOS		84	85
LOCALIZAÇÃO		Gavião 1	Gavião 2
DESCRIÇÃO		Areia siltosa, amarela acastanhada.	Areia siltosa, amarela acastanhada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w_o (%)	8,2	13,6
	γ_o (KN/m ³)	16,97	18,04
	γ_d (KN/m ³)	15,69	15,89
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	100	100
	< 2,00 mm	89,4	91,94
	< 0,425mm	43,1	52,95
	< 0,075mm	16,7	32,01
	< 0,002mm	2,74	
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	36	43
	w_{Lc} (%)	37	48
	w_p (%)	28	36
	I_p (%)	8	7
	I_{pc} (%)	9	12
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SM	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-2-4	A-2-5
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)		17,46
	$W_{ópt.}$ (%)		15,5
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	37	22
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,03	0,04
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	5,9	15,1
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$2,1 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,38	26,38
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,681	0,660
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	40,5	39,8
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	38,1 (ind.)	
	c (KPa)	0	
EDOMÉTRICO	C_c	0,16	
	C_s	0,02	

5.15 – Solos residuais do maciço granítico de Portalegre

O granito de Portalegre corresponde ao anel envolvente de um conjunto de rochas eruptivas, que juntamente com o mesmo compõem o denominado “ Maciço Subvulcânico do Carrascal” (Gonçalves *et al.*, 1973). Na verdade, no núcleo deste maciço ocorrem rochas eruptivas de natureza variada, mas no âmbito desta dissertação apenas se faz referência ao granito que envolve o referido núcleo da estrutura subvulcânica, por se encontrar subjacente a uma espessura considerável de solo residual, cuja área é difícil de estimar. Sob o ponto de vista geomorfológico, a esta estrutura está associado um relevo bastante acidentado, com declives acentuados.

O mencionado granito, de natureza alcalina, porfíroide e de grão grosseiro, biotítico, apresenta-se bastante tectonizado, com textura cataclástica. Assim, as plagioclases ocorrem intensamente caulinizadas e sericitizadas; o quartzo mantém indícios de forte tectonização, ocorrendo fracturado e recristalizado (Gonçalves *et al.*, 1973).

O solo residual característico do granito de Portalegre, consiste geralmente numa areia silto-argilosa, cinzenta avermelhada ou amarelada, onde os grãos de quartzo se encontram disseminados numa matriz mais fina.

5.15.1 – Dados compilados

Os solos residuais do granito de Portalegre, por se situarem junto à cidade com o mesmo nome, são atravessados por importante rede viária, nomeadamente: IP2-EN18 – Alpalhão-Portalegre - Variante de Fortios (JAE, 1988); EN18 e EN246 – variantes a Portalegre (JAE, 1980b); IC13 – Alter do Chão – Portalegre (JAE, 1998a); EN245-1 (JAE, 1983b) e CMDP – Carta de Materiais do Distrito de Portalegre (JAE, 1983a). Da consulta dos respectivos estudos geológico-geotécnicos extraíram-se alguns resultados laboratoriais com interesse e que se resumem no Quadro 5.76.

Quadro 5.76 – Resumo dos dados coligidos dos solos residuais do granito de Portalegre.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	I _P (%)	W _o (%)	EA (%)	γ _{d máx} (KN/m ³)	W _{ópt} (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDP	15	24	50	27	8		21			
EN18 e 246	16 - 60	34 - 79	82 - 95	NR - 27	NP - 8	8-15	20 - 34	19,91	8,1	99
IP2-EN18	35 - 49	59 - 74	94 - 97	20 - 24	NP - 8					
IC13	18 - 56	23 - 78	26 - 98	NR - 36	NP - 18	2		19,1-20,0	8,2 - 10,8	21 - 46
EN245-1	17 - 48	33 - 74	58 - 96	NR - 32	NP - 12	8-15		19,6-20,2	6,5-10,5	32 - 42
TOTAL	15 - 60	23 - 79	26 - 98	NR - 36	NP - 18	8-15	20 - 34	19,1-20,2	8,2 - 10,8	21 - 99

Da análise sumária das características coligidas, realça-se o facto destes solos apresentarem uma significativa variabilidade nos valores registados, em uns mais que outros. Isto deve-se sobretudo à natureza da rocha-mãe, cuja textura, químismo e granularidade, apresentam variações de fácies, que se tornam mais nítidas devido aos diferentes graus de deformação a que foram submetidas as referidas rochas. Na formação destes solos residuais, é lícito

considerar para além da alteração meteórica a alteração hidrotermal a que as rochas muito provavelmente foram sujeitas.

A estes solos resultantes de rochas graníticas tectonizadas, correspondem características e classificações geotécnicas (Figura 5.57), consideradas de menor qualidade para a maioria das obras de engenharia, quando comparados com os resultados dos restantes solos residuais de granítóides. Contudo, é de assinalar, que os dados relativos ao estudo geológico-geotécnico da EN245-1 diferem um pouco dos restantes, devido sobretudo ao facto de na zona onde a obra se desenvolveu, predominarem os solos com “finos” mais siltosos que argilosos.

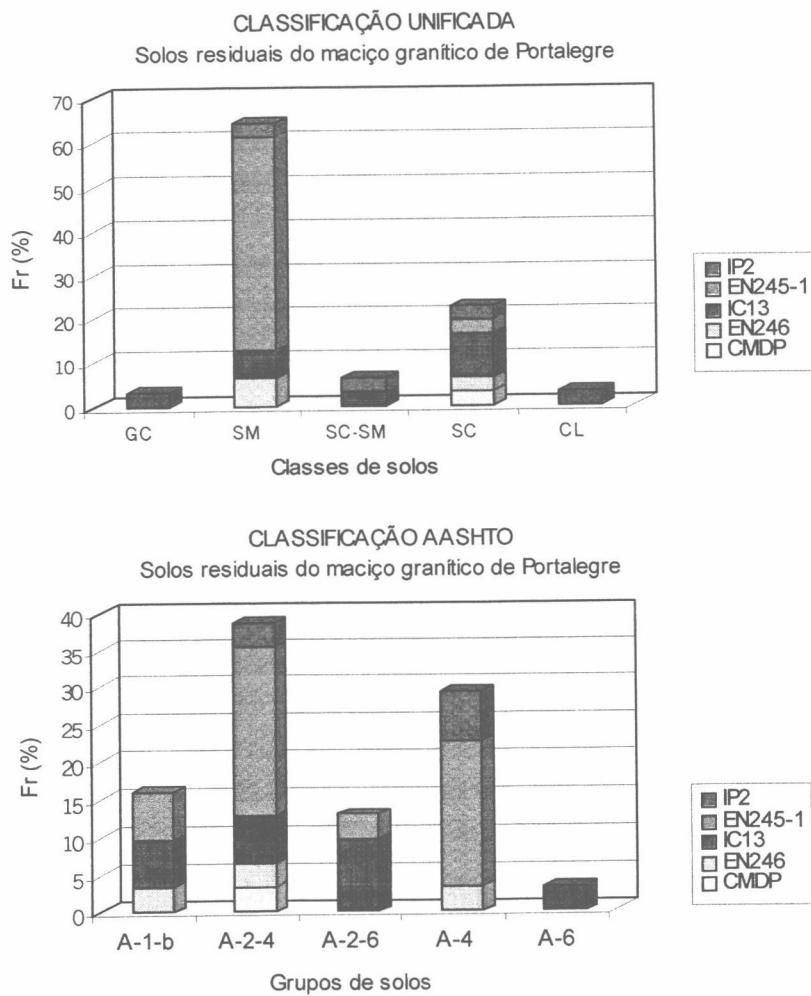


Figura 5.57 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do granito de Portalegre.

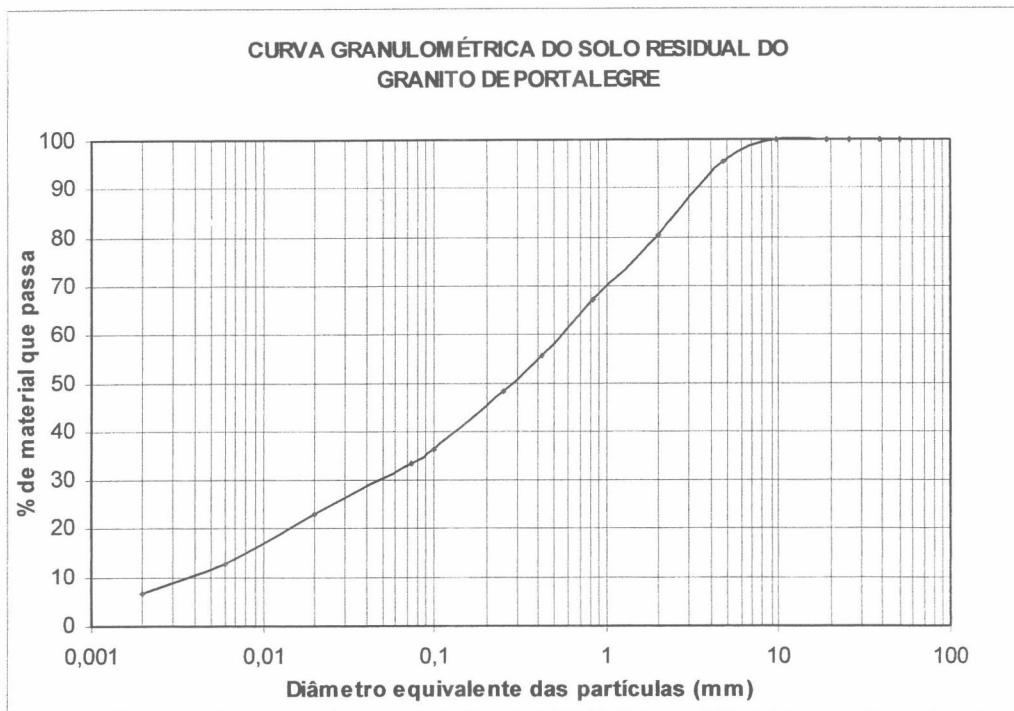
5.15.2 – Resultados experimentais

Nesta mancha de solos residuais do granito de Portalegre, colheram-se amostras indeformadas e remexidas, no talude de escavação da obra rodoviária IP2, junto a Portalegre, cuja altura é próxima dos 7 metros. Neste local, os solos apresentam variabilidade no que respeita à textura, granulometria e coloração. Contudo, o solo que se colheu consiste numa areia argilosa cinzenta avermelhada, cujos grãos quartzosos de maiores dimensões exibiam vestígios de deformação. Devido à coesão aparente que evidenciava, o solo foi colhido em blocos; mas já em laboratório, quando se cravaram os anéis para os diferentes ensaios geomecânicos, nem sempre se obtiveram amostras indeformadas com a qualidade desejável.

5.15.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

A granulometria é extensa e o solo bem graduado como se pode observar na Figura 5.58 e comprovar no Quadro 5.77. A percentagem de “finos” é considerável (34%), a percentagem de areia é menor que 50 %, e a percentagem de seixo é de 20 %; esta última corresponde aos fenocristais provenientes da rocha-mãe que resistiram à alteração.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.58 – Curva granulométrica do solo residual do granito de Portalegre.

b) Consistência

A uma modesta percentagem de argila presente na amostra, corresponde uma plasticidade média e uma actividade significativa. Relativamente ao índice de liquidez (I_L) e índice de consistência (I_C), a interpretação é equivalente às dos restantes solos residuais analisados no âmbito deste estudo.

c) Classificação geotécnica

A amostra estudada de solo residual do granito de Portalegre, foi classificada como SC – areia argilosa pelo Sistema Unificado, o que está em conformidade com a Classificação AASHTO para fins rodoviários, subgrupo A-2-6. Estas classificações confirmam a influência que a qualidade dos “finos” tem no comportamento geotécnico do solo, embora a percentagem de “finos” seja sobretudo atribuída à fracção de silte, o controle das

características analisadas é devido particularmente aos minerais argilosos presentes. Estas classificações estão consonantes com os resultados coligidos.

Quadro 5.77 – Características gerais do solo residual do maciço granítico de Portalegre.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
7	27	47	0,004	125	1,3	32	40	21	11	19
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
20	10	-	0,17	25,99	1,68	-1,4	2,4	17	SC	A-2-6

d) Outras propriedades

O equivalente de areia (EA), determinado para o solo residual estudado (Quadro 5.77), reflecte a plasticidade inerente a estes solos, não obstante a quantidade significativa de areia e de seixo fino ($> 60\%$). Relativamente à expansibilidade (Exp.), o respectivo valor demonstra uma vez mais que o tipo de mineral argiloso presente no solo é determinante para este parâmetro. Assim, este solo, cujo mineral argiloso predominante é a caulinita, possuindo uma percentagem de argila idêntica à do solo residual do granito de Pias (secção 5.8), onde prevalece a esmectite na fracção argilosa, apresenta uma expansibilidade inferior a este último. Como é sabido, a desorganização da estrutura cristalina do mineral argiloso e consequentemente a capacidade de “reter” a água, é proporcional ao valor da expansibilidade. O peso específico das partículas sólidas (γ_s) deste solo é típico de solos residuais de granitos alcalinos.

5.15.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

As propriedades físicas determinadas *in situ* do solo residual do maciço granítico de Portalegre constam no Quadro 5.78. O peso volúmico seco (γ_d) deste solo é relativamente baixo, quando comparado com os restantes solos residuais, em particular com os que possuem índice de vazios próximos, mas com minerais resultantes de rochas calco-alcalinas. De assinalar que a percentagem de finos não é inversamente proporcional ao índice de vazios, o que prova a estrutura “alveolar” inerente a estes solos residuais.

b) Compactação

O peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx.}$), obtido pelo ensaio de compactação tipo Proctor, é considerado baixo, (Quadro 5.78), e é consonante com o valor determinado *in situ*. Por outro lado, o teor em água óptimo ($w_{opt.}$), relativamente alto é comum em solos cujos finos possuem uma boa capacidade para reter a água.

5.15.2.3 – Parâmetros de resistência

Realizou-se um ensaio de corte directo numa amostra remexida do solo residual do granito de Portalegre, cujos gráficos ‘tensão-deformação’ e recta de Coulomb constam nas Figuras 5.59 e 5.60, respectivamente.

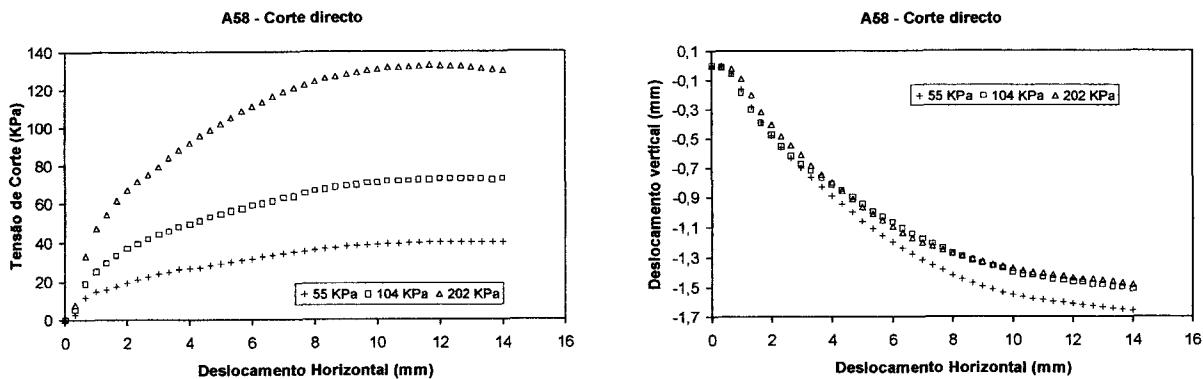


Figura 5.59 – Gráficos do ensaio de corte de directo numa amostra remoldada do solo residual do granito de Portalegre.

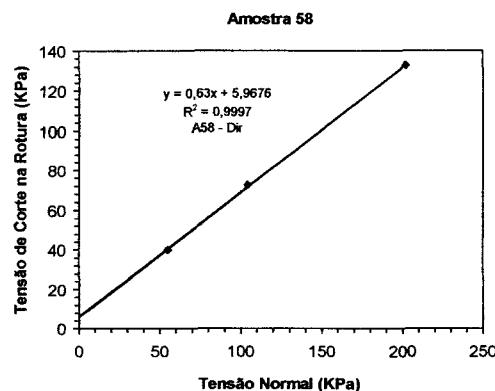


Figura 5.60 – Recta de Coulomb obtida do ensaio de corte directo em amostra remoldada do solo residual do granito de Portalegre.

As curvas ‘tensão de corte *versus* deslocamento horizontal’ são suaves e não exibem resistência de “pico”, uma vez que o solo foi moldado com um índice de vazios próximo do que possui em jazida natural; assim, vai densificando à medida que o processo de deformação ocorre, como se pode confirmar pelo gráfico ‘deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal’. Deste modo, os grãos de maiores dimensões vão-se arrumando na matriz mais fina, atingindo nesta fase um equilíbrio estável, após o qual o processo de deformação prossegue praticamente constante, com tensões tangenciais instaladas com a grandeza da tensão residual.

As forças de atrito entre partículas, representadas pelo ângulo entre a recta de Coulomb e a horizontal, são típicas de solos arenosos ($\phi = 32,2^\circ$); enquanto a coesão registada ($c = 6,0 \text{ KPa}$), apesar de se tratar de uma amostra remoldada, traduz o balanço entre as forças atractivas e repulsivas, inerente às partículas mais finas deste solo.

Quadro 5.78 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO RESIDUAL DO MACIÇO GRANÍTICO DE PORTALEGRE.

SOLO	58
LOCALIZAÇÃO	Portalegre
DESCRIÇÃO	Areia argilosa, cinzenta avermelhada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w_o (%) 5,6 γ_o (KN/m ³) 16,48 γ_d (KN/m ³) 15,59
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm 95,60 < 2,00 mm 80,10 < 0,425mm 55,40 < 0,075mm 33,50 < 0,002mm 6,53
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%) 32 w_{Lc} (%) 40 w_P (%) 21 I_P (%) 11 I_{Pc} (%) 19
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA SC A.A.S.H.T.O. A-2-6 (0)
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³) 16,77 $W_{ópt.}$ (%) 17,4
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%) 20
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%) 0,17
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%) 10,1
PERMEABILIDADE	k (m/s) --
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³) 25,99
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o 0,667
POROSIDADE "IN SITU"	n (%) 40
CORTE DIRECTO	ϕ (o) 32,2 c (KPa) 6,0

5.16 – Solos residuais do maciço granítico de Carreiras

As rochas magmáticas que constituem o afloramento de Carreiras, localizado a NE de Portalegre em plena Serra de São Mamede, estendem-se por uma área aproximada de 200 Km², incluindo a povoação com o mesmo nome. O maciço rochoso é essencialmente constituído por ortognaisses graníticos, alcalinos, biotíticos, derivados de granitos não porfiróides de grão médio a grosso e por vezes de grão fino.

Os minerais evidenciam, em geral, aspectos de forte tectonização. O quartzo apresenta extinções ondulantes fortes; os feldspatos mostram-se bastante caulinizados e intensamente sericitizados; a biotite ocorre em pequenos agregados pseudomórficos; a moscovite parece resultar, frequentemente, da moscovitização dos feldspatos e da descoloração das biotites (Fernandes *et al.*, 1973).

As maiores espessuras de solos residuais do granito de Carreiras, 7 ou mais metros, ocorrem nos flancos de encosta da serra, ou seja, em zonas de declives bastante acentuados. Estes solos consistem, principalmente, em areias médias a finas, siltosas, de cor cinzenta ou amarelada, com grãos de quartzo disseminados numa matriz essencialmente caulinítica. Os solos são friáveis, geralmente fáceis de colher, expostos em perfis exibindo descontinuidades “relíquia” junto das quais o solo é mais húmido e amarelado.

5.16.1 – Dados compilados

Os solos residuais do granito tectonizado de Carreiras foram contemplados por dois estudos geológico-geotécnicos a designar: IP2-EN18 – Alpalhão-Portalegre (JAE, 1989a) e CMDP – Carta de Materiais do Distrito de Portalegre (JAE, 1983a). Embora estes solos resultem da alteração de granitos tectonizados como os de Portalegre, é notória a acentuada melhoria das características dos solos em causa (Quadro 5.79), nomeadamente no que se refere à menor percentagem de “finos”, maior percentagem de areia, ausência de plasticidade e valor de equivalente de areia superior. A confirmar estes resultados, concorrem as respectivas classificações geotécnicas; todos os solos são areno-siltosos (SM) e enquadraram-se nos grupos A-1 e A-2.

Quadro 5.79 – Resumo dos dados coligidos dos solos residuais do granito de Carreiras.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	Ip (%)	w _o (%)	EA (%)	γ _{dmáx} (KN/m ³)	w _{ópt} (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDP	19	40	81	25	NP		37			
IP2-EN18	25 - 42	42 - 71	67 - 93	NR - 28	NP	9-11		18,5-19,8	7 - 10	39 - 50

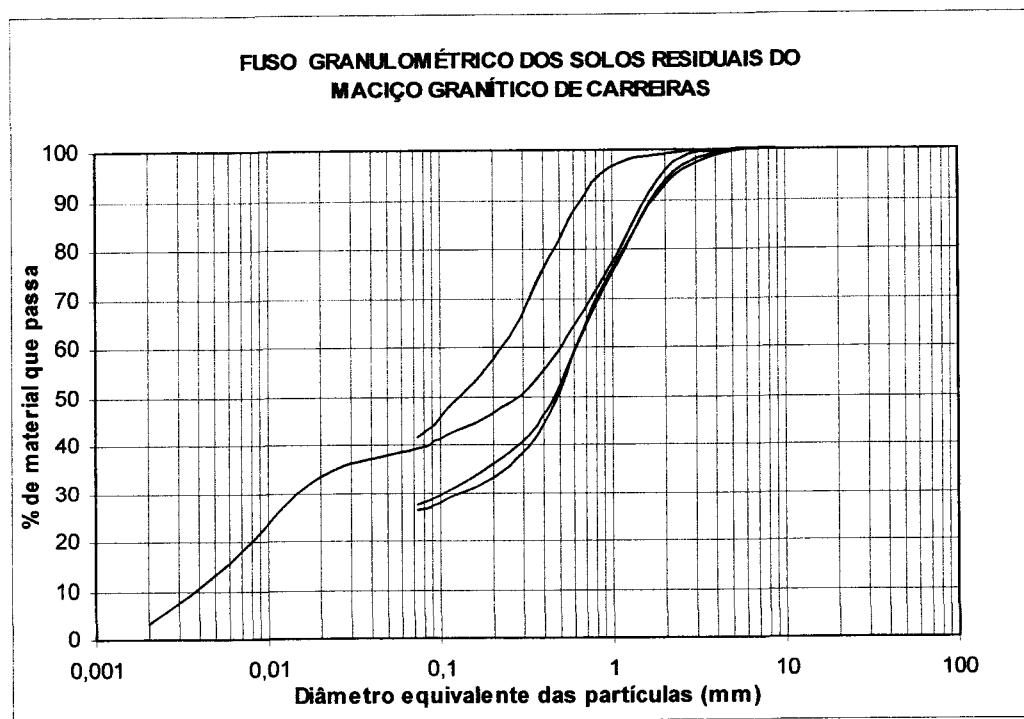
5.16.2 – Resultados experimentais

Como se trata de uma mancha de solos residuais com uma representação espacial considerável, seleccionaram-se quatro locais de amostragem: as amostras dos solos 54 e 57 situam-se em taludes de estradas, a amostra 55 foi retirada da escavação para as fundações de uma residência e a amostra 56 foi colhida numa saibreira. As espessuras de solo residual estão compreendidas entre 5 e 7 metros.

5.16.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

As curvas granulométricas das referidas amostras de solo residual do granito de Carreiras apresentam-se consistentes entre si (Figura 5.61), e, apesar de reproduzirem granulometrias extensas, os solos são mal graduados. Como já foi mencionado, a percentagem de areia é substancialmente superior ($> 55\%$) à dos solos residuais do granito tectonizado de Portalegre; pelo contrário, a percentagem de argila é inferior (Quadro 5.80). A grande percentagem de “finos” relativamente a outros solos residuais, deve-se fundamentalmente à tectonização que estas rochas graníticas sofreram, com a consequente transformação parcial ou integral de minerais como os feldspatos (que quase não aparecem na composição mineralógica destes solos, deduzida através da DRX - Cap.4), e as micas. Estas diferenças influenciam as restantes características geotécnicas, como seria de esperar.



Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau
	Fino	Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 5.61 – Curvas granulométricas dos solos residuais do granito de Carreiras.

b) Consistência

Os solos são ligeiramente plásticos ou não plásticos, mas com actividade considerável tendo em conta a percentagem de argila que contêm (Quadro 5.80). A consistência é elevadíssima e os valores do índice de liquidez (I_L) não comprometem a estabilidade destes solos, como já se pode inferir para os solos residuais de granitóides sujeitos às condições climatéricas do Alentejo.

Quadro 5.80 – Características gerais dos solos residuais do maciço granítico de Carreiras.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D ₁₀	Cu	Cc	w _L (%)	w _{Lc} (%)	w _P (%)	I _P (%)	I _{Pc} (%)
3	25 - 36	56 - 67	0,004	125	0,13	25 - 37	32 - 46	NP-32	NP - 5	NP - 14
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I _L (%)	I _C (%)	w _R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
19-55	10-11	$2,7 \times 10^{-6}$ $4,1 \times 10^{-5}$	0,11 - 0,14	25,11 - 26,09	1,53	(-2,10) - (-2,96)	3,10 - 3,96	20-30	SM	A-1-b A-2-4 A-4

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas dos solos residuais do granito de Carreiras são sem dúvida, melhores que as dos solos residuais do granito de Portalegre. De acordo com os resultados coligidos, classificam-se sempre como solos areno-siltosos (SM). Só não pertencem, também, todos os solos analisados aos grupos A-1 e A-2 da classificação para fins rodoviários, devido à significativa percentagem de finos destes solos residuais (Quadro 5.83).

d) Outras propriedades

As restantes propriedades dos solos estudados e cujos valores se expõem no Quadro 5.80, são análogas às do solo residual do granito de Portalegre, destacando-se, no entanto, os valores do equivalente de areia, que são substancialmente superiores.

5.16.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

No que respeita aos valores do peso volúmico seco determinados *in situ* e presentes no Quadro 5.83, são relativamente homogéneos e particularmente baixos ($\gamma_{dmédio} = 14,9$ KN/m³), estando em concordância com o, frequentemente elevado, índice de vazios inerente a estes solos em jazida natural ($e_{o\,médio} = 0,727$). Os pesos específicos das partículas, também baixos, cooperam juntamente com a estrutura aberta destes solos, para os pesos volúmicos particularmente baixos. Os valores do teor em água no estado natural (w_o) são menores nos taludes virados a Sul, e maiores nos abrigados do sol, embora se tenham feito as determinações no mesmo dia.

b) Compactação

No que se refere aos parâmetros de compactação obtidos a partir de ensaios tipo Proctor, efectuados nos solos estudados, verifica-se a semelhança de resultados, com intervalos de variação muito pequenos: $w_{ópt} \Rightarrow (15,6 - 17,8) \%$ e $\gamma_{dmáx} \Rightarrow (16,87 - 17,36) \text{ KN/m}^3$. É de assinalar dois aspectos: o teor em água óptimo elevado, típico de solos com muitos finos; o maior $\gamma_{dmáx}$ e menor $w_{ópt}$ correspondem à amostra 56, que possui simultaneamente a menor percentagem de “finos” e a maior percentagem de areia (Quadro 5.83).

5.16.2.3 – Parâmetros de resistência

Os solos residuais do granito de Carreiras foram submetidos ao ensaio de corte directo, com o objectivo de determinar os respectivos parâmetros de resistência, ϕ e c . Na amostra 57, indeformada, realizou-se o ensaio de corte directo e inverso. Nas duas amostras, 54 e 55, remoldadas, atendendo aos parâmetros físicos registados *in situ*, concretizou-se apenas o corte directo. As curvas obtidas nos ensaios da amostra indeformada e a respectiva recta de Coulomb, são apresentadas nas Figuras 5.62 e 5.63, respectivamente.

No corte directo, as curvas ‘tensão-deformação’ apresentam algumas irregularidades, devido ao movimento relativo entre os grãos grosseiros, e evidenciam uma certa tendência para estes solos mobilizarem a tensão tangencial designada por resistência de “pico”. Relativamente às curvas ‘deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal’ e, porque a estrutura do solo é caracterizada pela existência de um número elevado de aglomerados de partículas em equilíbrio instável, a resposta logo no início do processo caracteriza-se pela diminuição de volume, e ao atingir-se a tensão de rotura, dá-se a recuperação desse volume, devido ao ressalto dos grãos maiores. Após este arrumo entre partículas correspondente a equilíbrios mais estáveis, a deformação prossegue praticamente a volume constante, com tensões tangenciais instaladas com a grandeza da tensão residual.

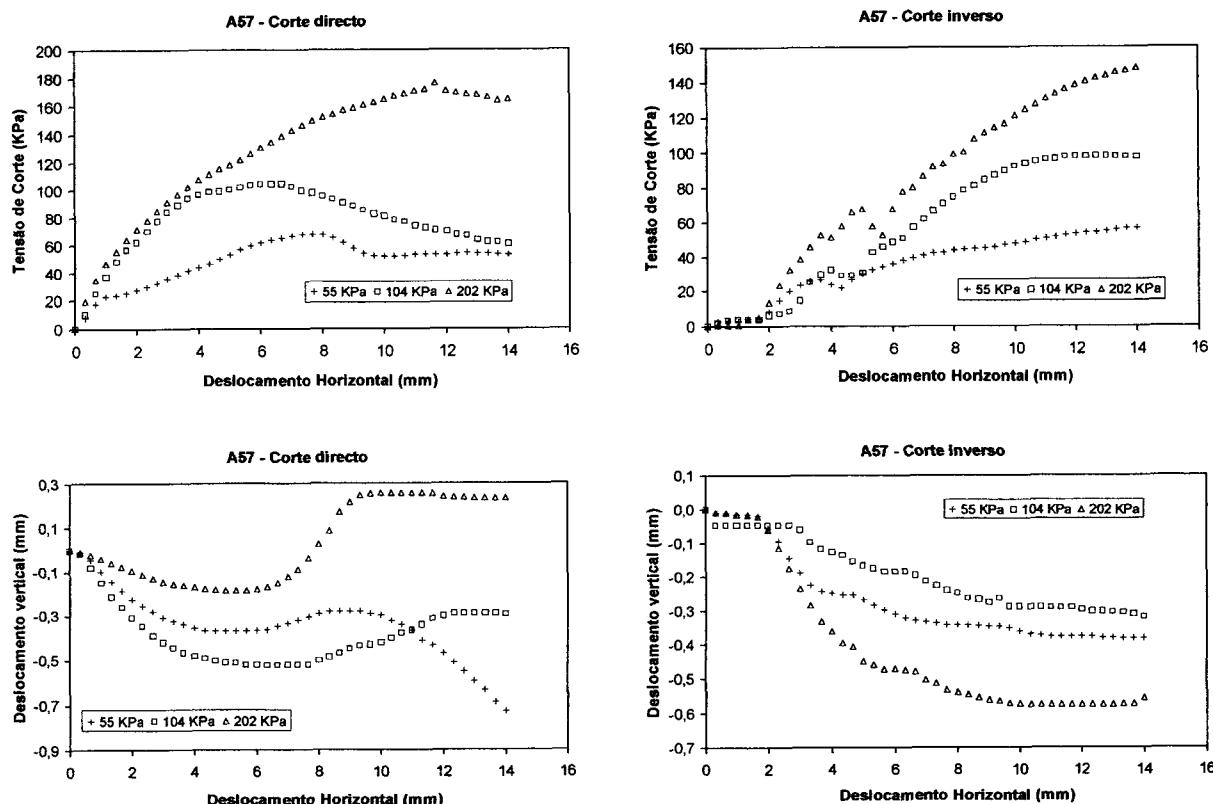


Figura 5.62 – Gráficos do ensaio de corte directo e inverso numa amostra indeformada do solo residual do granito de Carreiras.

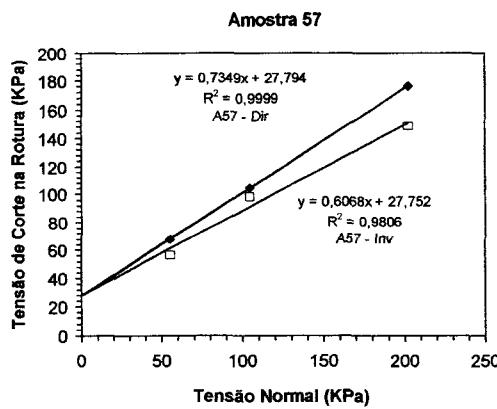


Figura 5.63 – Rectas de Coulomb obtidas do ensaio de corte directo e inverso em amostra indeformada do solo residual do granito de Carreiras.

O ângulo de atrito determinado no corte directo ($\phi = 36,3^\circ$) é substancialmente superior ao correspondente ao corte inverso ($\phi = 31,2^\circ$), pois neste último caso as partículas estão mais arrumadas entre os finos e não há tanto atrito directo; por outro lado, a coesão evidenciada nos dois ensaios é análoga e significativa ($c \approx 28$ KPa).

Mesmo nas amostras remexidas a coesão entre partículas de solo está patente, embora com menor relevância (Quadro 5.83). O ângulo de atrito é idêntico nestas amostras e próximo do correspondente à amostra indeformada, o que confirma uma certa homogeneidade na resposta destes solos à deformação distorcional.

Por fim, salienta-se o facto destes solos pertencerem a maciços terrosos que estão bastante “recortados” por diaclases “relíquia” cuja resistência ao corte não é contemplada neste estudo, mas que se adivinha ter uma importância considerável na estabilidade dos mesmos.

5.16.2.4 – Compressibilidade

Realizou-se um ensaio edométrico numa amostra indeformada do solo 57, por ser o que possuía maior percentagem de “finos”, utilizando um anel de 99 mm de diâmetro. As características iniciais e finais e os parâmetros de compressibilidade, constam nos Quadros 5.81 e 5.82, respectivamente.

Pela análise da curva de compressibilidade, representada na Figura 5.64, constata-se que houve oscilações nas reduções do índice de vazios à medida que a tensão vertical aumenta; isto significa que houve vários “pontos de cedência” ao longo do processo de consolidação, ou seja, a desestruturação do solo concretizou-se de uma forma progressiva, mas não constante. A própria tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p), determinada para o 1º ponto de cedência é considerada elevada (Quadro 5.82). Estas duas constatações podem estar, possivelmente relacionadas com o facto de o granito que deu origem a este solo residual, ter sofrido tectonização. Desta forma, as rochas graníticas foram submetidas a dois tipos de alteração, hidrotermal e meteórica. É oportuno relembrar que a teoria da pré-consolidação “virtual” nos solos residuais, assenta fundamentalmente na compreensão dos processos de alteração das rochas, que constituem os grandes responsáveis pela gênese destes solos.

Os índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s), resultantes dos dados obtidos no ensaio em fogo, são considerados baixos. Para tal contribuiu o índice de vazios inicial do provete ser relativamente baixo, quando comparado com os valores deste parâmetro nos solos residuais pertencentes a outras manchas. Em consequência, os restantes coeficientes deduzidos do ensaio de compressibilidade apresentam variações também reduzidas comparativamente com outros solos residuais de granitóides (Quadro 5.82).

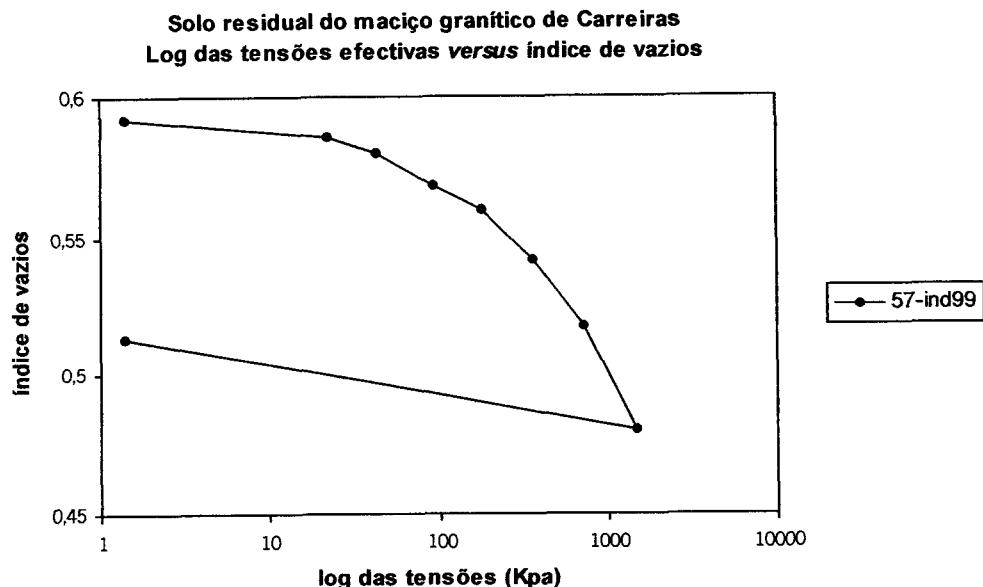


Figura 5.64 – Curva de compressibilidade obtida de ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de solo residual do granito de Carreiras.

Quadro 5.81 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de uma amostra indeformada de um solo residual do granito de Carreiras, submetida ao ensaio edométrico.

Amostra indeformada	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	W_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	W_f (%)
57-ind99	18,44	16,28	0,592	12,9	57,5	0,480	0,513	18,7

Quadro 5.82 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostra indeformada de solo residual do maciço granítico de Carreiras.

Amostra indeformada	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	m_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	c_v (10^{-8} m 2 /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
57-ind99	2,8 - 0,5	1,75 - 0,33	6,2 - 3,37	1,09 - 0,11	282	0,12	0,01

Quadro 5.83 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DO MACIÇO GRANÍTICO DE CARREIRAS.

SOLOS		54	55	56	57
LOCALIZAÇÃO		Carreiras 1	Carreiras 2	Miradouro	M ^{te} Carvalhos
DESCRIÇÃO		Areia siltosa, amarela.	Areia siltosa, branca acinzentada.	Areia siltosa, branca acinzentada ou amarelada.	Areia siltosa, branca amarelada.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	w_o (%)	12,5	17,2	9,5	9,5
	γ_o (KN/m ³)	17,65	17,06	15,69	16,67
	γ_d (KN/m ³)	15,69	14,51	14,32	15,20
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	99,95	100	99,7	100
	< 2,00 mm	93,87	95,8	93,2	98,99
	< 0,425mm	47,53	56,3	45,8	74,55
	< 0,075mm	27,3	39,4	25,9	41,54
	< 0,002mm		3,27		
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	28	37	30	25
	w_{Lc} (%)	35	46	36	32
	w_P (%)	23	32	NP	21
	I_p (%)	5	5	NP	4
	I_{pc} (%)	12	14	NP	11
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SM	SM	SM	SM
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-4 (1)	A-2-4	A-4 (1)
COMPACTAÇÃO	$\gamma_{dmáx.}$ (KN/m ³)	16,87	16,97	17,36	16,87
	$W_{ópt.}$ (%)	16,5	17,0	15,6	17,8
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	47	19	55	23
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,12	0,11	0,13	0,14
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	10,5	11,1	10,2	10,4
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$1,5 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-6}$
PÊSO ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	25,99	26,09	25,11	25,89
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,656	0,797	0,753	0,703
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	39,6	44,4	43,0	41,3
CORTE DIRECTO	ϕ (o)	35,1	35		36,3 (ind.)
	c (KPa)	7,82	6,7		27,79
EDOMÉTRICO	C_c				0,12
	C_s				0,01

5.17 – Solos residuais dos granitos do complexo eruptivo de Nisa

O Complexo Eruptivo de Nisa - CEN, designação recente (Ribeiro *et al.*, 1995) proposta para o complexo granítico de Nisa, abrange uma vasta área de 700 Km². Trata-se sem dúvida da mais extensa massa granítica aflorante a sul do Tejo, limitada a leste por Espanha, a norte por Nisa, a oeste por Comenda e a sul pela Aldeia da Mata (Oliveira *et al.*, 1992a). Apesar dos corpos ígneos que compõem o CEN apresentarem alguma diferenciação de fácies (Solá *et al.*, 1998), optou-se, neste estudo, por considerá-los como um todo, devido à unidade geográfica, relações genéticas, químicas e mineralógicas.

A rocha predominante do complexo é o granito de grão muito grosso, porfiróide, calcocálcico, com duas micas e grandes megacristais de feldspato - Granito de Nisa (Ribeiro *et al.*, 1965). Não são raras as variações de fácies, encontrando-se zonas em que o granito é de grão médio a fino e não porfiróide. Quanto à composição mineralógica, trata-se de granitos monzoníticos, com casos de tendência alcalina (Gonçalves, 1971).

No âmbito da presente dissertação, referem-se os principais tipos de granito do CEN, produtores de solos residuais: o granito de Marvão – de composição idêntica ao de Nisa, mas cujos solos residuais, de maior espessura, se apresentam em estado de alteração mais adiantado, com os feldspatos praticamente caulinizados e sericitizados (amostras 53 e 80); enquanto que nos solos residuais do granito de Nisa, estes minerais ainda preservam praticamente intacta a sua textura e composição inicial (amostra 81); o granito de Alpalhão – de grão fino, homogéneo, biótítico (Solá *et al.*, 1998), cuja meteorização proporciona uma areia fina, siltosa, cinzenta (amostra 77); o granito de Gáfete – de grão fino a médio, homogéneo, moscovítico e alcalino (Fernandes *et al.*, 1973), representado pelas amostras 78 e 79.

Os granitos de Alpalhão - Gáfete distinguem-se dos restantes do CEN, devido ao controle tectónico-estrutural (Pereira *et al.*, 1998) a que foram sujeitos e evidenciam com clareza. Estas diferenças reflectir-se-ão nas propriedades geotécnicas dos respectivos solos residuais como se pretende demonstrar neste subcapítulo.

Em suma, os granitos pertencentes ao Complexo Eruptivo de Nisa – CEN, são bastante heterogéneos, nomeadamente no que concerne à granularidade (grão fino a grosso), textura (porfiróide ou homogéneo) e coloração (branco, cinzento, rosa, amarelo, etc.). Naturalmente, esta heterogeneidade reflecte-se nas características geomecânicas dos respectivos solos residuais.

5.17.1 – Dados compilados

Na extensa área granítica do CEN, são sobretudo três estudos geológico-geotécnicos que contêm resultados de ensaios realizados em solos residuais destes granitos: CMDP – Carta de Materiais do Distrito de Portalegre (JAE, 1983a); IP2 – Tolosa - Alpalhão (1989b) e EN118 e EN18 - Variante de Alpalhão (1998b).

É notória a grande amplitude patente nos intervalos de variação dos valores resultantes dos ensaios laboratoriais consultados, constantes no Quadro 5.84, consequência da considerável, e já mencionada, heterogeneidade inerente aos solos residuais em estudo. As classificações geotécnicas respeitantes aos solos cujos resultados foram coligidos, apresentam-se na Figura 5.65. A maioria dos solos são areno-siltosos, frequentemente bem graduados, podendo, por

vezes, ser argilosos (particularmente os solos oriundos da mancha de Gáfete), mas não raramente, faz parte da sua composição grande percentagem de cascalho. Relativamente à Classificação AASHTO para fins rodoviários, são predominantemente solos pertencentes aos grupos A-1 e A-2.

Quadro 5.84 – Resumo dos dados coligidos correspondentes aos solos residuais dos granitos do Complexo Eruptivo de Nisa – CEN.

Estudos	Análise granulométrica (% passada)			WL (%)	IP (%)	w _o (%)	EA (%)	γ _{dmáx} (KN/m ³)	w _{ópt} (%)	CBR (95%)
	# 200	# 40	# 10							
CMDP	4 - 29	13 - 44	32 - 85	NR - 40	NP - 12		11 - 68			
IP2	1 - 37	14 - 76	31 - 96	NR - 30	NP - 6		26 - 32	19,2-19,4	8 - 10	32 - 39
EN118 e EN18	1 - 39	22 - 52	50 - 83	NR - 38	NP - 9	9-14	25 - 62	19,1-20,0	8 - 11	12 - 48

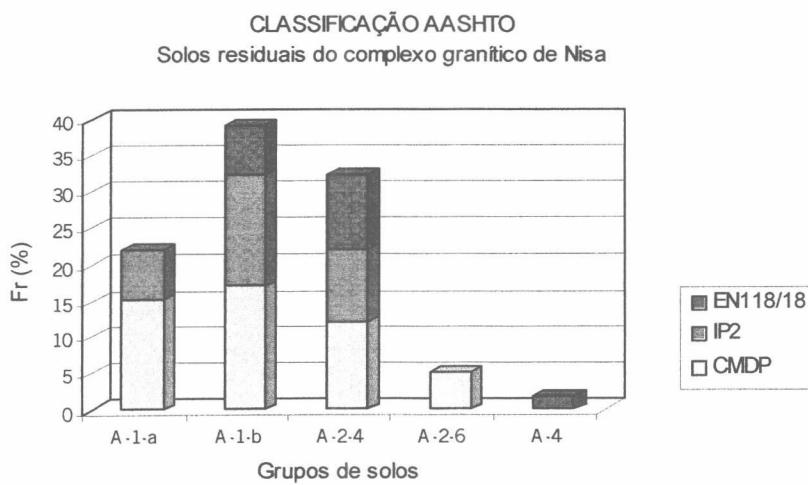
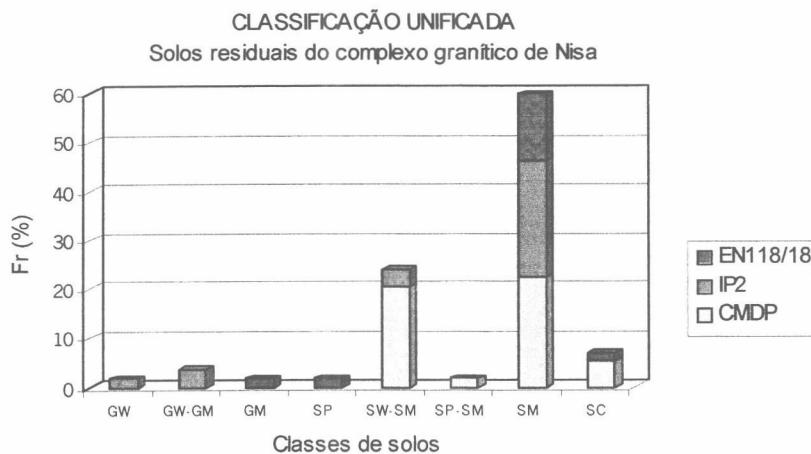


Figura 5.65 – Classificações geotécnicas dos solos residuais do complexo granítico de Nisa.

5.17.2 – Resultados experimentais

Dos inúmeros locais onde se identificaram solos residuais do CEN, seleccionaram-se seis dos que apresentavam melhores condições para o estudo e amostragem. Assim, os solos residuais

do granito de grão grosseiro de Marvão, amostras 53 e 80, foram colhidos em saibreiras; a espessura de solo ultrapassa, por vezes, os 10 metros em encosta de serra. Trata-se de solos essencialmente constituídos por areia siltosa, branca acimentada a amarelada, friáveis, fáceis de colher. O solo resultante da meteorização do granito de grão fino de Alpalhão (amostra 77) foi colhido numa pedreira abandonada, apresenta uma espessura aproximada de 5 metros e é constituído por areia fina, siltosa, cinzenta. Os solos resultantes do granito alcalino de Gáfete (amostras 78 e 79) variam de solos siltosos a argilosos, cinzentos a avermelhados e, foram colhidos em taludes de escavação do IP2, com uma espessura média de 4 metros de altura. Por fim, o solo residual do granito porfiróide de Nisa (amostra 81) é o solo mais grosseiro de todos os colhidos neste estudo, essencialmente constituído por cascalho bem graduado amarelo acastanhado. Pode observar-se em várias saibreiras existentes na parte norte desta grande mancha, mas foi colhido na que possuía maiores dimensões, 5 metros de solo exposto por mais de 200 metros de extensão.

5.17.2.1 – Características gerais

a) Composição granulométrica

Das curvas granulométricas relativas aos solos analisados (Figura 5.66), destacam-se: a curva correspondente ao solo com maior percentagem de “finos” (PF = 55 %), num extremo, e o solo mais grosseiro de todos (79 % de cascalho), no outro.

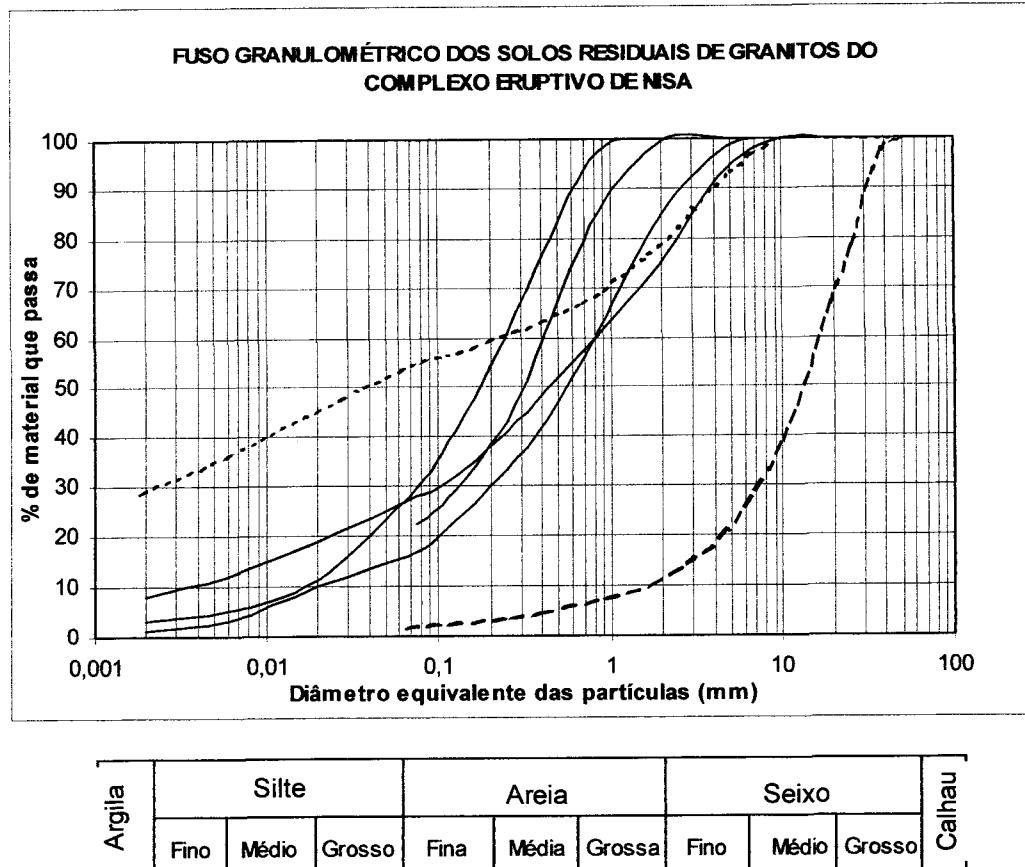


Figura 5.66 – Curvas granulométricas dos solos residuais do complexo granítico de Nisa.

Nos restantes parâmetros granulométricos (Quadro 5.85) é notório o afastamento entre os extremos do intervalo de variação, nomeadamente o D_{10} , Cu e Cc. Ou seja, de todas as manchas de solos residuais estudados, os que correspondem à mancha de Nisa, são os que apresentam maior diversidade granulométrica, o que aliás está de acordo com a variedade textural patente nas rochas que compõem este complexo.

Quadro 5.85 – Características gerais dos solos residuais dos granitos do complexo de Nisa.

argila (%)	silte (%)	areia (%)	D_{10}	Cu	Cc	w_L (%)	w_{Lc} (%)	w_P (%)	I_P (%)	I_{Pc} (%)
1 - 30	1 - 27	9 - 77	<0,001 - 1,6	7 - >200	0,02 - 3,6	NR - 52	36 - 58	NP-35	NP - 17	NP - 23
EA (%)	Exp (%)	K (m/s)	MO (%)	γ_s (KN/m ³)	Ac	I_L (%)	I_C (%)	w_R (%)	Classif. Unificada	Classif. AASHTO
14-49	6 - 15	$4,1 \times 10^{-6}$ - $1,1 \times 10^{-4}$	0,03 - 0,26	25,99 - 26,48	0,58 - 1,92	(-0,82) - (-10,9)	1,82 - 3,55	23-30	GW SM MH	A-1-a A-1-b A-2-4 A-7-5

b) Consistência

O índice de plasticidade (I_P), dos solos residuais dos granitos do complexo eruptivo de Nisa, também é bastante variável, traduzindo tanto uma ausência de plasticidade como uma plasticidade média. A actividade coloidal (Ac) dos solos varia de normal a muito intensa, e a consistência de média a muito elevada. Relativamente ao índice de liquidez (I_L), que é bastante variável, assinala-se que o solo 78 (o mais fino), é o que apresenta um valor mais próximo do equilíbrio limite ($I_L = -0,82$). No entanto, seria necessário um aumento do teor em água no estado natural de 31 % que juntamente com os 21 % registados *in situ*, perfaziam os 52 % necessários para que a hipótese de liquefação fosse viável, o que naturalmente é praticamente impossível em condições meteorológicas normais.

c) Classificação geotécnica

As classificações geotécnicas corroboram a grande heterogeneidade dos solos residuais estudados. Nesta amostragem, encontram-se classificações do Sistema Unificado, desde MH - silte elástico, passando por SM - areia siltosa, até GM - cascalho bem graduado. No que respeita à classificação AASHTO para fins rodoviários, a maioria dos solos pertence aos grupos A-1 e A-2 (materiais granulares), mas por vezes podem ocorrer nestas manchas, particularmente nos solos resultantes do granito alcalino de Gáfete, materiais silto-argilosos, pertencentes ao subgrupo A-7-5 (Quadros 5.85 e 5.90).

d) Outras propriedades

Os intervalos de variação dos valores das restantes propriedades expostas no Quadro 5.85, principalmente o equivalente de areia (EA), expansibilidade (Exp) e permeabilidade (k), confirmam a heterogeneidade dos solos em questão. Deste modo, ao menor valor de equivalente de areia corresponde naturalmente a maior percentagem de “finos” argilosos (Quadro 5.90), assim como a maior expansibilidade. Do mesmo modo, a maior e a menor permeabilidade registada nestes solos, pertence à amostra mais grosseira e, com mais “finos”

plásticos, respectivamente. O peso específico das partículas é o que se mantém mais homogéneo, o que naturalmente se deve às relações genéticas das rochas do CEN que deram origem a estes materiais.

5.17.2.2 – Propriedades físicas

a) Propriedades físicas *in situ*

Os valores do teor em água no estado natural (w_o), variam consideravelmente (Quadro 5.90), correspondendo o maior destes valores (21 %), ao solo com maior percentagem de “finos” (amostra 78 => PF = 55%). Os valores do peso volúmico seco determinados *in situ* variam em função do índice de vazios, densidade das partículas e distribuição granulométrica dos solos, como se verifica no mesmo quadro.

b) Compactação

No que concerne aos parâmetros de compactação, $\gamma_{dmáx}$. e $w_{ópt}$, assinala-se uma vez mais a grande variabilidade de comportamentos inerente a estes solos (Quadro 5.90). Assim temos que o valor mais elevado obtido para o peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx} = 19,91 \text{ KN/m}^3$) é relativo ao solo com o menor teor em água ($w_{ópt} = 7,9 \%$) e que por sua vez é o solo mais grosso desta mancha. O inverso se passa em relação ao solo mais fino.

5.17.2.3 – Parâmetros de resistência

a) Ensaio de corte directo

Foi possível colher duas amostras indeformadas, 53 e 80, as quais foram submetidas ao ensaio de corte directo e inverso, com vista à obtenção dos parâmetros de resistência, nomeadamente ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c). Os gráficos relativos a estes ensaios, apresentam-se na Figura 5.67, constando as respectivas rectas de Coulomb na Figura 5.68.

Pela análise das curvas ‘tensão-deformação’, verifica-se que as resistências de “pico” são mais evidentes na amostra 80, relativamente à amostra 53. O ângulo de atrito obtido para a amostra 80 ($\phi = 37,9^\circ$) é substancialmente superior ao valor do mesmo parâmetro obtido para a amostra 53 ($\phi = 32,7^\circ$). Como se trata de solos semelhantes, no que se refere às características de identificação (Quadro 5.90), esta diferença nos valores dos ângulos de atrito deve-se provavelmente às diferentes condições físicas das amostras indeformadas, nomeadamente teor em água inicial, densidade e índice de vazios. Como é sabido, a rotura com ‘pico’ é típica de solos granulares mais densos, com menor índice de vazios; por outro lado, a recta de Coulomb foi construída com base nas resistências de corte máximas, o que se traduz num ângulo de atrito superior no caso do solo que apresenta resistência de “pico”, ao contrário do solo em que essa resistência é insipiente, sendo as tensões de corte máximas muito semelhantes ou coincidentes com as tensões de corte “residuais”.

Relativamente à coesão determinada no corte directo, o solo que nas características de identificação revelou um comportamento ligeiramente plástico (Quadro 5.90), apresenta coesão ($c = 6,7 \text{ KPa}$), enquanto que o solo 80, de natureza não plástica demonstrou ausência de coesão neste ensaio.

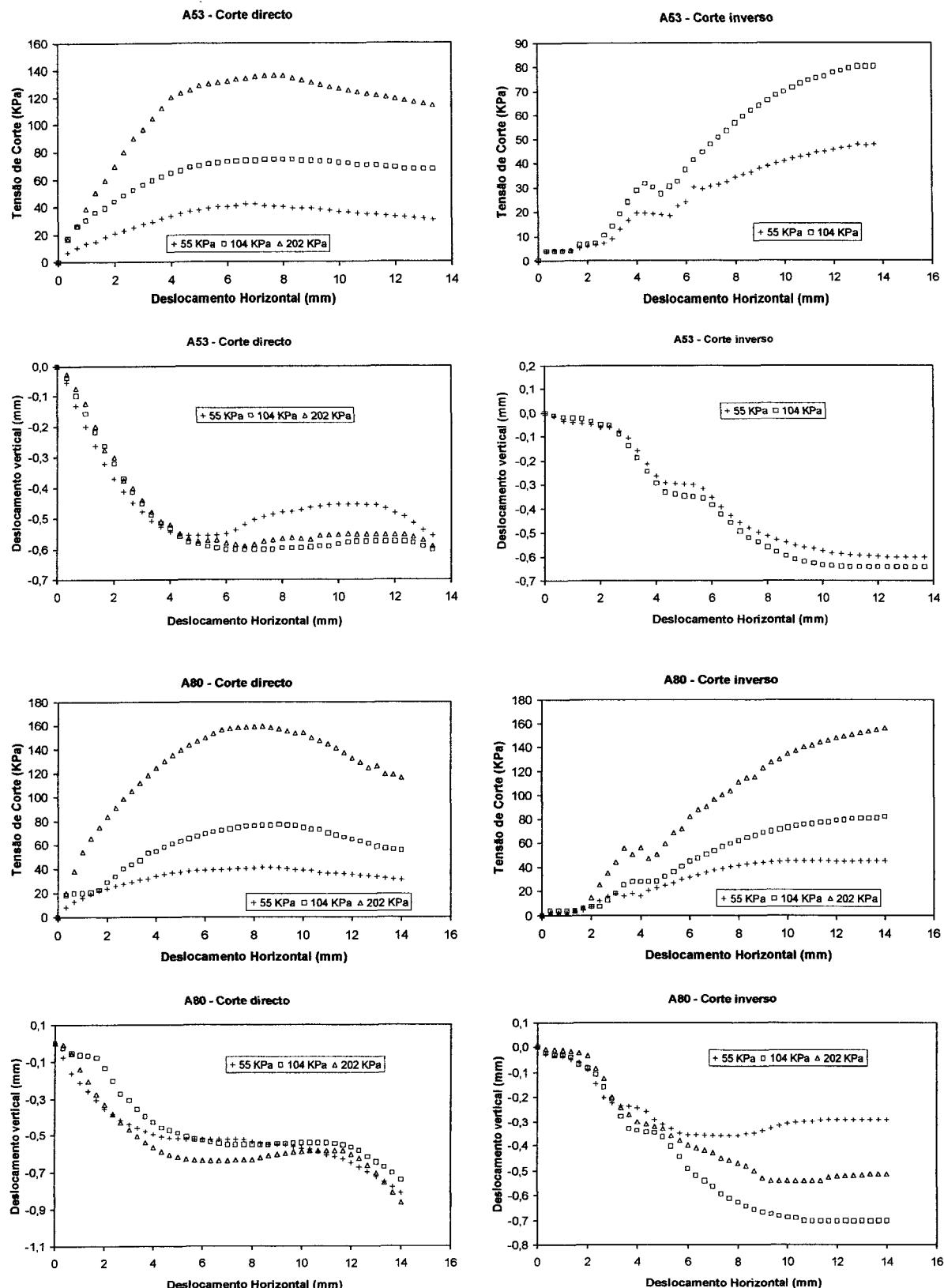


Figura 5.67 – Gráficos dos ensaios de corte de directo e inverso em amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.

Por outro lado, analisando os valores dos mesmos parâmetros obtidos no ensaio de corte inverso, verifica-se que o ângulo de atrito não sofreu grandes oscilações, enquanto que a coesão aumentou nos dois solos; facto que possivelmente se explica com a já mencionada entrada de água na superfície de rotura durante o processo de corte directo, e que pode ter contribuído para um aumento das forças de atracção electrostática entre as partículas da matriz fina.

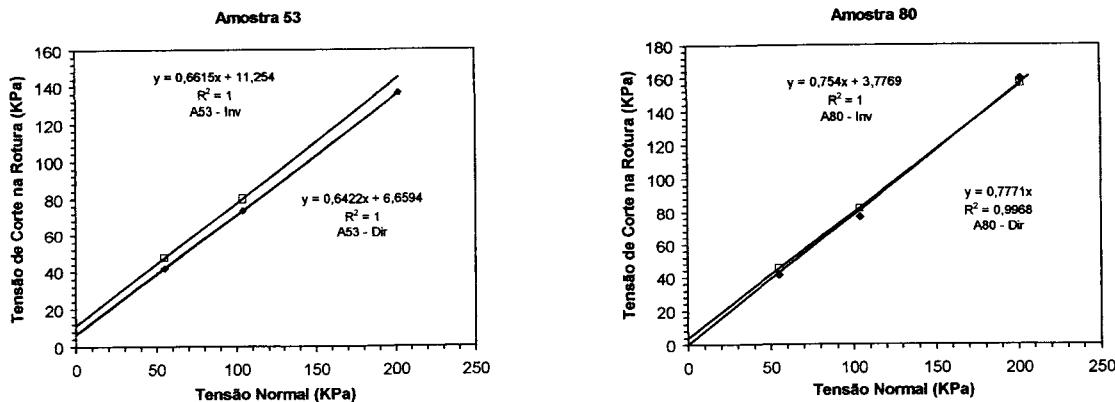


Figura 5.68 – Rectas de Coulomb obtidas dos ensaios de corte directo e inverso em amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.

b) Ensaio triaxial

Realizaram-se dois ensaios triaxiais em amostras remoldadas do solo 53, com o cuidado de reproduzir as características físicas iniciais dos provetes de 102 mm de diâmetro, de acordo com as características físicas determinadas *in situ*. A diferença proporcionada aos dois ensaios consistiu em saturar ($S > 95\%$) e consolidar o solo nos três provetes de um ensaio traxial-CU antes de o submeter à rotura, enquanto que no outro ensaio traxial-UU, o solo foi cortado em condições não saturadas e mantendo o teor de água inicial semelhante ao estado natural. As tensões confinantes de 50, 100 e 200 KPa, e a velocidade de deformação de 0,2 mm/min., na fase de corte, foram iguais em ambos os ensaios.

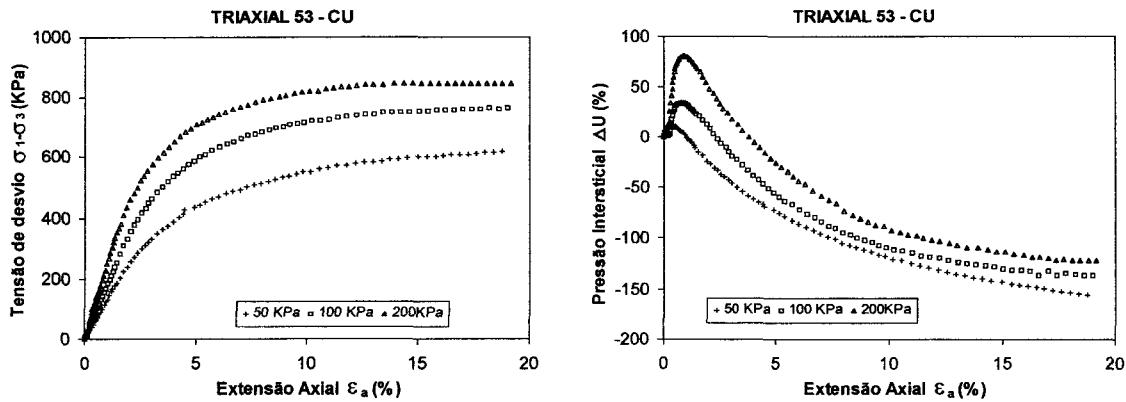
Os valores dos parâmetros físicos e de resistência obtidos no ensaio triaxial CU e UU, constam nos Quadros 5.86 e 5.87, respectivamente. Para cada ensaio triaxial apresentam-se os gráficos resultantes na Figura 5.69 e as respectivas envolventes de rotura na Figura 5.70.

Quadro 5.86 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial do tipo consolidado, não drenado (CU), em amostra remoldada de solo residual do granito de Marvão (Nisa).

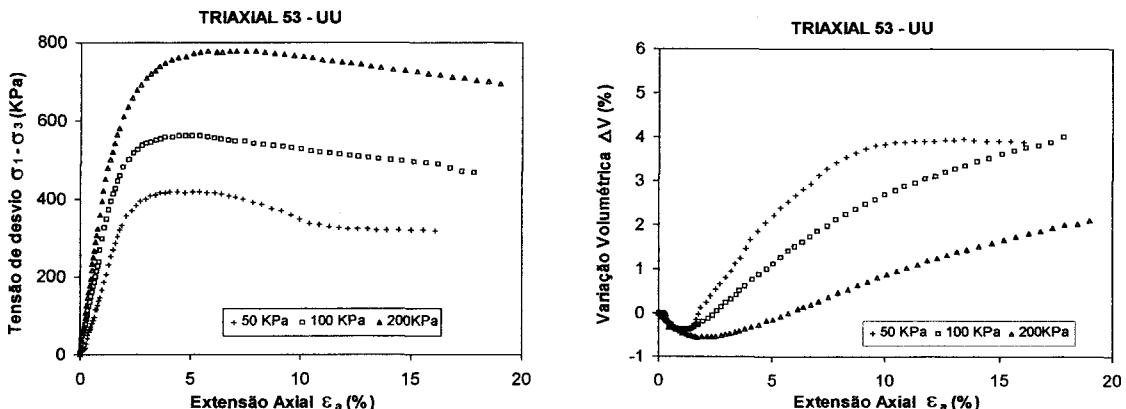
σ'_c (KPa)	Parâmetros físicos iniciais e finais				Parâmetros geotécnicos obtidos				
	γ_d (KN/m ³)	w_i (%)	S (%)	w_f (%)	k (m/s)	Eti (MPa)	A _f	coesão	ângulo de atrito
50	16,65	12,8	95,0	18,6	$9,9 \times 10^{-7}$	13,074	0,255	$c_{cu} = 0$ KPa	$\phi_{cu} = 30,0^\circ$
100	16,60	12,7	96,6	18,6	$3,8 \times 10^{-7}$	17,768	0,180		
200	16,50	12,7	97,2	18,7	$7,5 \times 10^{-7}$	24,458	0,145		

Quadro 5.87 – Valores dos parâmetros determinados no ensaio triaxial-UU, em amostras não saturadas de solo residual do granito de Marvão (Nisa).

σ_c (KPa)	Parâmetros físicos iniciais				Parâmetros geotécnicos obtidos		
	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	Eti (MPa)	coesão	ângulo de atrito
50	17,36	0,514	12,8	66,99	17,962	$c_u = 71,49$ KPa	$\phi_u = 33,2^\circ$
100	17,36	0,514	12,8	66,99	28,948		
200	17,36	0,514	12,7	66,22	39,434		



a)



b)

Figura 5.69 – Curvas dos ensaios triaxiais a) CU e b) UU, em amostras remoldadas de solo residual do granito de Marvão do complexo eruptivo de Nisa.

Pela análise comparativa das curvas ‘tensão-extensão’ (Figura 5.69), pode-se verificar que no caso do triaxial CU, há ausência de dilatância na rotura, o que pode revelar a perda de imbricamento dos grãos, ou seja, devido à distribuição granulométrica do solo e condições do ensaio CU, a estrutura passa a ser uniforme, com os grãos mais grosseiros (grãos de quartzo e feldspato) disseminados na matriz fina do solo. O solo perde a tendência para o aumento de volume. Por outro lado, o comportamento dilatante na rotura é evidente nas curvas do triaxial UU, em que devido a um certo imbricamento que foi preservado (solo não saturado, e não consolidado), leva a que se gerem forças adicionais de galgamento entre as partículas. Esta

interpretação é reforçada com a curva ‘variação volumétrica *versus* extensão axial’ do respectivo ensaio. No que respeita às curvas ‘variação da pressão intersticial *versus* extensão axial’, é notória a evolução no sentido dos valores negativos, ou seja, a tendência para o efeito de sucção neste solo.

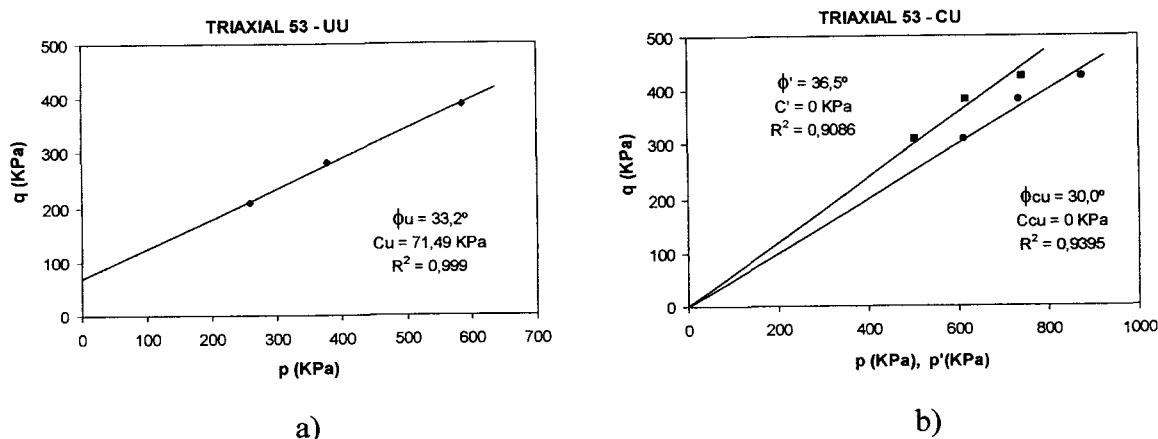


Figura 5.70 – Envolventes de rotura dos ensaios triaxiais em amostras a) não saturadas e b) saturadas, do solo residual do granito de Marvão do complexo eruptivo de Nisa.

Relativamente aos parâmetros de resistência pode-se constatar o seguinte:

- o valor do ângulo de atrito obtido no ensaio triaxial UU é próximo do valor determinado no ensaio de corte directo para o solo em estudo e situa-se entre os valores do ângulo de atrito em termos de tensões efectivas e tensões totais determinados no ensaio triaxial CU; a diferença entre estes dois últimos não é tão relevante como no ensaio do solo residual do granito da Vidigueira (secção 5.7.2.3), o que significa que a influência das pressões intersticiais neste parâmetro da resistência é menor no solo residual do granito de Marvão (Nisa);
- no que respeita à coesão, uma vez mais, ela apresenta um valor nulo nos resultados do ensaio CU, próprio dum solo granular com comportamento puramente atrítico; mas no ensaio UU, este parâmetro atinge um valor considerável, devido em grande parte à coesão aparente (capilar) típica em solos granulares não saturados;
- em ambos os ensaios, o módulo de deformabilidade tangente inicial (E_t) aumenta com o aumento da tensão de confinamento; há pois um acréscimo da rigidez do material com a tensão de confinamento; este acréscimo é mais nítido em materiais remexidos; contudo, em condições não drenadas, o módulo de deformabilidade é menor, porque há menores deformações axiais e a variação de volume é impedida; assim sendo, em condições de campo, não saturadas e drenadas, deve-se esperar deformações três a quatro vezes maiores que as determinadas no ensaio CU (Lambe & Whitman, 1979).

5.17.2.4 – Compressibilidade

Com o objectivo de obter as características de compressibilidade dos solos residuais de granitos do CEN, colheram-se três amostras indeformadas destes solos, nas quais, depois de devidamente preparadas, foram cravados os anéis de cinco edómetros com diâmetros de 50 e

99 mm. As curvas de compressibilidade destes ensaios apresentam-se na Figura 5.71, assim como os parâmetros físicos iniciais e finais dos provetes e as características de compressibilidade dos mesmos constam nos Quadros 5.88 e 5.89, respectivamente.

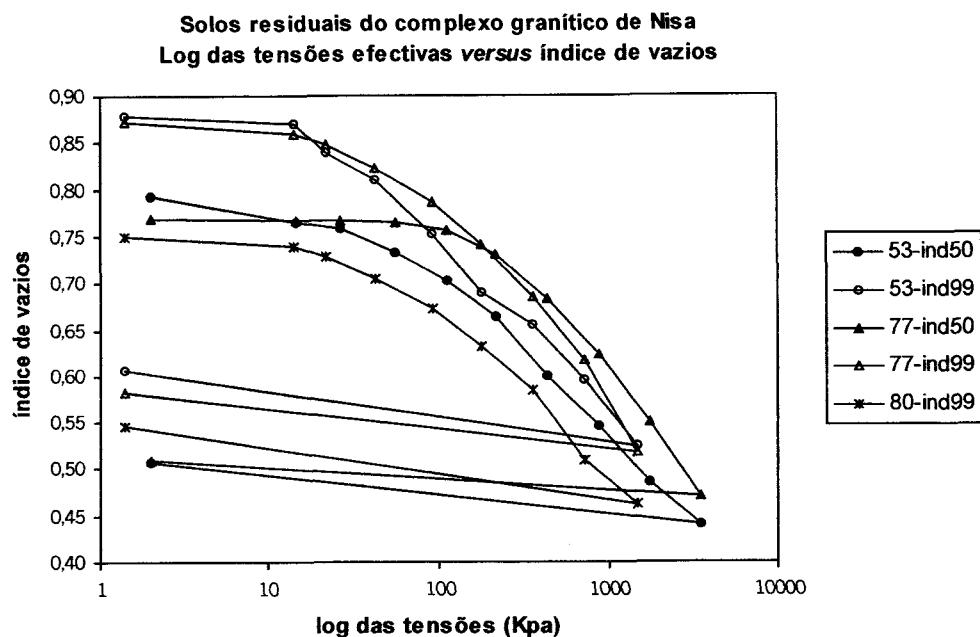


Figura 5.71 – Curvas de compressibilidade respeitantes a amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.

Quadro 5.88 – Parâmetros físicos, iniciais e finais, de amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa, submetidas ao ensaio edométrico.

Amostras indeformadas	Parâmetros físicos iniciais					Parâmetros físicos finais		
	γ_o (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e_i	w_i (%)	S (%)	e_{f1}	e_{f2}	w_f (%)
53-ind50	16,57	14,71	0,792	13,3	44,9	0,440	0,508	18,6
53-ind99	15,55	14,02	0,879	10,9	33,2	0,526	0,606	21,8
77-ind50	16,97	14,81	0,769	14,3	49,1	0,470	0,510	21,4
77-ind99	16,38	13,93	0,873	17,8	54,2	0,518	0,582	24,1
80-ind99	17,75	14,91	0,749	19,3	68,3	0,462	0,546	21,4

Pela análise das curvas de compressibilidade, pode-se constatar que para um mesmo solo, o ponto de cedência, ou seja, o início da desestruturação concretiza-se para tensões mais elevadas, no caso das amostras mais pequenas (diâmetro = 50 mm), relativamente às de maior diâmetro (90 mm); o que se repercute inevitavelmente nas respectivas tensões de pré-consolidação “virtual” (σ'_p), como se pode comprovar pelos valores expostos no Quadro 5.89. Para a explicação deste facto, contribuem naturalmente, os respectivos índices de vazios iniciais (Quadro 5.88), mas é indubitavelmente importante a influência da interacção anel-amostra, que é superior nas amostras mais pequenas. Devido à menor dimensão dos

provetes e às características intrínsecas destes solos (grãos da dimensão da areia ligados entre si por ligações ténues de material mais fino), a estrutura suporta maiores tensões verticais efectivas, porque é mais difícil as partículas encontrarem arranjos de maior estabilidade, comparativamente às amostras maiores; como consequência, os próprios índices de compressibilidade (C_c) são maiores nestas últimas (Quadro 5.89).

Quadro 5.89 – Parâmetros de compressibilidade deduzidos do ensaio edométrico realizado em amostras indeformadas dos solos residuais de granitos do complexo eruptivo de Nisa.

Amostras indeformadas	Características de compressibilidade						
	a_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	m_v (10^{-4} KPa $^{-1}$)	c_v (10^{-8} m 2 /s)	k (10^{-10} m/s)	σ'_p (KPa)	C_c	C_s
53-ind50	5,9 - 0,3	3,32 - 0,17	10,4 - 5,69	13,12 - 0,10	93	0,16	0,02
53-ind99	6,2 - 0,2	3,30 - 0,15	16,03 - 11,09	10,62 - 0,29	63	0,23	0,03
77-ind50	1,4 - 0,4	0,84 - 0,29	10,4 - 1,66	0,88 - 0,05	295	0,26	0,01
77-ind99	9,6 - 1,3	5,17 - 0,83	7,48 - 3,37	3,90 - 0,30	178	0,33	0,02
80-ind99	10,6 - 0,6	5,97 - 0,42	5,30 - 2,42	3,19 - 0,10	126	0,16	0,03

Chama-se a atenção, novamente, para a perturbação das amostras destes solos que é sem dúvida maior nos provetes mais pequenos; assinala-se a diferença entre os valores do índice de vazios inicial (e_i), de amostras com 50 e 99 mm de diâmetro, respectivamente, sabendo à partida que os provetes foram obtidos do mesmo “bloco” indeformado de solo residual.

Também é certo que, quanto menor for a dimensão da amostra mais dependente fica das condições fronteira (Folque, 1996).

Confirma-se uma vez mais a dependência do índice de compressibilidade (C_c) relativamente ao índice de vazios inicial (e_i).

É notória a maior variabilidade dos valores dos coeficientes de compressibilidade nos provetes de maiores dimensões, relativamente aos de menores dimensões, ao longo do ensaio, facto que confirma a maior facilidade no deslocamento das partículas nos anéis maiores; esta situação, aproxima-se mais da verificada no maciço terroso residual, em condições naturais.

Subsiste ainda um aspecto que interessa salientar, e que se prende com o aspecto das curvas de compressibilidade. Pela forma destas curvas, em particular as pertencentes ao solo da amostra 53, pode-se deduzir que não há apenas um único ponto de cedência, mas vários, consoante os incrementos da tensão vertical efectiva, o que se traduz por uma desestruturação progressiva ao longo do ensaio, ou seja, as ligações interparticulares não unem os grãos com a mesma intensidade de força; assim quebram-se as ligações mais frágeis nos primeiros patamares de tensão, enquanto que as mais resistentes vão-se quebrando à medida que a tensão vertical vai aumentando até ao final do ensaio, onde não sobram ligações e o material se comporta praticamente como um solo sedimentar.

Quadro 5.90 – QUADRO SÍNTSE DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS RESIDUAIS DOS GRANITOS DO COMPLEXO ERUPTIVO DE NISA.

SOLOS		53	77	78	79	80	81
LOCALIZAÇÃO		Marvão	Alpalhão	Arez	Tolosa	Beirã	Nisa
DESCRIÇÃO		Areia siltosa, branca acinzentada.	Areia siltosa, cinzenta.	Silte argilo-arenoso, vermelho acastanhado.	Areia siltosa, cinzenta clara.	Areia siltosa, branca acinzentada.	Cascalho bem graduado, amarelo acastanhado.
PROPRIEDADES FÍSICAS "IN SITU"	W_o (%)	9,2	16,0	21,0	12,3	14,2	11,7
	γ_o (KN/m ³)	16,97	18,54	19,52	19,52	18,24	18,83
	γ_d (KN/m ³)	15,59	15,99	16,08	17,36	15,99	16,87
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	< 4,75 mm	98,47	100	92,43	93,79	100	20,68
	< 2,00 mm	84,72	99,98	78,71	75,16	99,47	11,37
	< 0,425mm	42,95	78,00	63,50	49,45	60,92	4,88
	< 0,075mm	17,05	29,83	54,87	27,94	22,56	1,90
	< 0,002mm	1,04	3,16	29,2	8,13		
LIMITES DE ATTERBERG	w_L (%)	33	NR	52	34	28	33
	w_{Lc} (%)	38	37	58	41	36	39
	w_p (%)	31	NP	35	26	NP	27
	I_p (%)	2	NP	17	8	NP	6
	I_{pc} (%)	7	NP	23	15	NP	12
CLASSIFICAÇÃO	UNIFICADA	SM	SM	MH	SM	SM	GW
	A.A.S.H.T.O.	A-1-b	A-2-4	A-7-5 (8)	A-2-4	A-2-4	A-1-a
COMPACTAÇÃO	γ_d máx. (KN/m ³)	16,87	16,80	16,57	17,85	16,08	19,91
	Wópt. (%)	16,8	18,0	19,3	14,2	17,5	7,9
EQUIVALENTE DE AREIA	E.A. (%)	49	19	14	17	35	45
MATÉRIA ORGÂNICA	M.O. (%)	0,11	0,13	0,26	0,15	0,12	0,03
EXPANSIBILIDADE	Exp. (%)	8,2	6,5	15,3	9,1	7,9	10,4
PERMEABILIDADE	k (m/s)	$3,4 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$		$4,1 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$
PÉSOS ESPECÍFICO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	γ_s (KN/m ³)	26,28	26,09	26,38	26,09	25,99	26,48
ÍNDICE DE VAZIOS "IN SITU"	e_o	0,686	0,632	0,640	0,503	0,626	0,570
POROSIDADE "IN SITU"	n (%)	40,7	38,7	39,0	33,5	38,5	36,3
	ϕ (o)	32,7 (ind.)				37,9 (ind.)	
CORTE DIRECTO	c (KPa)	6,7				0	
	C_c	0,23	0,33			0,16	
	C_s	0,03	0,02			0,03	

CAPÍTULO 6

ENSAIOS GEOTÉCNICOS *IN SITU*

6 – ENSAIOS GEOTÉCNICOS *IN SITU*

6.1 – Ensaios de laboratório *versus* ensaios *in situ*

Actualmente, tem vindo a ser considerado que os dois tipos de ensaios, no laboratório e *in situ*, não se substituem, mas pelo contrário complementam-se, uma vez que ambos apresentam vantagens e inconvenientes.

Os ensaios *in situ* têm lugar nas condições ambientais, o que por exemplo é fundamental na determinação das tensões *in situ*. É vantajoso executar estes ensaios quando são interceptadas formações nas quais não seja possível efectuar uma amostragem representativa, existindo equipamentos que permitem a obtenção de informação contínua, como por exemplo o CPT. Assume grande importância o facto de o volume de solo analisado ser muito maior do que o correspondente a uma amostra de laboratório. No entanto, as condições fronteira são, em geral, mal conhecidas, bem como as condições de drenagem durante o ensaio, não sendo viável o estudo em termos de tensões efectivas.

Os ensaios de laboratório têm a grande vantagem de serem bem definidas as condições de fronteira e bem controladas as condições de drenagem. As características físicas e químicas do solo a estudar são bem conhecidas e também as trajectórias de tensões, que são previamente seleccionadas e depois impostas durante o ensaio. O campo de deformações é geralmente uniforme para níveis baixos de solicitação. Quanto à velocidade de imposição das solicitações, ela é em regra muito maior do que a que realmente se verifica em obra. A principal desvantagem dos ensaios no laboratório prende-se com a dificuldade de dispor de amostras realmente indeformadas, ou seja verdadeiramente representativas. A falta de representatividade agrava-se em solos que apresentam heterogeneidade a uma certa escala, dada a desproporção entre as dimensões da amostra relativamente ao maciço. Merece ainda atenção, o facto das condições fronteira poderem ser afectadas pelo contacto entre a amostra e o aparelho de ensaio.

6.2 – Ensaios penetrométricos

A prospecção geotécnica de terrenos tem como principais objectivos, determinar a sequência, espessura, extensão e identificação aproximada dos diferentes tipos de maciços terrosos ou rochosos, assim como a profundidade a que se situa o nível freático. A realização de ensaios simples *in situ* permite avaliar as condições de recolha das amostras e prever as propriedades físicas dos solos ou rochas, antes, durante e após a construção das obras previstas.

No caso de condições erráticas do solo ou com estruturas secundárias e quando não for possível ou for oneroso obter amostras representativas suficientes, recorre-se em geral a ensaios *in situ* apropriados, ou seja, abrangendo extensões apreciáveis de terreno de forma a envolver e englobar o comportamento das ocorrências erráticas.

As sondagens mecânicas de penetração consistem em forçar através do solo, e observar a resistência à penetração ou arranque, de um varão envolvido por uma manga metálica, munido ou não de cabeças de penetração.

As variações de resistência obtidas dão indicações dos vários horizontes de solo atravessados e os valores numéricos dessas resistências, permitem inferir algumas das propriedades físicas

dos solos. As sondagens mecânicas de penetração podem pois considerar-se como um método de prospecção e um ensaio *in situ*.

Aproveitar a informação, qualitativa e quantitativa, que se pode obter da simples operação de cravar um dispositivo penetrante num maciço, foi expediente que se apresentou, como óbvio, desde as fases primitivas da sistematização da prospecção geotécnica (Folque, 1996). Surgiram assim numerosos “penetrómetros”, dispositivos mais ou menos normalizados, em regra actuados por percussão, e de cujas indicações se deduziram correlações com características mecânicas dos solos ensaiados. Muitos desses equipamentos já foram abandonados e outros só tiveram aceitação regional.

Porém, universalizaram-se três tipos de penetrómetros, de cujos resultados se tem feito largo uso para identificação, caracterização e quantificação de características mecânicas de terrenos: o ensaio de penetração SPT – “Standard Penetration Test”, o ensaio de penetração estática CPT – “Cone Penetration Test” e, os ensaios penetrométricos dinâmicos com ponteiras cónicas DP – “Dynamic Probing”. Destes últimos destacam-se, o penetrómetro dinâmico leve (PDL ou DPL) e o penetrómetro dinâmico super-pesado (DPSH), porque além de serem os mais utilizados foram os que se aplicaram no estudo de campo dos solos residuais de rochas granítóides do Alentejo. A descrição dos referidos penetrómetros assim como os procedimentos gerais relativos aos ensaios no campo constam no Capítulo 2 – “Metodologia aplicada”.

Vários autores se dedicaram ao estudo dos referidos ensaios, cujas descrições, críticas e recomendações, se encontram em trabalhos, tais como: Meyerhof (1956); Terzaghi & Peck (1967); Sanglerat (1972); Schmertmann (1970, 1971, 1979); Kovacs *et al.* (1977, 1978); Lambe & Witman (1979); Kovacs (1979); Riggs (1986); Chang (1988); Folque (1982, 1988 e 1996); Castro (1988); Novais Ferreira *et al.* (1990); Moitinho de Almeida, (1991); Ladeira & Ferreira Gomes (1992).

6.2.1 – Ensaio SPT

O ensaio de penetração com um amostrador, introduzido no início do século XX, foi adoptado e divulgado, na década de 40, sob a designação de SPT, normalizado pela norma ASTM 1586-63T (Sanglerat, 1972). O ensaio fornece informações referentes à litologia e rigidez dos solos atravessados pelo amostrador normalizado, que tomou o nome de Terzaghi.

A execução do ensaio SPT generalizou-se, primeiramente, na América do Norte e do Sul, mas pode dizer-se que a sua utilização se tornou universal a partir do aparecimento do tratado clássico “Soil Mechanics in Engineering Practice” de Terzaghi & Peck (1967). Esta obra, com efeito, além de descrever o ensaio, apresenta algumas classificações de solos e quantificações das suas propriedades em função do número N, de golpes de pilão correspondentes à cravação de um certo comprimento do amostrador. Estas classificações de solos (Terzaghi & Peck, 1967), com base nos valores dos ensaios SPT, ainda hoje são aceites, no essencial.

Entrou-se em seguida numa fase acrítica de utilização dos resultados dos ensaios SPT. Negligenciaram-se certos aspectos da sua rotina que não estavam normalizados, nem sempre se atendeu aos erros grosseiros que podem resultar da sua realização descuidada como, má limpeza do furo, má apreciação da altura de queda do pilão, etc., (Folque, 1996).

Na interpretação dos ensaios SPT é necessário considerar diferentes circunstâncias que interferem nos resultados. Alguns deles não podem ser quantificados como por exemplo, os factores humanos. Entre os factores abrangidos por uma normalização que minimize a variação, citam-se as características do furo, o ritmo de percussão, o tipo de equipamento, a profundidade do ensaio, a situação relativamente ao nível freático e as características do solo (Moitinho de Almeida, 1991).

De facto, a denominação “SPT” é aplicada a equipamentos bastante diferentes dum país para outro. Até nos USA, os aparelhos utilizados apresentam algumas variantes. Os valores de resistência à penetração assim determinados são dificilmente comparáveis, levando em conta a variedade de amostradores e de pesos para o pilão (Ladeira, 2002).

Uma fase de revisão crítica foi iniciada recentemente, orientando-se os trabalhos no sentido de melhorar e uniformizar alguns parâmetros, mas a sua discussão excede o âmbito desta dissertação. Chamar-se-á atenção apenas para certos aspectos mais importantes.

Assim, com o objectivo de “uniformizar” os parâmetros em estudo neste ensaio, além das grandezas que inicialmente se normalizaram, encontram-se, actualmente, também especificadas prescrições relativas ao tipo e peso de vara por metro, cadência de percussão, coxim de recebimento do impacto do pilão e sistema disparador do pilão. Apesar disso, há um aspecto neste ensaio que constitui indubitavelmente uma limitação à reprodutibilidade dos seus resultados: efectuando-se os ensaios a diversas profundidades, têm que ser usados comprimentos muito diferentes de trens de varas. Quer dizer que o resultado do ensaio tem que ser ponderado em termos da profundidade a que é realizado por duas razões, cada uma conducente a um factor correctivo: efeito da tensão média existente no solo ensaiado devido ao peso do solo suprajacente; efeito relacionado com a energia dissipada no trem de varas (Folque, 1996).

Outros factores que afectam a reprodutibilidade do valor de $N(SPT)$ são enumerados e descritos na literatura da especialidade: Gibbs & Holtz (1957); Ireland *et al.* (1970); Vargas (1970); Mello (1972); Kovacs & Salomone (1982); Bowles (1988).

Cassan (1982) recomenda que o ensaio SPT deveria ser utilizado somente em terrenos predominantemente arenosos ou no máximo siltosos. Convém relembrar que este ensaio foi desenvolvido por Terzaghi em areias e os ensaios foram realizados a pequenas profundidades. Hoje o ensaio é feito, com algum atrevimento, a qualquer profundidade e em qualquer tipo de solo. Após muitos anos de ensaios e comparações com outros tipos de ensaios, prevalece a ideia de que o ensaio SPT é válido em areias ou siltos compactos, desde que o nível freático esteja abaixo da zona de ensaio (Ladeira, 2002). Estas condições são as que na verdade, se verificam na maioria dos casos dos solos residuais de rochas granítóides, no Alentejo.

Os estudos mais recentes têm procurado esclarecer a validade destes ensaios. Os resultados obtidos devem ser criteriosamente analisados e encarados como valores semiquantitativos ou apenas qualitativos (Salas *et al.*, 1976; Folque, 1988; Saiki, 1983 *in* Moitinho de Almeida, 1991). Considerando que as dificuldades encontradas não devem inviabilizar o ensaio, outros autores apresentaram, também, propostas de correcções ao valor de $N(SPT)$, nomeadamente Sanglerat (1972); Peck *et al.* (1974); Schmertmann (1978); Uto & Fuyuki (1981); Liang (1983); Seed (1985); Riggs (1986); Skempton (1986); Bowles (1988); Stroud (1988) e Mineiro (1994).

A larga aceitação do ensaio e os numerosos resultados existentes, contribuíram para que certos autores apresentassem propostas de correlações entre o N(SPT) e outros valores de ensaios como o CPT (Castro, 1988) e o DPL e DPSH (Viana da Fonseca, 1996), com outros parâmetros dos solos dos quais se destacam: densidade relativa, ângulo de atrito interno e módulo de deformabilidade (solos arenosos), resistência à compressão simples (solos coerentes), assentamentos e capacidade de carga.

Dada a grande variedade de factores, já referidos, que afectam os resultados do SPT, a fiabilidade das correlações existentes pode ser duvidosa, e por isso aconselha-se uma aplicação cautelosa. Se possível, e de acordo com as condições e objectivos da caracterização geotécnica no campo, recomenda-se a execução de outros tipos de ensaios para comparação e complemento, como por exemplo: CPT, DPL, DPSH, pressiómetro, ensaios geofísicos, etc.

Apesar das limitações do ensaio SPT, já referidas, os dados obtidos provam tratar-se de um ensaio eficaz e os resultados podem ser melhorados desde que, sejam respeitadas as normas do ensaio e se registem todas as condições (Duarte, 1993).

6.2.2 – Ensaio CPT

Existem muitos e variados tipos de penetrómetros estáticos em utilização corrente. O mais generalizado e o que em Portugal mais se utiliza é o “penetrómetro holandês”, assim designado por originalmente ter sido desenvolvido pelos holandeses, pela necessidade de realizar prospecção económica, rápida e credível em solos moles. É indiscutivelmente um equipamento mais sofisticado e preciso do que o dispositivo SPT. Dispõe-se hoje de aparelhos muito aperfeiçoados, mecanicamente complexos mas de grande precisão, dotados de sistemas de leitura e registo automáticos.

Fundamentalmente, o aparelho consiste numa haste que tem na ponta um cone de dimensões normalizadas, e que se desloca sem fricção no interior de uma vara tubular. O ensaio consiste em provocar, por meio de dispositivo mecânico adequado, a cravação do aparelho no solo de forma a obter, em separado, a resistência de ponta (q_c) e a resistência lateral (f_s), (Folque, 1996).

Atendendo a que se vai provocar a penetração da extremidade do dispositivo no terreno, deve ter-se em atenção alguns aspectos como por exemplo os relativos à velocidade de penetração e à periodicidade com que se devem efectuar leituras (Capítulo 2 – “Metodologia aplicada”). Factores como o diâmetro das ponteiras, pondo em evidência o efeito escala e a “des”continuidade na penetração e leituras descontínuas (Sanglerat, 1972), influenciam os resultados do ensaio CPT.

O estado de tensão no solo, durante o decorrer do ensaio de penetração, varia de ponto para ponto, desde tensões muito baixas até tensões muito altas onde até se atinge o estado de rotura, e a que corresponderão parâmetros de deformabilidade certamente muito diferentes; a resistência medida será função destes parâmetros. Ora o ensaio de penetração só fornece duas medidas: resistência de ponta e resistência total (ou lateral). Não sendo a resistência lateral uma característica intrínseca do solo, mas antes do contacto solo-haste, pode não ter grande significado para a resolução do problema (Castro, 1988).

É importante, também, assinalar o efeito da água que, quando o solo está saturado preenche completamente os vazios entre partículas. Se a água não se pudesse escoar, a

deformabilidade do solo seria praticamente a deformabilidade da água que, como é sabido, tem uma compressibilidade volumétrica muito pequena. Mas os solos são permeáveis, (principalmente os solos residuais em estudo) e portanto a água escoa-se mais ou menos lentamente conforme a permeabilidade e condições fronteira; assim a deformabilidade que se poderá medir dependerá do estado de tensão neutra existente e que com o tempo tende a anular-se. É curioso fazer notar que por vezes um aumento brusco da resistência acusado na ponteira não é mais do que ter-se atingido o nível freático.

Nota-se que, na realidade, são muitas as dificuldades para determinar as características de um solo a partir do ensaio de penetração, mas com base em comparações com resultados de outros ensaios têm sido elaborados gráficos e tabelas, que por considerações mais ou menos empíricas estabelecem um relacionamento entre os resultados dos ensaios e as características do solo atravessado, e que, usados com os devidos cuidados, conduzem a resultados práticos aceitáveis. Como exemplo refere-se o gráfico, que relaciona a resistência de ponta e N(SPT), para solos coerentes e não coerentes, com o módulo de deformabilidade, resistência à compressão simples ou ângulo de atrito (“Memória nº 488-LNEC, 1981” *in Castro, 1988*).

Outras classificações de solos baseadas nos resultados do CPT, têm vindo a ser utilizadas e podem ser consultadas em trabalhos de vários autores, tais como: Schmertmann (1970, 1978); Searle (1979); Douglas *et al.* (1981); Senneset *et al.* (1982); Robertson & Campanella (1983); Burland & Burbidge (1985); Robertson (1990); Rocha Filho (1991); Puppala *et al.* (1995); Lunne *et al.* (1997); Robertson & Mayne (1998).

Recomenda-se precaução no uso de correlações entre os resultados do CPT e os parâmetros mecânicos, pois a sua aplicabilidade deve ser limitada ao tipo de solo ensaiado (textura, angulosidade, mineralogia, compacidade ou consistência, etc.).

De um modo geral, pode dizer-se que os ensaios de penetração estática fornecem elementos de maior confiança e de aplicação mais fácil e menos empírica do que os do SPT. Os maiores inconvenientes consistem em: não permitir a observação visual das amostras; ter uma capacidade de penetração inferior, logo atinge menores profundidades; dificuldade em ultrapassar pequenos blocos, ou seixos; maior dificuldade em manusear o equipamento e fixá-lo ao terreno. Tal como no ensaio SPT, na interpretação dos resultados do ensaio CPT, é essencial a identificação e caracterização dos solos interceptados.

6.2.3 – Ensaios DP – cones penetrométricos dinâmicos

Os cones penetrométricos dinâmicos à semelhança dos estáticos, foram desenvolvidos na Holanda, devido à necessidade de estudar as fundações nas antigas zonas de “polders” em que os métodos até então empregues se revelavam, na maior parte dos casos, insuficientes, morosos e dispendiosos. O ensaio SPT, desenvolvido nos Estados Unidos não conseguia impor-se como técnica de investigação rápida e eficaz em países como a Holanda, devido à posição do nível freático próximo da superfície, e onde os solos areno-siltosos refluam facilmente para dentro do tubo de revestimento da sondagem, criando uma zona extensa de solo perturbado, que não oferecia resistência à penetração do amostrador de Terzaghi, e consequentemente os valores obtidos muito abaixo do real, obrigavam à aplicação de soluções onerosas para as fundações (Ladeira, 2002). Com os cones penetrométricos dinâmicos a investigação abaixo do nível freático passou a não constituir problema, sendo uma das razões pela qual estes ensaios são, actualmente, os mais utilizados em prospecção geotécnica.

O método reveste-se de grande simplicidade e, hoje, são numerosos os trabalhos com resultados, reflexões, críticas e correlações relativas aos ensaios penetrométricos e suas aplicações, o que contribuiu, até há pouco tempo, para uma difícil uniformização, mais complicada ainda pela grande dispersão de tipos de equipamento.

A utilização do referido método, constitui a forma mais simples de se obter, no campo, o grau de compacidade ou consistência de um solo e consequentemente a sua capacidade de carga. Consiste na penetração dinâmica de uma ponteira cónica ligada à ponta de varas metálicas e accionada por uma força de choque, queda de um pilão, (Capítulo 2 – “Metodologia aplicada”). Trata-se, em primeira análise, de uma indicação qualitativa de resistência do solo.

Sendo um ensaio que tem aplicações muito vastas, exige, no entanto, boa reprodutibilidade e compatibilidade de resultados em condições geotécnicas similares, só possíveis a partir de uma normalização de equipamentos e metodologias de ensaio (Anon, 1989). Nesta publicação, apresentam-se as características mais importantes que se distinguem em quatro níveis energéticos (DPL, DPM, DPH e DPSH), e que constam no Quadro 2.2. Note-se que em termos de energia cinética, o DPSH (penetrómetro dinâmico super-pesado) se assemelha ao SPT.

Em comparação com os outros métodos de penetração (SPT e CPT), os ensaios DP têm a vantagem de, pela grande manobrabilidade dos equipamentos, porque são muito mais leves, acederem a mais locais e exigirem menor mobilização de mão-de-obra, principalmente se forem mecanizados, estando associados a grandes rendimentos. Ao contrário do SPT, apresentam um registo do número de golpes em profundidade de uma forma contínua, o que permite detectar pequenas incidências litográficas que os métodos descontínuos não permitem.

A possibilidade de utilizar mais do que uma energia de penetração permite cobrir uma vasta gama de tipos de solos, desde argilas moles ou rijas, siltes, areias e cascalhos, ou solos residuais. Além disso, desde que haja cuidados em evitar o efeito de eventuais atritos laterais por colapso do furo, podem atingir grandes profundidades. Apresentam-se como os métodos mais adequados para a avaliação da posição do firme rochoso mas, em especial, como detectores de obstáculos pontuais ou singularidades do maciço natural ou criados pelo homem, como são o caso de: estruturas enterradas, poços, minas, etc. (Viana da Fonseca, 1996).

Em obras de compactação em aterros e de reforço de solos, particularmente em compactação dinâmica e vibrocompactação, este método pode constituir um bom controlo de qualidade (Novais Ferreira *et al.*, 1990).

Para interpretação dos resultados, ou seja, do número de pancadas, N, correspondentes à penetração de cada 10 cm de vara, recorre-se a determinadas metodologias interpretativas (Nixon, 1988). Para avaliar a resistência à penetração do terreno (Rp), é usual utilizar a “fórmula dos holandeses”, (expressão 2.2).

A tendência corrente nos ensaios DP consiste na comparação do valor daquela resistência dinâmica (Rp) com a resistência de ponta do CPT (qc). Esta hipótese não é bem fundamentada pois trata-se de procedimentos conceptualmente diferentes, um estático e outro

dinâmico, sendo que os solos, se comportam em geral distintamente quando solicitados de uma forma e de outra (Viana da Fonseca, 1996).

Constata-se que, para pequenas profundidades até 10 m, a diferença entre tomar directamente o valor do número de pancadas (N_{DP}) ou o R_p da “fórmula dos holandeses” não é significativa, pelo que certos autores aconselham o uso directo de N_{DP} nas correlações com os parâmetros mecânicos do solo (Castro, 1988).

Verifica-se que a energia posta em jogo em cada pancada, no SPT, é 10 vezes superior ao DPL. Mas o amostrador do SPT, tem uma secção transversal de cerca de 3 vezes a secção transversal do cone do DPL, e a penetração do SPT é também superior 3 vezes à do DPL. Na realidade, isto significa que, para o mesmo terreno e em condições idênticas, os resultados do DPL e do SPT não diferem muito, pois a resistência oposta à penetração do amostrador SPT é muito superior à resistência oposta à penetração do cone do DPL, para a realização dos ensaios conforme estão normalizados. Claro que se trata de um raciocínio simplista, uma vez que não se está a considerar, no SPT, o atrito lateral do terreno exterior e da penetração da “amostra” no interior do tubo que não exige a mesma resistência que a penetração de um cone maciço, como por exemplo o DPSH (Castro, 1988).

O ensaio com cones penetrométricos dinâmicos (DP), tal como os ensaios já referidos SPT e CPT, apresentam limitações, que não interessa aqui explorar, por não se enquadrarem nos objectivos da presente dissertação, todavia, adianta-se que todas elas, podem ser superadas ou minimizadas se o técnico/investigador que as realizar/interpretar, tiver um bom conhecimento da geologia local e regional onde se realizam os ensaios.

6.3 – Ensaios *in situ* e solos residuais

Segundo Blight (1997), os ensaios de campo são vantajosos para os solos residuais pelas seguintes razões:

- i) a perturbação causada pela amostragem, transporte, armazenamento, etc., pode ser praticamente eliminada, dependendo da técnica utilizada;
- ii) a quantidade de material a ensaiar pode ser aumentada e torna-se mais representativa do maciço terroso.

Existe uma variedade de ensaios disponíveis para medir a resistência de solos *in situ*, quer directamente, ou indirectamente através de correlações empíricas ou semi-empíricas, mas só alguns é que têm larga propagação na investigação *in situ*. O Quadro 6.1 refere-se a estes ensaios e suas limitações.

É fundamental que o técnico/investigador, conheça e domine os métodos de ensaio no campo, as suas capacidades e limitações, variantes de ensaio, e os factores que influenciam os mesmos, para, em primeiro lugar, estar apto a fazer um programa de investigação específico e, posteriormente, analisar e interpretar os resultados.

Os solos residuais são produto da meteorização de rochas de estrutura não homogénea em processos condicionados por factores tão diversos como sejam a topografia, a fracturação original e a composição química e mineralógica, apresentando perfis claramente não homogéneos que exigem, em qualquer método de análise, a consideração desta heterogénea distribuição espacial (Viana da Fonseca, 1996).

Quadro 6.1 – Ensaios de resistência para solos *in situ* (adaptado de Blight, 1997).

Ensaio	Características e limitações
Resistência ao corte directo (no campo)	Geralmente em escavações superficiais; demorado e dispendioso.
Vane test	Somente para solos de grão fino.
Penetrómetro dinâmico ligeiro	Área de contacto limitada; restrito a pequenas profundidades.
Standard Penetration Test	Geralmente usado para solos granulares e argilas rijas, requer um furo aberto; ensaio multifásico.
Cone Penetration Test	Para solos moles/soltos a medianamente rijos/densos; predominantemente de grão fino.
Pressiómetro (autoperfurador ou não)	Para todos os tipos de solos e rochas brandas; requer uma grande qualidade do furo de sondagem; dificuldades de aplicação em solos cascalhentos.
Ensaio de carga com placa	Apenas junto à superfície; usado principalmente para avaliar os assentamentos e a capacidade de carga; oneroso.

Chang (1988) apresenta três factores a ter em conta na selecção dos ensaios *in situ* para a caracterização mecânica de solos residuais:

- i) a variabilidade destes materiais tem que ser bem avaliada;
- ii) a vasta gama de rigidez e resistência que tipifica um dado maciço natural, impõe tecnologias que se adaptem facilmente a respostas diversificadas (equipamentos suficientemente potentes) sem descurar as exigências de uma boa sensibilidade para avaliação paramétrica;
- iii) a interpretação tem que ser adequada a diferentes condições de textura, anisotropia e saturação dos solos.

No Quadro 6.2 apresenta-se um resumo dos parâmetros envolvidos na comparação entre os ensaios analisados por Chang (1988).

Os ensaios com o pressiómetro, dilatómetro ou com placa, são mais utilizados para medir as propriedades de tensão-deformação do solo *in situ*. Somente quando este está prestes a entrar em rotura (o que é difícil acontecer na maioria dos solos residuais), podem ser usados para calcular os parâmetros de resistência (Blight, 1997). Segundo Poulos & Brown (1986), trata-se de ensaios de Classe II, ou seja, além de custo médio a elevado, reflectem o comportamento de um volume restrito de solo. Principalmente por estas razões e devido à grande variabilidade de características inerente à grande maioria de solos residuais, não são os mais indicados para o seu estudo no campo, a não ser em casos especiais de obras concretas com modelos específicos adoptados.

Os ensaios penetrométricos, SPT, DP e CPT, são ensaios indirectos, isto é, não medem directamente os parâmetros de resistência. São ensaios de Classe I, segundo o referido autor, em que devido ao facto de serem mais económicos e relativamente simples de executar, podem-se realizar em maior número sendo possível uma razoável representatividade dos solos. Dependem directamente da resistência do material, mas são influenciados pela compressibilidade do solo e, por isso, nem sempre são completamente satisfatórios para a determinação dos parâmetros de resistência. São, no entanto, ensaios que, quando normalizados, dão com certa acuidade, análises comparativas entre diferentes tipos de solo.

Quadro 6.2 – Comparação entre vários métodos testados *in situ* em solos residuais, segundo Chang (1988) *in* Viana da Fonseca (1996).

Método	Natureza	Custo *	Vantagens/limitações práticas	Aplicabilidade a solos residuais	
				Avaliação da variabilidade +	Avaliação paramétrica +
SPT	Resistência dinâmica indireta	M	Recolha de amostras	A	B
DP	Resistência dinâmica indireta	L-M	Alta mobilidade e velocidade	A	B
CPT	Resistência estática indireta	M	Penetrabilidade moderada	B	B
DMT	Tensão-deformação (ind.)	M	Penetrabilidade moderada	B	B
PMT	Tensão-deformação (ind.)	H	Boa adaptabilidade às condições variáveis do solo	C	A
PLT	Tensão-deformação (ind.)	VH	Aplicável a solos homogéneos	-	A

* L = baixo; M = médio; H = alto; VH = muito alto

+ A = alta; B = moderada; C = limitada; - não aplicável

DMT – dilatômetro de Marchetti

PMT – pressiómetro de Ménard

PLT – ensaio de carga com placa

6.3.1 – O SPT e os solos residuais

A utilização do SPT nos solos residuais tem vindo a ser posta em causa. Blight (1985) refere que o ensaio permite no máximo, um índice grossoiro da resistência e da compressibilidade. Esta crítica tem a sua justificação, porque mesmo quando usado em solos transportados, o ensaio apresenta fraca reproduzibilidade e grande variabilidade. Serota & Lowther (1973) demonstraram que sob condições laboratoriais controladas, os valores de N são reproduzíveis dentro de um desvio padrão de cerca de 15%. A fraca reproduzibilidade do ensaio, deve-se não só à grande variabilidade dos solos e princípios de ensaio, mas também à grande variedade do equipamento e à falta de cumprimento dos requisitos do equipamento e procedimentos de ensaio (Kovacs & Salomone, 1982; Coduto, 1994).

No entanto, o SPT vai provavelmente continuar a ser usado como ensaio de rotina e na investigação de sondagens em solos residuais, apesar das referidas advertências, porque permite uma avaliação rápida e económica das condições do terreno em situações fáceis ou difíceis.

O SPT foi originalmente desenvolvido para ser utilizado em solos transportados não coesivos. Como parte dos solos residuais são coesivos, são necessárias adaptações na interpretação do SPT. Uma correlação útil foi introduzida por Stroud (1974) a partir de ensaios em várias argilas rijas e rochas brandas do Reino Unido, relacionando Cu/N (expressão 6.1). A correlação de Stroud proporciona a primeira aproximação para a resistência ao corte de um maciço de solo residual, sendo aplicável a solos argilosos e largamente usada na África do Sul.

$$Cu = 5 N \text{ (KPa)} \quad (6.1)$$

O valor de N(SPT) é também correlacionável com o módulo de deformabilidade dos solos residuais argilosos, pela equação:

$$E = 200 Cu = 1000 N \text{ (KPa)} \quad \text{ou} \quad E = N \text{ (MPa)} \quad (6.2)$$

Esta correlação foi testada por Blight em solos residuais andesíticos de um perfil na África do Sul, onde se fizeram dezenas de ensaios ao longo de 8 furos de sondagem até 14 m de profundidade, e compararam-se os resultados com dados obtidos pelo ensaio triaxial. Chegou-se à conclusão que a correlação era bastante boa para profundidades próximas dos 5 m. No entanto, outro conjunto de dados obtidos do mesmo solo residual (Pavlakis, 1983), mas num perfil com cerca de 50 m de profundidade, revelou que a expressão de Stroud só se enquadrava perfeitamente para profundidades próximas dos 40 m. Esta discrepância deve-se naturalmente à diferença de profundidade dos perfis de alteração nos dois locais com o mesmo tipo de solo. A situação ilustra claramente uma das muitas “armadilhas” em que se pode cair quando se pretende tecer conclusões generalizadas acerca dos perfis de solos residuais.

Segundo Rocha Filho (1989), qualquer tentativa de estabelecer correlações empíricas entre a compressibilidade ou a resistência e os resultados de ensaios *in situ*, como o SPT, deve incorporar índices quantitativos da composição mineralógica e do grau de alteração. O autor propõe correlações entre o índice de lixiviação β , (ver Capítulo 4), e o módulo de deformabilidade determinado a partir de ensaios de carga com placa e pressiómetro (expressão 6.3). Maccarini (1980), apresentou relações dos parâmetros de resistência obtidos em ensaios triaxiais sobre amostras indeformadas e o índice β (expressões 6.4 e 6.5).

$$E = 2800\beta + 830 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (6.3)$$

$$c' = -1,53\beta + 0,70 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (6.4)$$

$$\phi' = 40\beta + 26^\circ \quad (6.5)$$

6.3.2 – O CPT e os solos residuais

Os relatos bibliográficos sobre a aplicação do CPT nos solos residuais são escassos e, quando presentes, são rodeados de grandes reservas. De facto, à excepção dos horizontes maduros (e.g. laterites tropicais), os solos residuais constituem materiais, principalmente em latitudes de clima temperado, onde ocorrem com frequência blocos ou pedras que dificultam a progressão da ponteira, quedam-se por profundidades pequenas em saprolitos (solos residuais jovens) ou em rochas alteradas (Viana da Fonseca, 1996).

A caracterização do solo através do CPT é feita pela relação entre a resistência do cone qc , e a razão de fricção Fr . Dados de ensaios em solos residuais de granitos e siltitos, sugerem que o Fr não é apropriado para fornecer a identificação do tipo de solo e o conteúdo do cimento, pois a penetração em níveis com diferentes graus de cimentação é marcada por grandes variações de qc e, insensível ao Fr (Akili *et al.*, 1988; Puppala *et al.*, 1995; Schnaid & Consoli, 1996). Um contributo para o conhecimento do efeito da cimentação, pode ser obtido pela combinação entre velocidades sísmicas das ondas de corte e a resistência da ponteira cónica do CPT (Lunne *et al.*, 1995; Schnaid, 1997). Para a determinação dos parâmetros de resistência, c' e ϕ' , os ensaios devem ser sempre complementados com estudos laboratoriais, pois o c' depende da estrutura, enquanto o ϕ' não. Os autores concluem que o CPT pode ser utilizado com razoável fiabilidade na investigação de perfis de solos residuais levemente estruturados.

Dados de campo e estudos laboratoriais efectuados em areias siltosas demonstraram que a cimentação tem mais influência nos resultados do CPT que o confinamento original, devido aos baixos ângulos de atrito dos siltes (Puppala *et al.*, 1998). Adicionalmente à cimentação, a saturação parcial também influencia as propriedades coesivas do material. Uma das conclusões do referido estudo é que a cimentação é mais significativa na resistência da ponteira cónica para profundidades superficiais relativamente às maiores profundidades.

Negligenciar o efeito da cimentação nos resultados implica uma subestimação da resistência dos maciços terrosos, assim como subestimação da estabilidade de taludes em solos residuais (Frydman *et al.*, 1980; Rad & Clough, 1982).

Considerando o que foi dito, torna-se importante identificar os níveis de cimentação naturais ou artificiais nos subsolos antes de qualquer projecto estrutural em solos residuais (Puppala *et al.*, 1998).

6.3.3 – O DP e os solos residuais

Os solos residuais são, como já foi referido, muito sensíveis à perturbação inerente ao processo de amostragem, daí a importância que certos autores dão aos ensaios *in situ* nestes materiais, não esquecendo porém, que no processo de penetração dinâmica a sua estrutura fica também danificada.

Nos solos residuais é frequente a existência de maciços constituídos por matrizes mais ou menos finas, as quais incorporam blocos, ou mesmo agregados de partículas mais grosseiras, de rigidez e resistência muito altas. Por esta razão, a realização de ensaios de penetração estática, pela falta de reacção à superfície nos equipamentos mais comuns, ou a realização de ensaios dinâmicos tipo SPT, pela maior facilidade com que o respectivo amostrador se danifica, fica muitas vezes comprometida, impedindo a obtenção de uma caracterização mais profunda e contínua destes maciços. A substituição do amostrador SPT pelo cone de ângulo apical de 90°, constituindo o equipamento DPSH e que é consideravelmente mais resistente, evita por um lado esses danos e fornece geralmente uma visão contínua da litologia do maciço, representando melhor a macroestrutura deste. Enquanto que, os tais elementos mais resistentes podem constituir obstáculos para o DPL, para o DPSH, que é um meio energeticamente mais potente, não o são (Viana da Fonseca, 1996).

A limitação respeitante à existência de atrito lateral constitui factor de menor importância nestes materiais, pelo facto das paredes dos furos serem estáveis até profundidades consideradas razoáveis. Cuidados adicionais devem ser tomados quando há suspeitas de percolação de água ou existência de níveis argilosos de fraca resistência (Viana da Fonseca *et al.*, 1998).

6.3.4 – Correlações entre ensaios de penetração em solos residuais

Martins *et al.* (1989) analisaram os resultados da prospecção geotécnica de solos residuais graníticos, realizada em locais urbanos da região Norte de Portugal, tendo chegado às seguintes correlações:

$$\begin{aligned} \text{Rp (CPT)} &\approx \text{N (DPL)} \\ \text{N (DPL)} &\approx 2 \text{ a } 3 \text{ N (SPT)} \quad \therefore \text{Rp (CPT)} \approx 2 \text{ a } 3 \text{ N (SPT)} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Na correlação entre N(DPL) e N(SPT), verificou-se grande dispersão de resultados, sendo a relação indicada a verificada para a maioria dos valores. Esta relação difere significativamente da indicada para solos sedimentares, em que $N_{(SPT)} \approx N_{(DPL)}$, (Castro, 1988). Esta diferença deve-se fundamentalmente às características intrínsecas aos perfis deste tipo de solos residuais, mas também em parte devido ao facto dos penetrómetros dinâmicos ligeiros, usados num e outro caso, serem ligeiramente distintos pelo que os valores dos respectivos coeficientes não poderão ser comparados directamente.

Alguns autores apresentam correlações entre o DPSH e o SPT. São exemplos disso Muromachi & Kobayashi (expressão 6.7) citados por Chang (1988). Mas recomenda-se que o uso destas correlações deve ser confirmado com dados reais, assim como é indispensável verificar as características do equipamento aplicado, nomeadamente no que se refere aos níveis de energia utilizados (Butler *et al.*, 1998).

$$\begin{aligned} N_{SPT} &= 1,27 N_{DPSH} \\ N_{DPSH} &\approx 1 N_{SPT} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Há uma série de locais onde o SPT e o CPT são eficazes, mas muito poucas correlações correspondem aos solos residuais. Danziger *et al.* (1998), apresentam um resumo dos dados disponíveis, cuja adaptação consta no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Correlações entre o CPT e o SPT (adaptado de Danziger *et al.* 1998).

País	Referência	Rocha	Solo residual	SPT	CPT	qc/N [#] (média)
Brasil	Barata <i>et al.</i> (1978)	gnaisse	Argila silto-arenosa Areia silto-argilosa	manual	mecânico	0,15-0,25 0,20-0,35
	Alonso (1980)	gnaisse	Silte arenoso Areia e silte Argila siltosa	manual	mecânico	0,31-0,34 0,26-0,50 0,72
	Velloso (1981)	gnaisse	Areia siltosa Silte arenoso	manual	mecânico	0,50 0,40-0,47
	Rocha Filho & Carvalho (1988)	gnaisse	Areia siltosa	manual	eléctrico	0,3-0,5
Nigéria	Ajayi & Balogun (1988)	?	Argila arenosa (laterite) Argila arenosa (saprolito)	semi-automático	mecânico	0,32 0,42
Singapura	Chang (1988)	granito rocha sedimentar	Silte argilo-arenoso Silte argiloso e arenoso	?	?	0,21 0,18
Portugal	Viana da Fonseca (1996)	granito	Areia siltosa	automático (Dando)	mecânico	0,7

[#] qc/N em MPa por pancada por 0,3 m

A análise do Quadro 6.3, exige prudência na comparação dos dados obtidos pelos diferentes autores, por duas razões: i) falta de informação relativa à energia transmitida à coluna de varas no SPT; ii) apenas a média dos valores qc/N foi incluída no quadro, mas a dispersão pode ser significativa. De facto, os próprios valores médios variam bastante. Por outro lado, a dispersão de valores pode dever-se, quer a um número considerável de ensaios, quer à heterogeneidade dos perfis.

No entanto, pode verificar-se que as correlações constantes no Quadro 6.3, entre o CPT e o SPT, para diferentes tipos de solos residuais, apresentam grande dispersão, devida fundamentalmente à heterogeneidade inerente aos solos residuais. Diferentes rochas

produzem, geralmente, diferentes correlações para o mesmo tipo de solo no que diz respeito à textura deste. Existe uma tendência geral para a diminuição dos valores de qc/N com a diminuição da dimensão do grão, mas uma aproximação da correlação qc/N *versus* D_{50} , proposta por Robertson *et al.* (1983), não produziu resultados consistentes.

Numa tentativa de estabelecer correlações de carácter regional, fez-se uma análise de mais de 200 casos de ensaios conjuntos CPT e SPT, nos solos residuais de granitos, em vários locais da região Norte de Portugal, tendo-se obtido para a relação qc/ N_{SPT} uma gama que oscila entre 0,35 e 0,50 MPa. Estes valores são próprios de solos arenosos, o que acaba por corresponder, grosso modo, à granularidade que caracteriza este tipo de solos residuais, havendo, neste caso, uma razoável consonância com os solos transportados (Viana da Fonseca *et al.*, 1994).

Para além das já referidas reservas impostas às correlações entre qc e N_{SPT}, nos solos em geral, e nos solos residuais em particular, é pertinente acrescentar que estas mesmas correlações não são independentes da profundidade, isto é, os valores podem evoluir de forma diferente com a profundidade. Assim as referidas correlações, supostamente lineares, não são necessariamente independentes da origem de ambos os valores. A uma dada profundidade N_{SPT} = 0, não implica necessariamente que qc = 0.

Cardoso (1986), refere que os solos residuais são mais resistentes e menos compressíveis que o indicado pela classificação física dos solos interpretados segundo as correlações estabelecidas para solos sedimentares.

A relação entre N_{SPT} e a densidade relativa, referida por Lumb (1977) *in* Howat (1985) não é única, pois hoje tem-se a convicção que a resistência à penetração de solos residuais graníticos é algo superior à sugerida por Terzaghi & Peck (1967), por estar relacionada com a estrutura cimentada dos referidos materiais.

Comprovativo desta situação é o facto de os ângulos de atrito obtidos no laboratório, geralmente, serem mais reduzidos do que os ângulos calculados empiricamente através de dados de ensaios (DPL, CPT, DPSH), utilizando correlações empíricas (Folque, 1988). A distância entre valores justifica-se quer pela componente adicional da resistência fornecida pelo cimento nos solos residuais, quer pela desestruturação durante o processo de amostragem.

Por tudo o que até agora foi referido, considera-se importante recomendar prudência nesta área, pois é evidente a não aplicabilidade de correlações obtidas por diferentes autores em solos distintos dos solos em estudo, utilizando penetrómetros semelhantes. Como é igualmente duvidosa a comparação entre resultados de diferentes penetrómetros para o mesmo solo.

A heterogeneidade verificada nos perfis dos solos residuais, em geral, e particularmente dos correspondentes aos solos residuais de granítoides, constitui factor determinante. Desde microambientes de alteração que originam bolsadas de solo com características de resistência e deformabilidade diferentes das do solo envolvente; diaclases herdadas da rocha-mãe, que por vezes são em grande número, com variadas direcções e que, podem estar abertas, preenchidas ou não por material distinto; a presença de blocos de rocha que ocorrem de forma errática, mas frequente, no seio de solo residual; a existência comum de fragmentos de rocha dura ou de níveis onde as partículas mais grosseiras se concentram devido à lixiviação;

inclusões pedogénicas como nódulos de silte ou argila; etc.. Todas estas heterogeneidades inerentes aos solos residuais surgem rapidamente quer na vertical quer na horizontal, e afectam as comparações entre ensaios penetrométricos (SPT, CPT, DPL e DPSH) que como é obvio, não podem ser realizadas precisamente no mesmo local, e a referida variabilidade pode registar-se mesmo para distâncias inferiores a 1 m ou 0,5 m.

Portanto, as referidas correlações, apesar de terem que ser sempre interpretadas com bastante cuidado e reservas, constituem hipóteses mais bem sucedidas no caso de solos sedimentares, que geralmente são mais homogéneos, principalmente na horizontal (só os limites entre camadas podem interferir nos resultados), do que no caso dos solos residuais.

6.4 – Dados compilados

A consulta de dados provenientes de relatórios geotécnicos, obrigou à análise crítica de registos de sondagens e ensaios *in situ*. Dos referidos estudos pertencentes, principalmente, a obras rodoviárias e fundações de edifícios, foram coligidos os dados relativos a ensaios penetrométricos dinâmicos, em que se utilizaram o DPL e o SPT.

Um resumo de ensaios DPL, realizados em algumas das manchas dos solos residuais em foco neste estudo, é apresentado em forma de gráfico “ N_{DPL} versus profundidade”, na Figura 6.1.

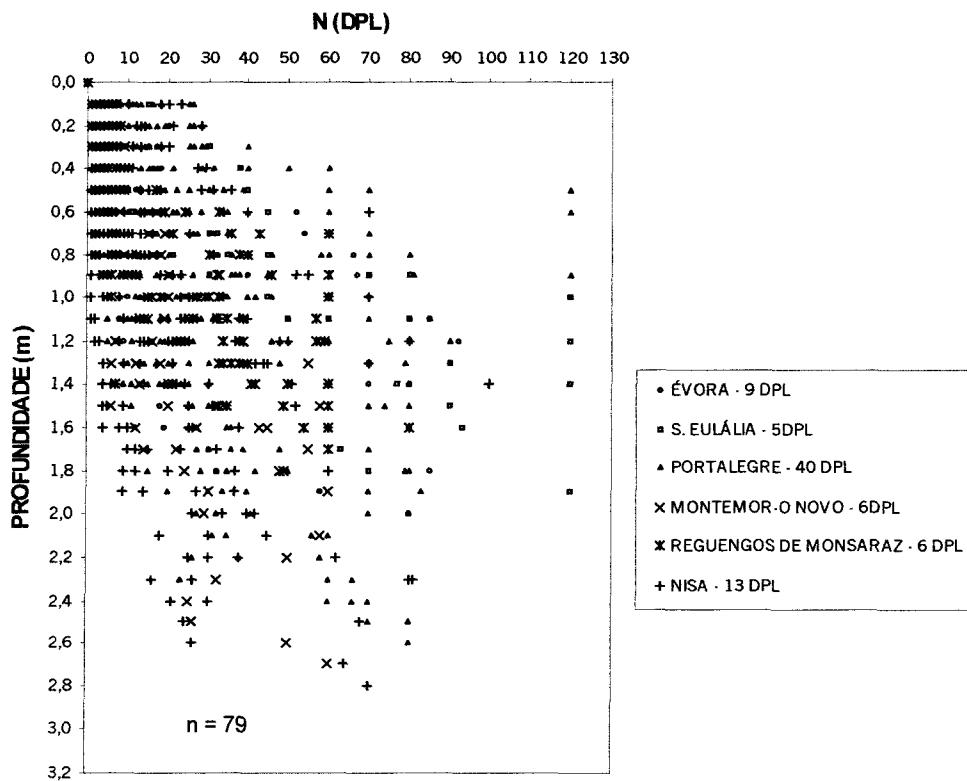


Figura 6.1 -- Resultados de ensaios DPL, realizados nos solos residuais de granitóides do Alentejo.

Pela análise dos dados obtidos de 79 ensaios usando penetrómetros “supostamente” ligeiros (porque nem todos os relatórios coligidos referem o peso do pilão utilizado), verifica-se que este tipo de penetrómetro, raramente ultrapassa os 2,5 m de profundidade neste tipo de solos

residuais de granitóides. É igualmente notório que a grande maioria dos ensaios atinge um número igual ou superior a 60 pancadas para profundidades entre 1 a 2 m, aproximadamente.

Os referidos ensaios, provenientes de vários locais, distanciados, por vezes, de centenas de quilómetros, reflectem claramente o limitado poder penetrativo do DPL nos solos em causa. Como já foi demonstrado (Capítulo 3), a espessura destes solos residuais ultrapassa em muito a profundidade atingida por este método, ficando bastante aquém do firme rochoso e, cujo avanço é impedido, não apenas pela existência de blocos erráticos, mas principalmente devido à elevada resistência e reduzida deformabilidade inerente a estes solos residuais. Por conseguinte, é aconselhável o uso de métodos que utilizem maior energia de impacto e consequentemente seja possível obter uma maior profundidade de penetração, de que são exemplos o DPSH e o SPT.

Relativamente ao método SPT, foram coligidos 467 ensaios, realizados com vista à implantação de obras rodoviárias que atravessam as manchas dos solos residuais em estudo. Na Figura 6.2.a), apresenta-se um resumo de 88 ensaios SPT em forma de gráfico N_{SPT} versus profundidade a que foi realizado o ensaio; a Figura 6.2.b), traduz quantitativamente que, na maioria desses ensaios (75% dos casos registados), o número de pancadas necessário para a penetração de 30 cm de amostrador de Terzaghi, está compreendida entre 50 e 60; sendo frequentes os casos em que aquela distância não é atingida. Estes dados comprovam uma vez mais, a elevada compacidade/consistência destes solos, não obstante a profundidade de realização do ensaio ser superior ao DPL. Convém relembrar que estes ensaios se realizam associados a sondagens de furação, cujo avanço pode ser facilitado através de trépanos potentes ou mesmo métodos rotativos. De qualquer modo, salienta-se a escassez de ensaios com N_{SPT} inferior a 60 Figura 6.2.a), facto que apenas foi registado para profundidades inferiores a 6 m.

Os restantes 379 ensaios, foram efectuados na fase de projecto da A6-Autoestrada Marateca/Elvas, mais precisamente no sublanço Montemor-o-Novo/Évora, o qual intercepta o maciço eruptivo de Évora e respectivos solos residuais. Devido ao número considerável de ensaios realizados, optou-se pela sua representação em gráfico de barras (Figura 6.3). No que diz respeito à variação do valor do SPT com a profundidade, facilmente se constata que nos 3 primeiros metros de profundidade, foram obtidos em praticamente metade dos ensaios (48%) valores superiores a 50-60 N; 28% dos casos, valores inferiores a 30 N (solos soltos a medianamente compactos) e, nos restantes 24% dos ensaios, resultados entre 30 e 50 N_{SPT} (solos compactos). Estes valores mais baixos, obtidos nos 3 metros iniciais, resultam da presença dos solos residuais e de uma maior descompressão e meteorização das rochas pertencentes ao complexo granítóide, na sua zona superficial. A partir desta profundidade, a grande maioria dos ensaios (90% dos casos), forneceu resultados superiores a 50-60 N_{SPT} , correspondendo a formações muito compactas.

6.5 – Ensaios realizados

Com vista à caracterização geotécnica, no campo, dos maciços dos solos residuais de rochas granitóides, iniciou-se uma campanha de ensaios *in situ* em locais previamente seleccionados, tendo em conta a localização dos pontos de amostragem, a espessura dos perfis de alteração e a acessibilidade ao topo dos taludes por parte do equipamento a utilizar.

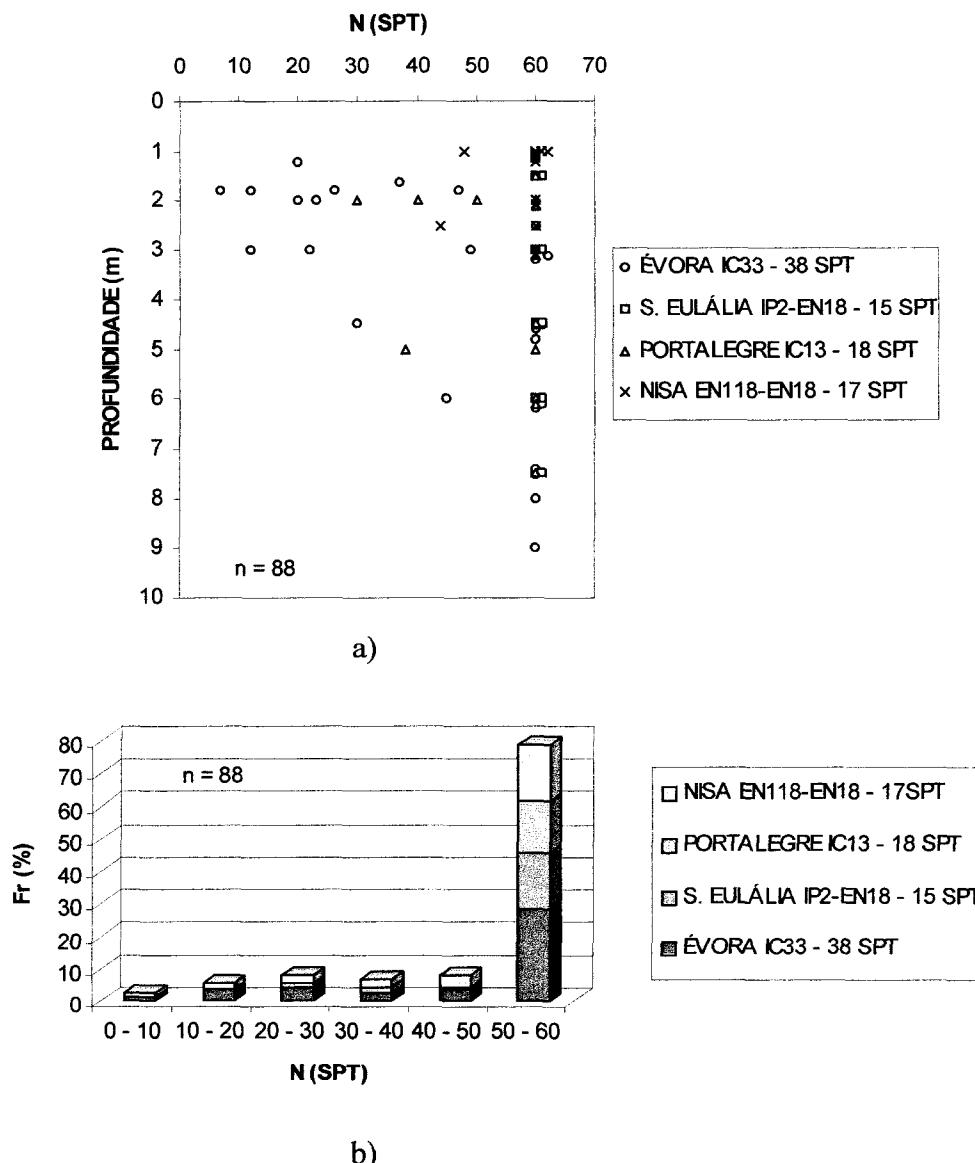


Figura 6.2 – Relação entre os resultados de SPT e a percentagem de ensaios por estudo coligido.

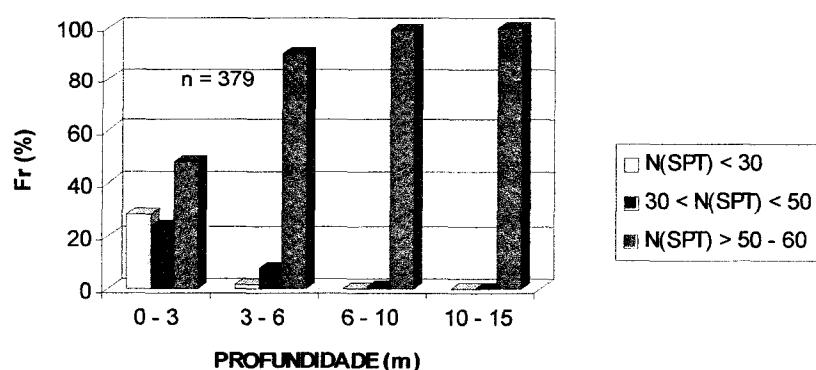


Figura 6.3 – Variação de N_{SPT} com a profundidade (resultados relativos à A6).

Por razões que se prendem, com a considerável extensão da área de trabalho (cerca de 3250 Km²), com as características próprias de cada mancha de solo residual e, com o equipamento disponível, optou-se por definir uma campanha de ensaios *in situ* que envolvesse técnicas simples e de prática corrente.

No total, utilizaram-se 4 métodos de ensaios de penetração. Iniciou-se a campanha com o penetrômetro dinâmico ligeiro, por ser o mais simples, expedito e facilmente transportável. Foram utilizados dois penetrômetros, DPL_{LNEC} – manual e DPL₁₀₀ – mecânico, que se encontram ilustrados nas Figuras 2.6 e 2.7 e cujas características estão descritas no Capítulo 2. Os ensaios SPT, DPSH e CPT foram realizados com um equipamento da marca Pagani, modelo TG 63-100 (Figura 2.8), de acordo com as normas da ISSMFE.

Das 16 manchas de solos residuais estudadas, e pelas razões já expostas, foram contemplados 11 locais para a realização destes ensaios, cuja distribuição do tipo e quantidade por local de amostragem e maciço a que pertencem se encontram sintetizadas no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Número e tipo de ensaios *in situ* por local de amostragem.

Maciço	Local de amostragem	Ensaios de campo				
		DPL ₁₀₀	DPL _{LNEC}	CPT	SPT	DPSH
Redondo	16		2			
St ^a . Eulália	18		2			
Vimieiro	41		3			
St ^a . Eulália	43		3			
Arraiolos	44	1	3		2	1
Vimieiro	45	1				1
St ^a . Eulália	47	1	3		3	1
Fronteira	48	1	3		3	1
Fronteira	49		1			
Ervedal	51	2	2			
Nisa	53	2	1	1	5	1
St ^a . Eulália	70		3			
Vidigueira	73	2				1
Pias	76	1	2	1		2
Reguengos	82		1			
Évora	83	1	1		2	1
Total	16	12	30	2	15	9

6.6 – Apresentação e análise dos resultados obtidos

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios de campo, elaboraram-se gráficos para cada perfil ensaiado que traduzem a variação das características qualitativas e, semi-quantitativas, dos solos residuais *in situ*, com a profundidade. Com base nestas representações gráficas é possível tecer algumas considerações sobre o comportamento mecânico dos solos residuais *in situ*.

Como já foi referido, os solos em estudo são caracterizados, em geral, por elevada resistência e baixa deformabilidade e também pela existência de blocos, de pequena a média dimensão, de rocha mais ou menos alterada, assim como estruturas relíquia, incorporados numa matriz com características diferentes. Tal justifica que na campanha de ensaios DPL se dê por terminado o ensaio, geralmente, para $N_{DPL} > 100$, e muitas vezes para $N_{DPL} = 140$.

6.6.1 – Maciço granítóide de Évora

Na extensa mancha de solos residuais do maciço de Évora, foi seleccionado o local onde se colheu a amostra 83 – Montenovo, para nele se efectuarem os ensaios representados na Figura 6.4. Pode verificar-se que a profundidade atingida pelos dois tipos de penetrómetro ligeiro utilizados foi de 2 m. O SPT atingiu as 60 pancadas aos 2,5 m e o DPSH aos 5 m, o dobro dos anteriores, ficando, mesmo assim, aquém da espessura estimada para o solo residual deste perfil, aproximadamente 8 m (Capítulo 3).

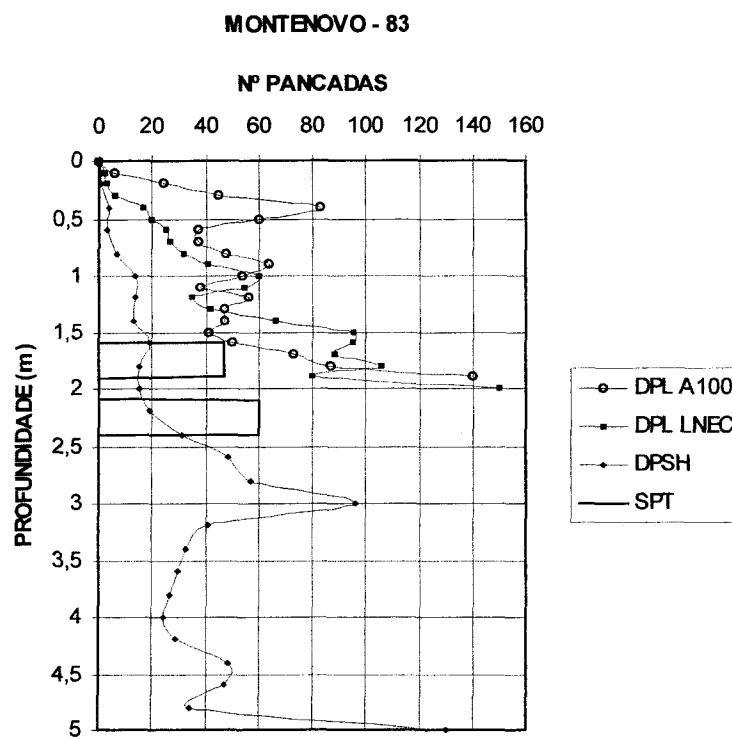


Figura 6.4 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Évora.

Nota-se uma maior sensibilidade às heterogeneidades por parte dos ensaios DPL, relativamente aos ensaios DPSH, o que se justifica pela maior energia de impacto, inerente a este último e, que lhe permite ultrapassar mais facilmente os obstáculos. Por outro lado, a evolução dos dois ensaios DPL com a profundidade é algo diferente; apesar do cuidado em realizar todos os ensaios próximos uns dos outros, com distâncias entre si normalmente de 0,5 m, no máximo 1 m, é de salientar a enorme heterogeneidade verificada na horizontal, nestes perfis de solos residuais.

O aumento de resistência que se verificou aos 3 m, no DPSH, é indicativo de que nestes solos, é recomendável continuar o ensaio, pois estas resistências elevadas são fenómenos localizados e não reproduzem a resistência da matriz do solo, pois logo a seguir verifica-se uma quebra brusca da resistência, revelando um comportamento mais homogéneo até ao fim do ensaio (aproximadamente 5m).

As baixas resistências à penetração na camada superficial do terreno, com cerca de 0,5 m de espessura, devem-se ao facto do terreno estar lavrado. O teor em água ($w = 8,45\%$), determinado na amostra recolhida pelo amostrador do SPT, é considerado baixo para a época do ano (Janeiro), registando-se que nunca se interceptou o nível freático, nem mesmo com o DPSH, cuja ponteira no fim do ensaio estava seca. Estes factos, confirmam as condições não saturadas em que estes solos se encontram.

6.6.2 – Maciço granítóide de Arraiolos

A profundidade máxima alcançada pelo DPSH, realizado no topo do perfil do solo residual do quartzodiorito de Arraiolos foi de 3 m (Figura 6.5), estando conforme com a espessura de solo no local de amostragem 44 - aproximadamente 4 m; realça-se o facto de em toda a área circundante ser evidente a transição brusca do solo residual para rocha sã, maciço rochoso ou blocos com diâmetros superiores a 2 m.

Os resultados dos ensaios DPL confirmam a heterogeneidade lateral do perfil, embora denotem uma maior homogeneidade vertical relativamente ao solo residual do quartzodiorito de Montenovo (Évora). O SPT ultrapassou as 60 pancadas para uma profundidade que é cerca de metade da atingida pelo DPSH.

O teor em água determinado nas amostras colhidas pelo amostrador do SPT é $w = 8,05\%$ e $w = 5,61\%$, a 0,7 e a 1,5 metros de profundidade, respectivamente. Ou seja, os solos mais superficiais têm uma humidade superior relativamente aos solos subjacentes, confirmando uma vez mais as condições não saturadas destes solos e, que o teor em água decresce com a profundidade, o que significa que a água resultante da pouca precipitação que ocorreu também se infiltrou pouco.

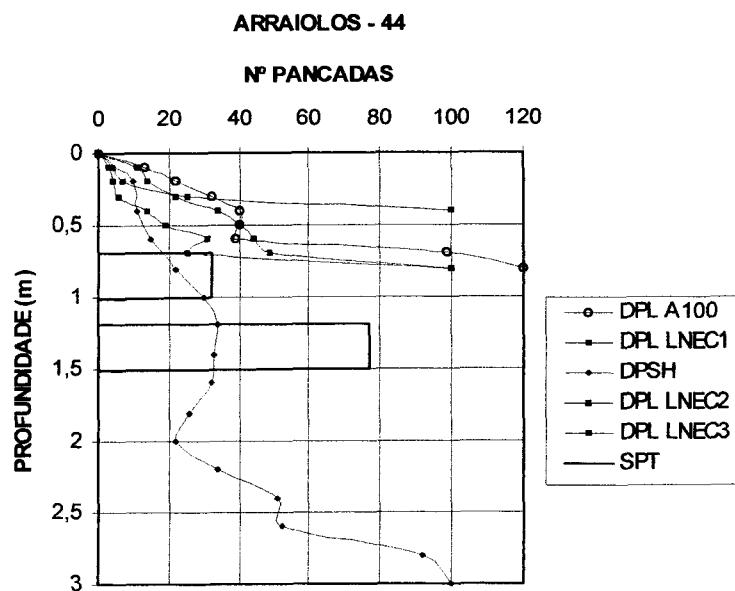


Figura 6.5 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Arraiolos.

6.6.3 – Maciço granítóide de Reguengos de Monsaraz

No maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz, seleccionou-se o topo de um talude, com cerca de 10 m de altura (Capítulo 3), de uma saibreira onde predominava o solo residual de um quartzodiorito (amostra 82), para a realização de um ensaio DPL. Este ensaio foi escolhido por ter uma maior mobilidade, e atingiu uma profundidade considerável (3,5m) para este tipo de solos residuais relativamente grosseiros (Figura 6.6). Tal facto, justifica-se por uma maior homogeneidade vertical, em contraponto à enorme heterogeneidade lateral (Capítulo 3), e uma menor resistência do solo, em geral, com apenas dois picos de resistência dinâmica bem localizados: aos 0,3 m – devido à compacidade própria de um terreno que se encontrava superficialmente compactado, (possivelmente por veículos agrícolas); e aos 2,3 m por algum clasto de maiores dimensões, que após alguma insistência foi ultrapassado. Neste perfil não se registou a presença de núcleos de rocha incorporados no seio do solo.

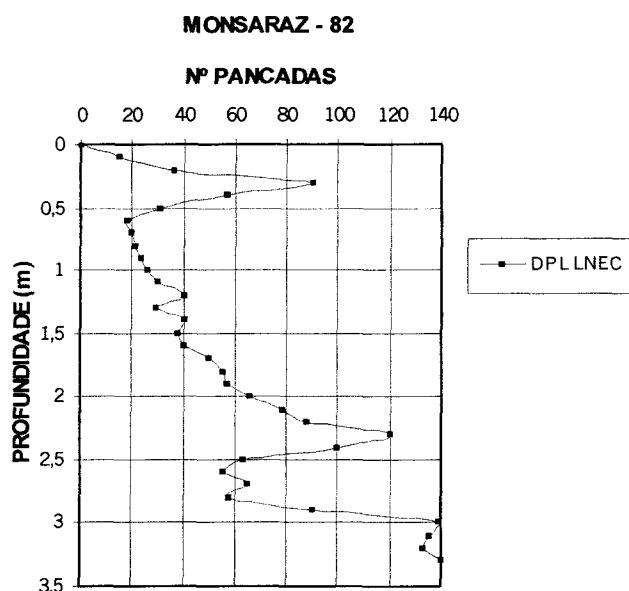


Figura 6.6 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica no solo residual de um quartzodiorito do maciço eruptivo de Reguengos de Monsaraz.

6.6.4 – Maciço granítóide do Redondo

No local de amostragem 16 – Calado (Redondo), apenas se realizaram dois ensaios com o DPL que não ultrapassaram 1,5 m para $N_{DPL} > 140$ (Figura 6.7). A má qualidade dos acessos impediu a aplicação de outros métodos de ensaio.

A espessura do solo residual do granodiorito é considerável, cerca de 8 m, mas o solo incorpora muitos fragmentos de rocha alterada ou rocha branda. Daí o facto do avanço do método utilizado ser claramente limitado. O DPL_{LNEC} realizou-se mais perto do talude onde se fez a amostragem e era notória a alteração controlada pelas “diaclasses relíquia” resultando um perfil caracterizado por “bolas” de material mais resistente intercalado com “veios” onde se concentram minerais mais brandos.

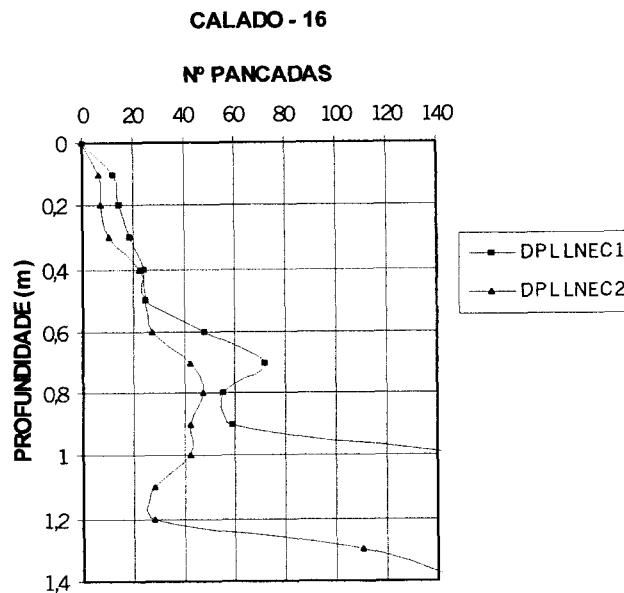


Figura 6.7 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um granodiorito do maciço eruptivo do Redondo.

6.6.5 – Complexo granítóide da Vidigueira

No local de S. Cucufate (amostra 73) efectuou-se um ensaio DPSH que terminou a 1,40 m de profundidade e 2 ensaios DPL que terminaram a menos de 1 m da superfície (Figura 6.8).

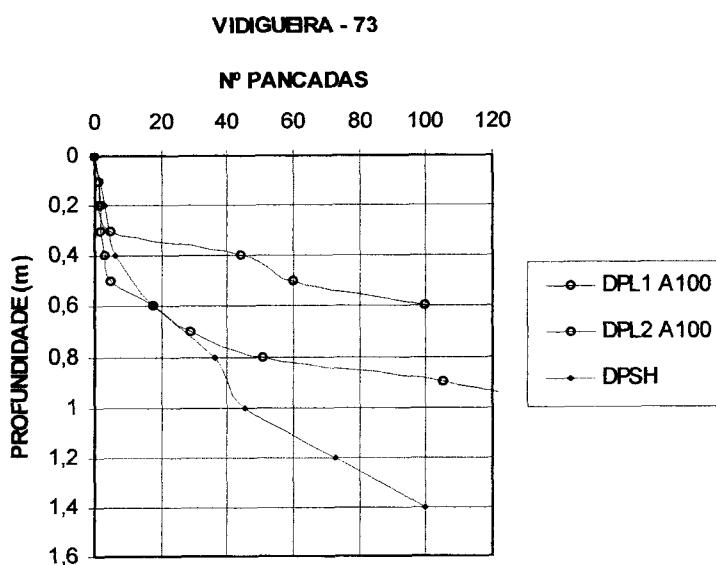


Figura 6.8 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual de um granito do complexo granítóide da Vidigueira.

Neste perfil de solo residual de um granito róseo de grão grosso, ligeiramente porfiróide, salienta-se a dimensão do grão do solo, médio a grosso com seixo fino, preservando, na

sua maioria, a clivagem, a forma, e a textura herdadas da rocha original, sendo provavelmente os responsáveis pelo aumento gradual e uniforme da resistência com a profundidade. Para este facto também contribui uma maior coesão intergranular registada em profundidade, ao contrário do que se passa nos níveis superficiais mais descomprimidos devido à meteorização a que foram submetidos.

6.6.6 – Maciço granítico de Pias

No topo do talude do solo residual do granito de Pias, onde foi colhida a amostra 76, foi possível realizar 3 ensaios DPL, 2 ensaios DPSH (Figura 6.9) e um ensaio CPT (Figura 6.10). Como se pode observar pelos respectivos gráficos, os ensaios com os penetrómetros ligeiros assim como o CPT, quedaram-se a profundidades inferiores a 1,5 m, o que é frequente neste tipo de solos residuais, enquanto que, os métodos mais potentes como o DPSH atingiram 7,5 m.

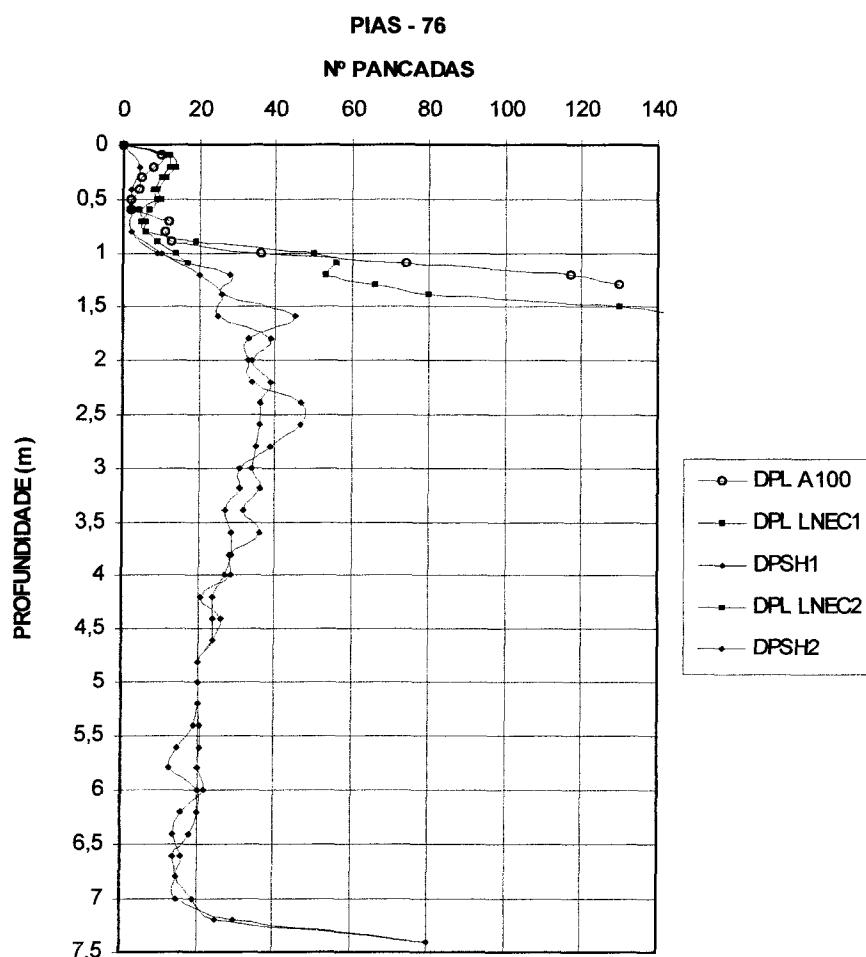


Figura 6.9 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual do maciço granítico de Pias.

Os 2 ensaios DPSH reflectem uma certa homogeneidade horizontal e vertical da resistência *in situ* do solo residual do granito de Pias, o que está em consonância com as características texturais, físicas e mecânicas destes solos (ver 5.8). Recorde-se que são maioritariamente solos areno-siltosos, por vezes areno-argilosos, com significativa percentagem de finos devido à completa alteração dos feldspatos. Isto justifica o seu aspecto macio e friável que

está relacionado com as baixas resistências verificadas, principalmente para profundidades compreendidas entre 4 e 7 m, onde se verificam no talude diaclases subhorizontais, ao redor das quais o solo se apresentava bastante húmido.

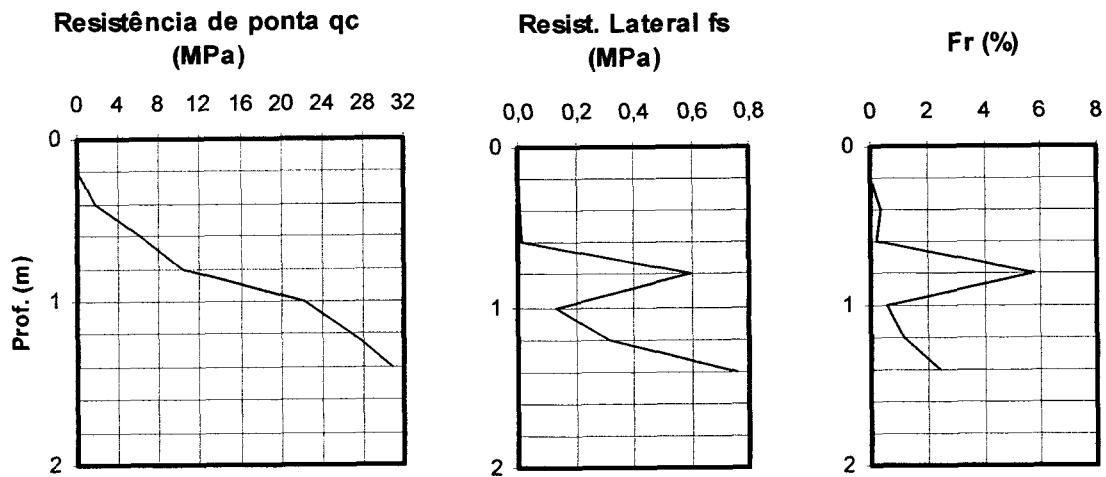


Figura 6.10 – Gráficos resultantes do ensaio de penetração estática realizado no solo residual do maciço granítico de Pias.

6.6.7 – Maciço granítico de Santa Eulália

Nos solos residuais dos granitos de St^a. Eulália, seleccionaram-se 4 locais para a realização de ensaios penetrométricos usando o DPL. Este método não ultrapassou 1 m de profundidade nos solos residuais de granito róseo, amostras 18, 43 e 47 (Figuras 6.11 a, b e c), devido à dimensão dos grãos (ver 5.9) e imbricamento dos mesmos; no solo residual do granito cinzento, o mais fino (amostra 70), atingiu 1,6 m, mas possivelmente atingiria os 2 m para $N_{DPL} > 100$. Outra diferença de comportamento é assinalada entre estes 2 tipos de solos residuais e prende-se com a evolução da resistência à penetração com a profundidade. Enquanto nos solos residuais róseos, o valor desse parâmetro aumenta uniformemente com a profundidade, pois o grau de imbricamento dos grãos aumenta de igual modo; no solo residual cinzento há variações de resistência ao longo do perfil, relacionadas com heterogeneidades pontuais devidas a seixos incorporados no solo mais fino ou níveis de solo com resistência superior à matriz envolvente.

Para além dos referidos ensaios, realizaram-se em Barbacena (Figura 6.11 a), num perfil homogéneo, um ensaio DPSH e outro SPT; ambos não ultrapassam 1,5 m, o que confirma a “teoria” da dimensão e imbricamento dos grãos dos solos residuais jovens de grão grosso, ser suficiente para impedir o avanço dos ensaios mais potentes como o DPSH ou SPT, cuja resistência à penetração aumenta gradualmente com a profundidade, mas cujo limite, 1 e 1,5 m, respectivamente, é 4 a 6 vezes menor que a espessura de solo residual registada *in situ*.

O teor em água vai diminuindo com a profundidade ($0,5m \Rightarrow w = 9,75\%$; $1m \Rightarrow w = 4,44\%$; $1,5m \Rightarrow w = 4,01\%$), pelo que a maior humidade existente nos níveis superficiais, é devida a alguma água de escorrência que conseguiu infiltrar-se.

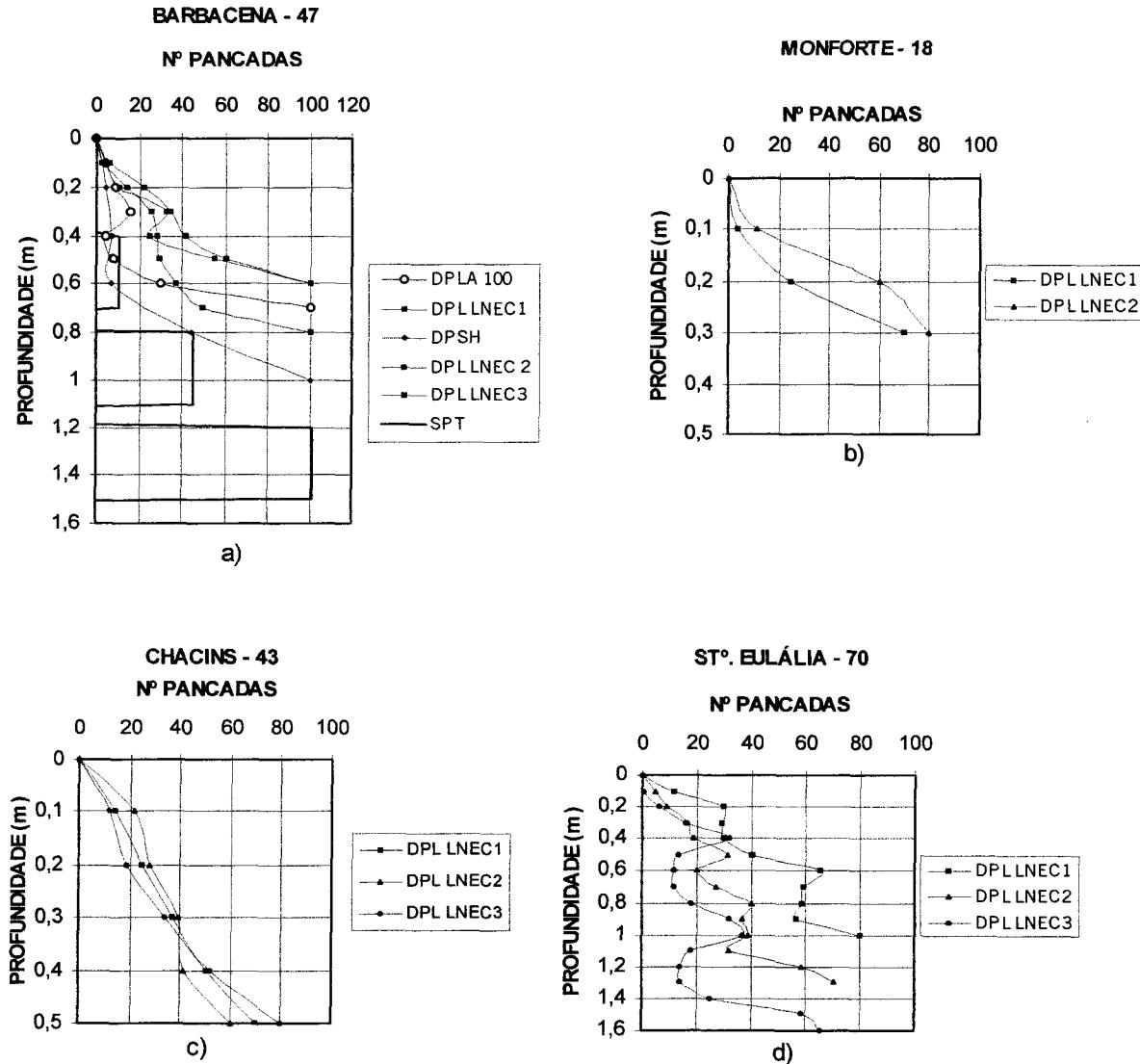


Figura 6.11 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais dos granitos de S.Eulália.

6.6.8 – Maciço granítico do Vimieiro

No maciço granítico do Vimieiro foram seleccionados dois locais para a realização de ensaios *in situ*. O talude onde se colheu a amostra 41 apresentava homogeneidade textural na horizontal, concorrendo para a consonância entre os 3 ensaios DPL que aí se realizaram distanciados entre si de 1 m, no que respeita à evolução das resistências dinâmicas com a profundidade (Figura 6.12 a). No topo do perfil, entre 0,2 e 0,6 m, assinala-se um aumento de resistência, que corresponde a um nível de solo com partículas mais grosseiras, consequência de forte lixiviação porque se trata de um solo residual maduro; logo seguida, de 0,6 m a 1,3 m, de uma diminuição da resistência, uniforme em todos os ensaios, justificada por um nível de deposição dos finos lixiviados do nível superior; por fim, próximo de 1,4 m de profundidade assiste-se a uma subida brusca da resistência dada a textura do solo que se assemelha bastante com a rocha original, impedindo o avanço dos 3 ensaios DPL.

No caso do perfil de S. Gregório, com cerca de 10 m de altura, o solo residual de grão grosso e porfiróide apresentava-se interceptado por veios pegmatíticos bastante alterados, mas que são responsáveis pelos picos de valores mais elevados registados no DPL e menos perceptíveis no DPSH, face à maior energia de impacto para um número mais baixo de golpes, tornando este último ensaio menos sensível à variação das características do solo com a profundidade (Figura 6.12 b). Essas mesmas razões cooperam para a paragem do DPL a menos de 1 m da superfície, enquanto se definiu o fim do ensaio DPSH aos 2,2 m, apesar de ser possível continuar, mas o solo encontrava-se cada vez mais duro e compacto à medida que a profundidade aumentava, em resultado do forte imbricamento dos grãos grosseiros, muitos deles ultrapassando 2 cm de diâmetro efectivo.

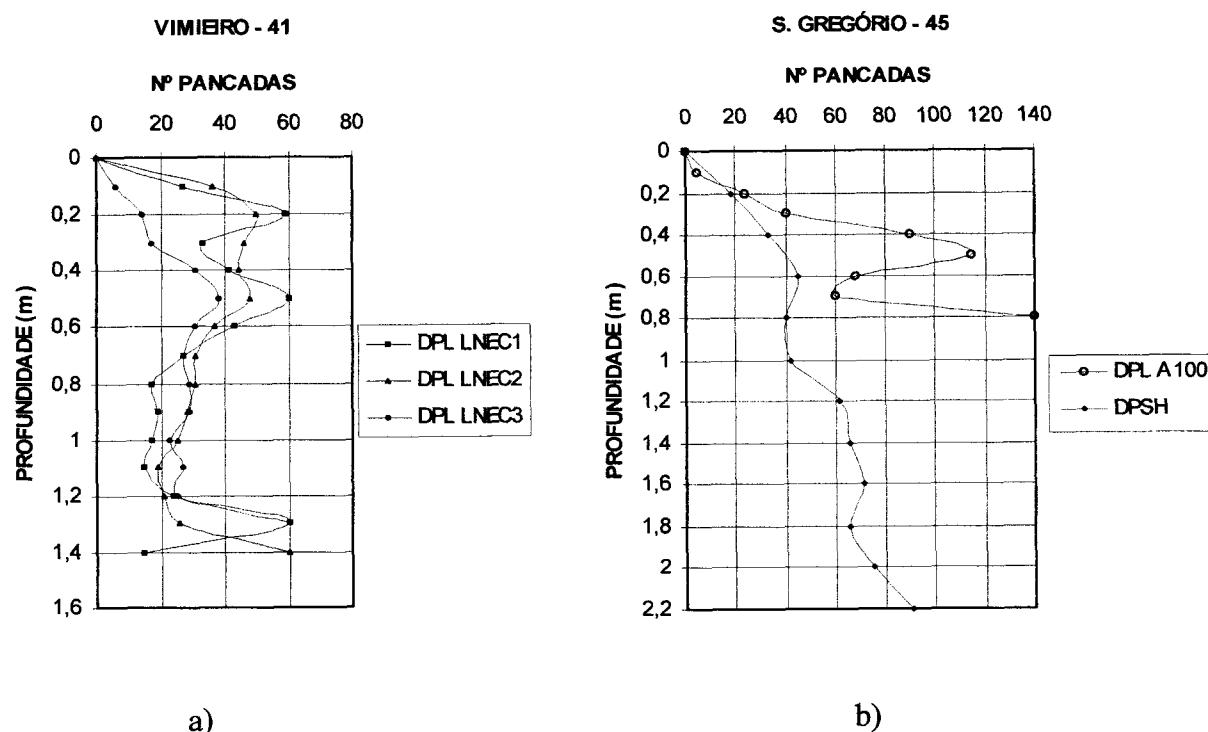


Figura 6.12 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais dos granitos do Vimieiro.

6.6.9 – Maciço granítico de Fronteira

O solo residual do granito de Fronteira apresenta-se nos perfis seleccionados, bastante homogéneo lateral e verticalmente, pelo que as heterogeneidades denunciadas pelos 5 ensaios DPL realizados (Figuras 6.13 a e b), correspondem à presença de calhaus de maiores dimensões, e não a um aumento de compacidade ou consistência do solo. O DPL₁₀₀ destaca-se ligeiramente dos restantes, no que diz respeito à maior profundidade atingida para igual número de golpes; como também relativamente ao menor número de golpes necessário para igual avanço em profundidade, ou seja um menor número de golpes para igual penetração. Mas a diferença não é significativa.

O DPSH atinge quase o dobro da profundidade dos ensaios DPL, para o mesmo número de golpes; verificando-se franca melhoria das características de resistência à penetração do solo com a profundidade, traduzida por um aumento dos valores abaixo de 1,6 m. A variação não

uniforme do teor em água com a profundidade, determinada a partir das amostras colhidas pelo amostrador de Terzaghi, ($0,7\text{m} \Rightarrow W = 6,72\%$; $1,2\text{m} \Rightarrow W = 11,18\%$; $1,6\text{m} \Rightarrow W = 8,54\%$), justifica-se pela existência de concentrações aleatórias de zonas mais húmidas possivelmente relacionadas com a presença de diaclases “relíquia” subhorizontais, resultantes de processos de descompressão que têm lugar durante a meteorização da rocha.

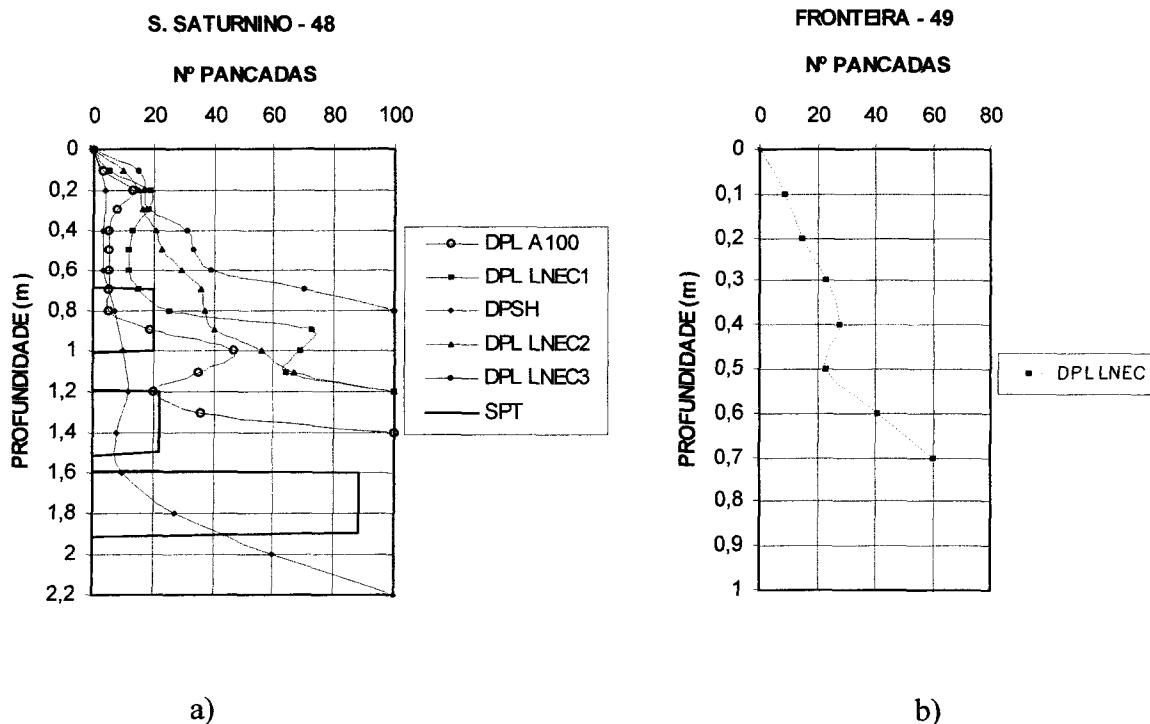


Figura 6.13 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais do granito de Fronteira.

6.6.10 – Maciço granítico do Ervedal

Os resultados dos ensaios de penetração dinâmica ligeira, realizados nos solos residuais do granito de Ervedal, nomeadamente o DPL_{100} e o DPL_{LNEC} , não são comparáveis. Isto porque para além de distarem entre si, por vezes, em dezenas de metros, o relevo é bastante acidentado, destacando-se afloramentos exuberantes na paisagem granítica (ver 5.13), concorrendo para a grande variabilidade nas espessuras dos solos residuais. Os ensaios foram realizados em épocas do ano diferentes, logo com as naturais variações do teor em água nos solos. No entanto, do gráfico correspondente aos referidos ensaios (Figura 6.14), realça-se o facto de o solo propriamente dito, não apresentar grande heterogeneidade, em profundidade, terminando simplesmente a sondagem, quando a ponteira cónica encontrar algum bloco de grandes dimensões, ou mesmo o firme rochoso.

A situação verificada neste perfil evidencia claramente a desvantagem dos ensaios que fornecem resultados pontuais em áreas a investigar bastante heterogéneas. Ou seja, não é aconselhável tecer considerações generalistas a partir de meia dúzia de ensaios pontuais em perfis, relevos e solos tipicamente heterogéneos. Seria necessário recorrer a um número bastante superior de ensaios, dezenas ou centenas, dependendo da área a investigar, e mesmo

assim no final, as eventuais conclusões só se podem reportar a um local específico, não se devendo extrapolar para outros locais com o mesmo tipo de solo residual.

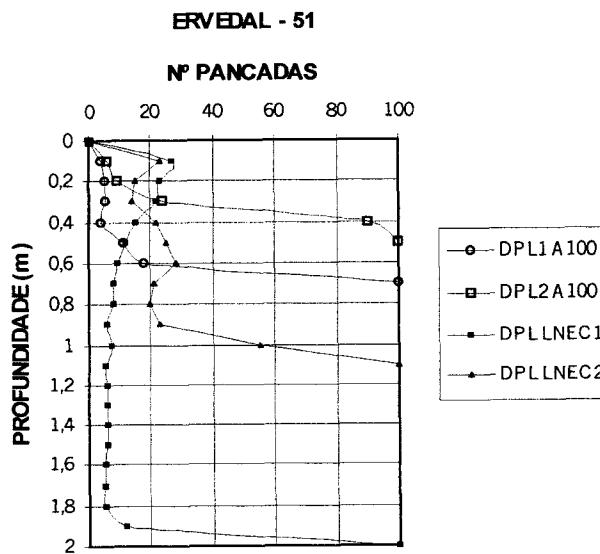


Figura 6.14 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados nos solos residuais do granito de Ervedal.

6.6.11 – Complexo Eruptivo de Nisa

No talude de um solo residual do granito de Marvão, pertencente ao CEN, foi possível aplicar os 4 métodos penetrométricos previstos nesta campanha, distanciados no máximo de 0,5 m entre si, permitindo assim uma análise comparativa entre diferentes métodos, até porque o perfil exposto é, sem dúvida, um dos mais representativos da região.

A profundidade atingida pelos diferentes métodos (a maior de todos os locais de amostragem), deve-se em grande parte, às características do solo residual, composto por areia siltosa, friável, constituindo um perfil vertical e lateralmente homogéneo no que respeita à granularidade, exceptuando algumas descontinuidades oblíquas (Duarte *et al.*, 2000).

Pela análise da Figura 6.15, pode concluir-se que com o penetrômetro super-pesado podem atingir-se profundidades superiores, praticamente duplas das conseguidas com o penetrômetro leve, neste tipo de solos. Por outro lado, este último ensaio é muito mais suscetível às heterogeneidades do terreno, resultantes da presença de pequenos fragmentos de rocha, “diaclasses relíquia” preenchidas por materiais com resistências diferentes, etc. Esta sensibilidade é maior no DPL_{LNEC} do que no DPL₁₀₀, enquanto que neste último, a profundidade atingida para igual número de golpes é superior; estes factos relacionam-se necessariamente com a geometria do cone e a transmissão de energia do pilão (Capítulo 2).

No ensaio SPT, apesar de se usar o mesmo pilão que no ensaio DPSH, o amostrador de Terzaghi tem um poder menos penetrativo que a ponteira do DPSH oferecendo maior resistência lateral, logo há uma maior dissipação de energia devido à coluna de varas e amostrador. A diferença verificada entre os dois ensaios, agrava-se com a profundidade. O atrito lateral evidenciado na cravação do tubo de revestimento impediu a continuação dos

ensaios SPT para além de 6,5 m. O teor em água das amostras retiradas do amostrador do SPT, aumenta em profundidade (1m => $W = 6,02\%$; 2,5m => $W = 5,55\%$; 4m => $W = 5,70\%$; 5,5m => $W = 8,86\%$; 6,5m => $W = 9,06\%$), e coincide com os locais de “diaclasses” subhorizontais e oblíquas identificados no perfil exposto.

Convém relembrar que, na comparação dos valores do SPT e do DPSH, tem de se ter em conta que enquanto o número de golpes registado no DPSH é para 20 cm de penetração, no SPT é para 30 cm.

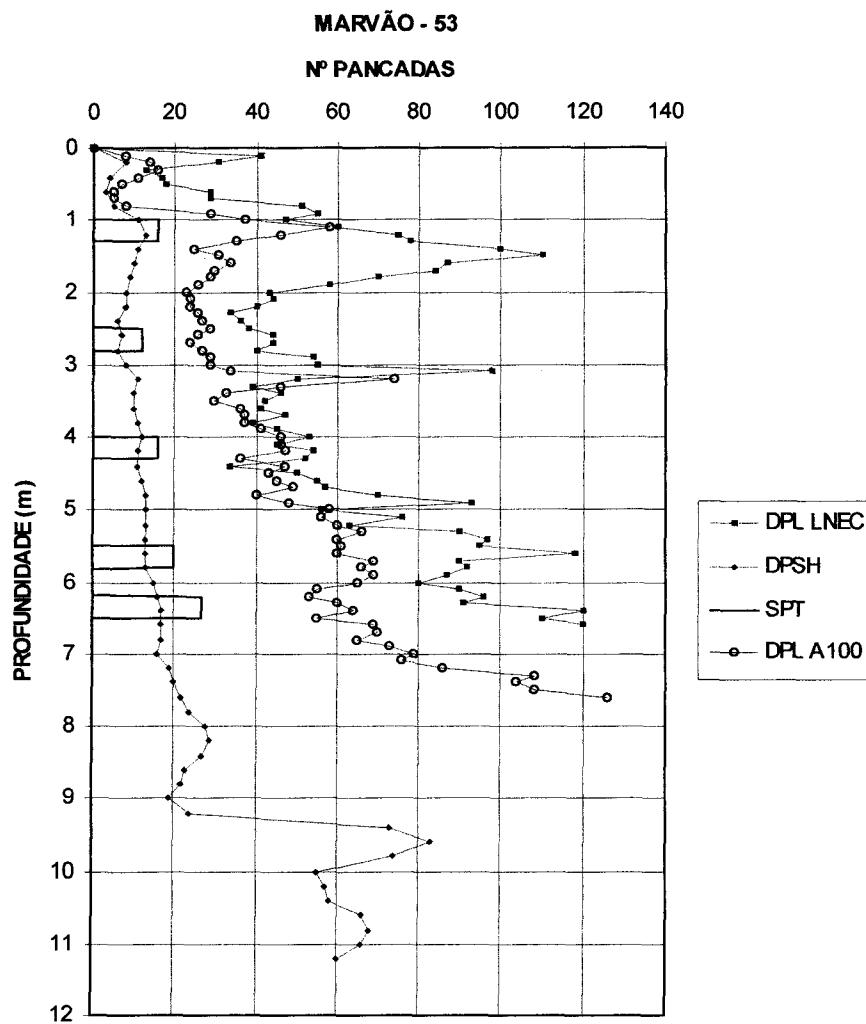


Figura 6.15 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica realizados no solo residual do granito de Marvão.

O ensaio CPT (Figura 6.16), revelou-se muito sensível para solos granulares e, a profundidade atingida é limitada à partida para zonas um pouco mais resistentes, o que é comum nestes perfis. A operação de ancoragem da máquina é dificultada nestes solos residuais. No entanto, assinala-se que o avanço do CPT em profundidade, produziu resultados muito similares aos do ensaio DPL, até à mesma profundidade.

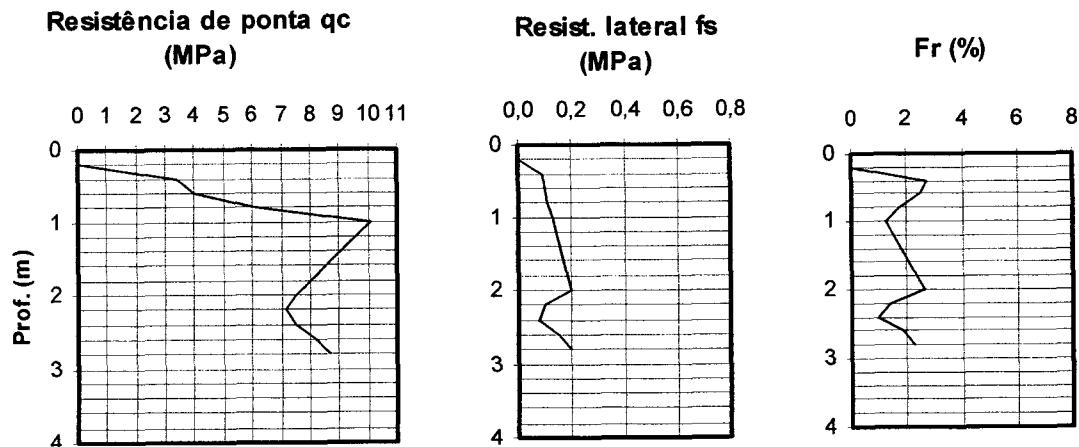


Figura 6.16 – Resultados do ensaio de penetração estática realizado no solo residual do maciço granítico de Marvão.

Numa tentativa de correlacionar os valores obtidos pelos diferentes ensaios de penetração dinâmica, elaborou-se uma tabela (Quadro 6.5), que reúne os resultados em termos de número de golpes e respectivas resistências dinâmicas à penetração para diferentes profundidades.

Quadro 6.5 – Dados obtidos dos ensaios de penetração dinâmica no solo residual de Marvão.

Prof. (m)	DPL ₁₀₀		DPSH		N _{DPL} ÷ N _{DPSH}	Rd _{DPL} ÷ Rd _{DPSH}	Prof. (m)	N			N _{SPT} ÷ N _{DPSH}	N _{DPL} ÷ N _{SPT}	
	N	Rd (MPa)	N	Rd (MPa)				DPSH	DPL ₁₀₀	SPT			
0 - 1	14	8,39	6	6,45	2,3	1,3							
1 - 2	34	19,28	10	10,0	3,4	1,9							
2 - 3	27	14,53	7	6,55	3,8	2,2	2,5	6	25	12	2	2,1	
3 - 4	41	20,99	11	9,68	3,7	2,2	4	11	43	16	1,5	2,7	
4 - 5	46	22,45	12	9,95	3,8	2,2	5,5	13	56	20	1,5	2,8	
5 - 6	59	27,52	13	10,20	4,5	2,6	6,2	16	60	27	1,7	2,2	
6 - 7	64	28,58	17	12,65	3,8	2,2							

Com base nos dados expostos, é possível adiantar algumas relações que seguidamente se expõem:

$$N_{DPL_{100}} \approx 3,6 N_{DPSH} \quad (6.8)$$

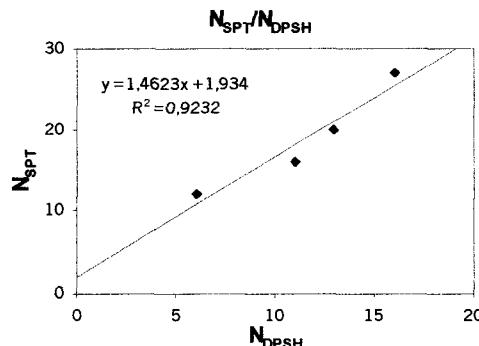
$$Rd_{DPL_{100}} \approx 2,1 Rd_{DPSH} \quad (6.9)$$

$$N_{SPT} \approx 1,5 N_{DPSH} \quad (6.10)$$

$$N_{DPL} \approx 2,4 N_{SPT} \quad (6.11)$$

A aplicação prática das referidas correlações é naturalmente discutível, pelas razões anteriormente expostas e pela especificidade dos perfis de sondagem nos solos residuais de granitos.

A variação de N_{SPT} com N_{DPSH} à mesma profundidade é representada na Figura 6.17. No entanto, deve-se ressalvar a baixa representatividade de uma análise limitada à comparação de dois ensaios, embora cuidadosamente realizados e praticamente contíguos.



Sendo os solos residuais graníticos em estudo, de constituição granulométrica, vista à luz das metodologias clássicas, típica de areias siltosas e siltes arenosos, há tendência para aplicar correlações para a determinação de parâmetros mecânicos como o ângulo de atrito, propostas por vários autores, para materiais arenosos. Desse exercício, com base nos valores de N_{SPT} , resultaram as seguintes indicações:

Autores	ϕ'
Castro (1988)	$\approx 34^\circ$
Meyerhof (1956)	$32^\circ (3\text{ m}) < \phi' < 34^\circ (6\text{ m})$
Bowles (1988)	$30^\circ (3\text{ m}) < \phi' < 34^\circ (6\text{ m})$

Os valores calculados com base nas referidas correlações não surpreendem, uma vez que o ângulo de atrito determinado em laboratório, pelos ensaios de corte directo e triaxial, são respectivamente $\phi_{CD} = 32,7^\circ$ e $\phi_T = 33,2^\circ$.

As referidas correlações estão longe de apresentar um único valor para o ângulo de atrito, o que é compreensível dada a diminuição, ainda que suave, do grau de alteração do maciço em profundidade, pois denota-se na maioria dos solos residuais uma melhoria das características de resistência em profundidade. É óbvio que quando se trata de correlações, se supõe homogeneidade no maciço, o que geralmente não acontece nos solos residuais de granítóides.

Até 6,5 m, o número de golpes necessário para a penetração de 30 cm do amostrador de Terzaghi, variou entre 10 e 30 pancadas, o que remete os solos residuais do granito de Marvão, para a classificação de areias medianamente compactas, com base nas classificações clássicas, e que de certa forma está de acordo com o peso volúmico seco *in situ*, (ítem 5.17). Nos restantes solos onde se realizaram ensaios SPT, rapidamente se atingiu $N_{SPT} = 60$, entre 1,5 m e 2,5 m de profundidade.

6.7 – Conclusões preliminares

A análise e interpretação dos resultados obtidos com a realização de ensaios penetrométricos em 16 perfis de solos residuais de granítóides, proporcionou a possibilidade de retirar algumas ilações que seguidamente se resumem.

Tendo em conta as espessuras de solo residual dos referidos perfis (Capítulo 3), é importante registar que em todos os casos as sondagens penetrométricas ficaram aquém das profundidades previstas, por vezes, nem metade da espessura ultrapassaram. Esta situação prende-se naturalmente com a franca melhoria das características de resistência destes solos com a profundidade, em alguns casos; e mais casualmente, com a possibilidade de intercepção com blocos de rocha mais ou menos alterada de dimensões consideráveis que jazem no seio do solo residual.

Nos perfis correspondentes aos solos residuais mais grosseiros, (como por exemplo: 73 – Vidigueira, 47 – Barbacena, 45 – S. Gregório), o forte imbricamento das partículas angulosas e de grandes dimensões (2 a 3 cm de diâmetro), proporciona aos solos uma tal rigidez, que não permite o avanço da penetração por métodos mais potentes como o DPSH e o SPT. Como se sabe, estes métodos são muito usados em rochas brandas (Robertson & Mayne, 1998), pelo que se infere que estes níveis de solos residuais “rijos” – “hard soils” podem oferecer resistências à penetração superiores às reveladas por certas rochas brandas “soft rocks”, por razões que se prendem com a resistência dos grãos minerais, imbricamento dos mesmos, teor em água, etc.

A profundidade atingida pelo DPSH nos solos residuais graníticos (s.l.), é muito superior ($>$ que duas vezes) à profundidade atingida pelo DPL no mesmo perfil; o que se justifica pela maior energia de impacto do primeiro método, tornando-o mais aconselhável neste tipo de solos residuais. Esta discrepância de profundidades, só não se verifica, quando ocorrem núcleos de rocha granítica (s.l.), em que terminam os dois ensaios à mesma profundidade.

Os gráficos resultantes da aplicação dos quatro métodos penetrométricos (DPL, DPSH, SPT e CPT) aos solos residuais graníticos (s.l.) vêm confirmar a alteração heterogénea ao longo dos perfis, com zonas mais resistentes (blocos ou agregados de solo), no seio da matriz de solo mais branda. As zonas de menor resistência coincidem com zonas de diaclases onde a circulação de água se faz preferencialmente e favorece a alteração nas proximidades. A presença de calhaus grosseiros conduz a uma maior resistência de ponta (qc no CPT) ou (Rd nos restantes métodos), que não corresponde a um aumento da resistência da matriz a igual profundidade.

O número de ensaios CPT realizados neste estudo é muito baixo, assim como as profundidades atingidas. Este facto prende-se obviamente com as enormes dificuldades em fixar o equipamento através dos trados de ancoragem, de modo a proporcionar a reacção necessária à realização do ensaio. Esta limitação é típica nestes solos graníticos (s.l.), especialmente nos mais grosseiros, por duas razões principais: i) a difícil penetração dos trados em solos tão rios; ii) o insignificante atrito lateral característico destes solos, não contribui para a fixação dos trados no subsolo.

Os ensaios DPL e CPT revelaram ser os métodos mais sensíveis para detectar pequenas heterogeneidades típicas destes solos residuais. Como o DPL é mais fácil de realizar e, nestes solos o atrito lateral, geralmente, não é significativo (houve estabilidade nas paredes dos furos de sondagem), pode-se dispensar o CPT, porque é mais caro, mais difícil de realizar e apresenta menor mobilidade, para uma primeira campanha de prospecção em locais de solos graníticos (s.l.).

Comparando os resultados dos dois penetrómetros ligeiros (DPL₁₀₀ e DPL_{LNEC}), quando realizados lado a lado, nota-se que há diferenças nas resistências dinâmicas e profundidades

atingidas (*e.g.* Fronteira), facto que se explica principalmente pelas seguintes razões: i) geometria do cone, nomeadamente ângulo apical ($DPL_{100} \Rightarrow 30^\circ$; $DPL_{LNEC} \Rightarrow 60^\circ$); ii) meio de transmissão de energia ($DPL_{LNEC} \Rightarrow$ manual; $DPL_{100} \Rightarrow$ mecânico). Apesar disso, estas diferenças não parecem significativas, tendo em conta as heterogeneidades laterais típicas neste tipo de solos residuais. No entanto, os ensaios com o penetrómetro dinâmico ligeiro, podem atingir profundidades maiores nos solos residuais menos grosseiros e mais homogéneos como são exemplos o caso do perfil de Marvão seguido do perfil de Reguengos.

É importante salientar que nenhuma das 68 sondagens penetrométricas interceptou o nível freático, nos 16 perfis seleccionados, o que juntamente com os valores do teor em água determinados nas amostras retiradas pelo amostrador do SPT, confirma o estado de não saturação generalizado destes solos residuais, apesar da maioria dos ensaios ter sido realizada em Janeiro, um dos meses mais pluviosos em todo o território. À natureza não saturada destes solos, associa-se a elevada resistência dos mesmos, devido às ligações estruturais entre partículas e ao efeito de sucção (Schnaid *et al.*, 1998). Os teores em água geralmente reduzidos, são, também, responsáveis pela relativa baixa coesão destes solos que se repercute, naturalmente, no incipiente atrito lateral registado nas varas dos penetrómetros.

Por todas as variantes referidas e limitações apontadas aos ensaios penetrométricos utilizados, e devido à especificidade de cada perfil de solo residual, assim como a heterogeneidade vertical e horizontal típica dos perfis dos solos residuais de granitos e rochas afins, seria pretensioso, ou mesmo enganoso, apresentar valores para parâmetros mecânicos, tais como o ângulo de atrito, módulo de deformabilidade, entre outros, obtidos a partir de correlações propostas por outros autores para solos sedimentares, que apesar de constituírem, na generalidade, maciços homogéneos, não lhes são retiradas as reservas e precauções na utilização dessas mesmas correlações.

Também não é conveniente extrapolar os valores de resistência dinâmica (R_d) e resistência de ponta (q_c), obtidos em determinado perfil (*e.g.* Marvão), para diferentes locais, onde seja identificado o mesmo tipo de solo residual. Quando muito, esses valores são meramente indicadores do que se pode encontrar. Convém relembrar o carácter pontual destes ensaios, cujos resultados podem variar radicalmente a poucos metros de distância.

Segundo Blight (1997), é erróneo teorizar acerca dos resultados dos ensaios *in situ* num solo residual de determinado local, se num perfil do mesmo tipo de solo situado relativamente próximo, essas hipóteses não se verificam de todo, porque as condições de jazida podem ser completamente diferentes, tais como: a espessura do solo residual, intensidade das descontinuidades, proximidade do nível freático, exposição solar, protecção pela vegetação, relevo e paleorelevo, teor em água, etc., das quais podem resultar propriedades mecânicas *in situ* completamente diferentes, como se de outro tipo de solo residual se tratasse.

Por fim, interessa destacar que, na interpretação dos dados qualitativos e semi-quantitativos obtidos nos ensaios penetrométricos (DPL, DPSH, SPT e CPT), é imprescindível o conhecimento da história geológica, assim como das características intrínsecas e extrínsecas respeitantes ao perfil do solo residual em causa.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sem observações de campo sistemáticas, colheita de materiais representativos das manchas de solos e seu estudo laboratorial, não seria legítimo apresentar conclusões seguras sobre este importante tema da génesis, propriedades (químicas, mineralógicas, físicas e geotécnicas), e comportamento geomecânico dos solos residuais graníticos (s.l.) do Alentejo. Este trabalho consistiu num estudo sistemático, sem o qual, não seria possível uma visão global das características dos solos residuais dos granítóides no Alentejo em particular, e em regiões de clima temperado mediterrânico em geral.

O processo de formação de um perfil de solo residual é muito complexo, difícil de compreender e difícil de generalizar. É evidente que excepto raras generalizações válidas, não é fácil relacionar as propriedades de um solo residual directamente a partir da rocha-mãe. Esta situação requer considerações individuais e é raramente possível extrapolar da experiência de uma área, para a previsão das condições de outra área, mesmo que a geologia do substrato seja semelhante nas duas áreas.

A análise e interpretação dos resultados experimentais, constantes nos Capítulos 4, 5 e 6, assim como a observação directa dos perfis de alteração e locais de amostragem dos solos residuais granítóides, incluídos neste estudo, permitem tecer alguns comentários agrupados na forma de subcapítulos.

7.1 – Perfis de alteração e locais de amostragem

- Na quase totalidade dos perfis estudados, verificou-se a ausência de uma variação gradual das propriedades macroscopicamente observáveis (cor, textura, etc.) ao longo do perfil, isto é, a inexistência de horizontes de alteração demarcados, o que levou a estudar cada perfil como um todo.
- Na grande maioria dos maciços de solos residuais granítóides, é evidente a estrutura e textura herdadas da rocha-mãe, salientando-se as diaclases ‘relíquia’, que têm um forte controle sobre a alteração diferencial e que são responsáveis por uma heterogeneidade comum nas propriedades destes solos. Este tipo de alteração das rochas intrusivas, especialmente de grão grosso, tendem a produzir enormes blocos de rocha arredondados, gerados a partir das descontinuidades que se interceptam. Estas bolas, “*corestones*”, são envolvidas por material friável arenoso, geralmente compacto, produto de alteração com descontinuidades ‘relíquia’. Mas a alteração diferencial pode não diminuir com a profundidade, tornando-se mais uniforme, pois a intensidade pode variar em função de modificações mineralógicas ligeiras, ou como resposta a diferentes ambientes de alteração mais antigos.
- As dificuldades na execução da amostragem foram uma constante. Por um lado, a fraca coesão entre partículas e a baixa percentagem de argila dificultavam a obtenção de amostras indeformadas; por outro lado, o forte imbricamento das partículas grosseiras (feldspato e quartzo) de alguns solos não contribuíam para a fácil extração de amostras, promovendo a sua perturbação. A forma mais eficaz, apesar de bastante morosa, de obter amostras indeformadas de grande qualidade, neste tipo de solos residuais, é a amostragem de blocos talhados *in situ*, de dimensões consideráveis, seguido de imediato do seu isolamento com gaze e parafina (Cap. 2). Foram também colhidas amostras de qualidade aceitável, em solos de grão médio a fino, utilizando amostradores em aço inox.

biselados e lubrificados. A colheita de amostras remexidas não ofereceu obstáculos significativos, uma vez que se teve o cuidado de colher a maioria dos solos durante o Inverno e a Primavera, garantindo assim um certo comportamento friável dos mesmos, facilitado por alguma humidade conservada nos perfis. Uma situação que ficou clara neste estudo, é que os mesmos solos residuais colhidos na época seca (Verão e parte do Outono), apresentam-se de forma bastante diferente, podendo assumir um comportamento próximo de rocha pouco alterada, por apresentar coesão elevada entre partículas, devido ao cimento intergranular praticamente seco e rígido, tornando a amostragem pelos métodos usuais em Mecânica dos Solos, praticamente impossível. Nestes casos, nesta época do ano, só a sondagem por rotação seria eficaz.

- Neste estudo, tornou-se evidente que a inspecção visual dos perfis e das amostras de mão, é fundamental na descrição dos solos residuais. Muitos solos residuais granítóides têm aparências e características geotécnicas no estado indeformado muito diferentes das do estado remoldado. É necessária a comparação entre as descrições *in situ* e os dados provenientes do laboratório que permitem a sua identificação e classificação; quando as informações não coincidem é preferível apresentar as duas.
- Em certos maciços de solos residuais granítóides, principalmente nas rochas mais ácidas, verifica-se uma variabilidade considerável da cor e da textura dos materiais, o que naturalmente traduz propriedades físicas e geotécnicas também distintas. Essa heterogeneidade dentro do mesmo maciço está patente, por exemplo, nos maciços graníticos (s.l.) de Nisa, Vimieiro, Vidigueira, Évora, St^a. Eulália, entre outros, e reflecte: quer a existência de microambientes distintos, controlados pela estrutura, diaclases e filões ‘relicvia’, proporcionando a ocorrência de diferentes produtos de alteração, a partir do mesmo litótipo; quer a ocorrência de variações geoquímicas, mineralógicas e do *fabric* do maciço rochoso, consequência do seu processo de instalação, idade, se foi ou não sujeito a forças tectónicas, metamorfismo, etc.. Este tipo de alterações primárias pode ser determinante no caminho a seguir pela alteração meteórica subsequente.
- Devido à variabilidade vertical e horizontal patente nos perfis, não se pode afirmar que as amostras representam integralmente os maciços seleccionados; por conseguinte, colheram-se amostras dos solos correspondentes ao litótipo predominante.
- Pode dizer-se que, a partir da inspecção visual de 62 perfis (36 em granitos, 13 em granodioritos e 13 em tonalitos), nos maciços de rochas mais básicas, tonalitos (*e.g.* Reguengos e Montemor-o-Novo) e alguns granodioritos, a passagem de rocha sã para solo residual é abrupta, isto é, praticamente não existe rocha alterada. A zona de transição nos granitos, também é mínima, entre 0 e 0,5 m, e no máximo 1 m, o que aliás está de acordo com os perfis de alteração de rochas graníticas que ocorrem usualmente em clima temperado ou sub-tropical.
- É igualmente evidente que as maiores espessuras de solo residual, correspondem geralmente aos granitos, (nos maciços de Marvão - Nisa, Ervedal, St^a. Eulália, Vimieiro, etc.), enquanto que as menores pertencem aos tonalitos. A maior susceptibilidade à erosão destes últimos é decisiva; os solos residuais dos tonalitos são constituídos geralmente por partículas mais finas e mais móveis, resultantes de minerais, silicatos ferromagnesianos e cáticos, menos resistentes à alteração. Nos solos graníticos predominam os grãos de quartzo e feldspato potássico, geralmente pouco alterados, encontrando-se mais imbricados e estruturados e, apesar de na maioria dos casos,

apresentarem uma porosidade maior, as ligações entre partículas são mais fortes.

- É importante salientar a influência da exposição ao sol dos perfis de solo residual. O mesmo tipo de solo residual, exibindo uma distribuição praticamente homogénea de características, pode apresentar variações significativas do teor em água natural, caso as amostras sejam colhidas em taludes virados a Norte (mais húmidos) ou a Sul (mais secos); estas variações podem ultrapassar 5 %, mesmo entre amostras colhidas a poucos metros de distância, à mesma hora. O teor em água influencia grandemente as características de resistência e deformabilidade, como se pode verificar a partir dos resultados dos ensaios de corte directo e edométrico (Cap.5), constituindo mais um factor para a variabilidade nos valores das propriedades geotécnicas destes solos residuais.
- A diversidade dos perfis dos solos residuais granítóides estudados no Alentejo, deve-se, para além da natureza da rocha-mãe, ao grau de alteração que pode variar significativamente. Assim, alguns minerais, como por exemplo os feldspatos, podem estar completamente decompostos, enquanto que os grãos vizinhos, de quartzo, estão virtualmente inalterados (e.g. manchas de Marvão, Fronteira, Pias). Noutros perfis, (e.g. Nisa, St^a. Eulália, Vidigueira, Aguiar, S. Gregório), os feldspatos mantêm-se pouco alterados, o que, juntamente com os grãos de quartzo, proporciona solos com partículas bastante imbricadas e coesos, oferecendo grande resistência, a solicitações de corte (importante para a estabilidade dos taludes) e à amostragem.

7.2 – Geoquímica e mineralogia

As interpretações subsequentes aos resultados da análise da composição química das rochas e respectivos solos residuais, assim como da caracterização mineralógica destes últimos, constam no Capítulo 4. No entanto, salientam-se em seguida as principais conclusões.

- A sílica (SiO_2) diminui claramente da rocha sã para o solo residual, enquanto que a alumina (Al_2O_3) aumenta, podendo agrupar-se os solos residuais em dois conjuntos:
 - i) $\text{Al}_2\text{O}_3 > 21\% \Rightarrow$ compreende os solos resultantes da alteração de rochas graníticas (s.l.), que ocorrem em zonas de relevo mais acidentado, junto à Serra de S. Mamede no NE Alentejano (amostras 53, 55, 58, 77, 79 e 84), e solos de regiões de relevo ondulado, nas imediações de Montemor-o-Novo, Arraiolos, Vimieiro, Ervedal e St^a. Eulália (amostras 41, 42, 43, 44, 52, 59 e 70), locais onde a drenagem promove a lixiviação dos elementos mais móveis (Ca, Na, K);
 - ii) $\text{Al}_2\text{O}_3 < 21\% \Rightarrow$ solos de alteração de granítóides de regiões mais aplanadas, tais como, o sul de Évora, Redondo, Fronteira, Elvas, Vidigueira, Pias e Reguengos de Monsaraz, às quais correspondem as amostras 1, 15, 48, 68, 72, 76 e 82, e onde os menores declives condicionam a drenagem.
- É importante referir que, quanto mais avançado é o estado de alteração do solo residual, (ver índices de alteração), maior é a quantidade de água retida nas estruturas dos minerais secundários de neoformação. A P.R. (perda ao rubro) é significativa nestes solos residuais, porque está directamente relacionada com a água estrutural, cuja percentagem aumenta com o aparecimento de minerais secundários de neoformação, que são essencialmente filossilicatos hidratados, e geralmente denominados por minerais argilosos.

- Verificou-se, a partir das amostras analisadas, que os elementos mais lixiviados são Ca, Na e K, apresentando oscilações relativas entre eles, seguidos por ordem decrescente de mobilidade por Si, Ti e Al.
- Constatou-se que o K pode constituir um bom indicador da alteração dos granitóides, porque a sua diminuição nos solos residuais em relação à rocha-mãe, é mais constante que a de Na e Ca. A redução do K relaciona-se com a alteração do feldspato potássico, enquanto que o seu aumento corresponde à preservação das moscovites e da ortoclase quando a meteorização química não é significativa e, ao aparecimento de minerais argilosos do grupo da ilite, cuja formação é favorecida em locais onde existam concentrações elevadas de Al e K.
- É notória a tendência para o Na e o Ca decrescerem com o avanço da meteorização; as excepções verificam-se quando, nos solos residuais pouco evoluídos, subsistem mais ou menos preservadas as plagioclases.
- A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$, significa que a bissialitização foi o processo de meteorização geoquímico que predominou na génesis destes solos residuais. A bissialitização engloba o fenómeno de arenização, típico de zonas temperadas e que consiste na transformação, por hidrólise, das rochas granitóides em saibro, formação evoluída que preserva a estrutura da rocha primitiva embora esta se mostre pouco coesa e fortemente lixiviada (Aires-Barros, 1991).
- No que concerne aos índices de alteração química, constatou-se que o índice de lixiviação β , constitui um bom indicador do tipo de alteração verificada nos maciços granitóides estudados, confirmando a transformação dos feldspatos como o processo de alteração predominante.
- Por outro lado, o índice DECHAF, proposto por Miura (1973), revelou tratar-se do índice que melhor traduz os processos de meteorização a que foram submetidos os maciços rochosos granitóides. Em primeiro lugar, porque ao considerar um maior número de elementos móveis, abrange, como é o caso, rochas com uma variação petrogeoquímica significativa: granitos alcalinos, granitos calco-alcalinos, granodioritos e tonalitos. Em segundo lugar, porque inclui a H_2O^+ nos produtos de alteração remanescentes das rochas alteradas e/ou solos residuais, e que, tal como já se referiu, está directamente relacionada com o aparecimento de minerais de neoformação, durante a meteorização, particularmente minerais argilosos, que devido à sua cristaloquímica podem reter quantidades consideráveis de moléculas de água.
- No que diz respeito aos indicadores de meteorização a partir de razões moleculares, destacam-se as relações, alumina *versus* (alumina + silica) e (alcalis + alcalino-terrosos) *versus* alumina, sugeridas por Onodera *et al.* (1974), que quando aplicadas às amostras analisadas, confirmam a diminuição generalizada dos elementos menos estáveis nos solos residuais relativamente às respectivas rochas originais; as maiores ou menores variações reflectem o estado de maturidade do solo.
- O índice de meteorização potencial – WPI (Reiche, 1943), aplicado às rochas e solos amostrados, provou constituir um bom índice para quantificar a intensidade de meteorização, exprimindo a maior aptidão das rochas de composição intermédia (tonalitos e granodioritos) à meteorização, quando comparadas com os granitos. A

utilização da razão entre o *Product Index* (ou direcção de meteorização) – PI no solo residual e na rocha sã, designada nesta tese por WWPI, concorre para estes solos, como um bom indicador da intensidade de meteorização relacionada com a velocidade de extracção de sílica. É de realçar que, de uma forma geral, estes solos se encontram pouco evoluídos do ponto de vista geoquímico. Qualquer dos restantes índices de meteorização referidos, nomeadamente MWPI – *Modified Weathering Potencial Index*, CIW – *Chemical Index of Weathering*, CIA – *Chemical Index of Alteration*, V – *Vogt ratio*, I_{mob} – *Mobiles index* e o IA – índice de alteração de Parker, são aplicáveis às amostras de rochas e respectivos solos residuais, confirmando que na grande maioria dos casos, a decomposição química manifestou-se pouco intensa.

- Relativamente à presença de minerais argilosos identificados por difracção de raios-X, assinala-se a existência de três grupos de solos residuais:

Grupo I – comprehende solos onde predomina a caulinita com boa ordem estrutural, os quais na sua maioria ocorrem no Nordeste Alentejano, mais precisamente nas imediações da Serra de S. Mamede (Marvão, Carreiras, Portalegre), onde o relevo é mais acentuado, a pluviosidade é maior e as condições de drenagem são boas, favorecendo a lixiviação dos metais alcalinos e calco-alcalinos; o segundo mineral mais importante neste grupo de solos é a ilite;

Grupo II – inclui solos residuais que contêm a esmectite como mineral argiloso dominante; predominam nas regiões mais planas a sul, na área abrangida por este estudo, e nas zonas deprimidas, onde a drenagem é dificultada e a lixiviação é condicionada;

Grupo III – abrange os restantes solos estudados, nos quais o principal mineral argiloso vai altermando; neste grupo abundam as ilites e as micas mais ou menos degradadas, podendo ocorrer também, interestratificados ilite-esmectite e clorite-esmectite.

- O facto de terem sido identificados minerais, tais como: anfíbola, mica e plagioclase, em quantidades consideráveis, nos difractogramas dos solos residuais seleccionados, significa que a meteorização de que foram alvo as respectivas rochas originais não foi intensa, reforçando as conclusões retiradas dos dados geoquímicos.
- Os difractogramas que apresentam picos de maior intensidade para os filossilicatos, correspondem a solos com maior percentagem de finos (fracção inferior a 0,075 mm), mais precisamente da fracção argilosa (ver Cap. 5).
- Os solos com maior percentagem de esmectite e boa percentagem de finos, como é o caso do solo 46, são os que apresentam valores mais elevados de expansibilidade e de índice de plasticidade, devido à granularidade extremamente fina deste mineral argiloso relativamente a outros minerais argilosos, à sua maior capacidade de absorver água nas superfícies internas e externas dos cristais e, também, pela sua maior capacidade de troca catiónica.
- Tornou-se claro, neste estudo, que factores, tais como o relevo e o clima, controlam mais o tipo de minerais de neoformação existentes nos produtos de alteração, e consequentemente a natureza dos solos residuais e respectivas propriedades físicas e mecânicas, do que propriamente o tipo de rocha-mãe.

7.3 – Características geotécnicas

Relativamente às **propriedades físicas determinadas *in situ*** dos 62 solos residuais de granitóides, apresenta-se uma análise global dos resultados obtidos.

- i) O **teor em água natural** (w_o), oscila entre 2 e 21 %, com um valor médio de 10 %; este intervalo reflecte melhor as condições climatéricas no momento da colheita, ou nos dias que a antecederam, exposição do perfil à insolação, drenagem, etc., do que propriamente as características intrínsecas dos solos; no mesmo solo, este parâmetro pode variar mais de 20 %, consoante a amostragem seja feita no Verão ou no Inverno. É importante referir que o valor desta propriedade é determinante nos resultados da resistência ao corte e compressibilidade, determinados no laboratório, em amostras indeformadas.
- ii) Os valores do **peso volúmico seco *in situ*** (γ_d), variam entre 14,12 e 19,03 KN/m^3 com um valor médio de 16,46 KN/m^3 ; os valores particularmente baixos deste parâmetro traduzem, por um lado, a estrutura tipicamente aberta destes solos e, por outro, a composição mineralógica constituída por minerais relativamente pouco densos, (quartzo, feldspatos e micas, remanescentes, principalmente da alteração das rochas mais ácidas) e minerais argilosos de neoformação.
- iii) Os valores determinados para o **índice de vazios *in situ*** (e_o), entre 0,438 e 0,861 (média de 0,605), e para a **porosidade** (n), reflectem a estrutura aberta resultante da remoção dos materiais finos e preservação de uma textura granular, cujos grãos se encontram unidos por ligações ténues. Os solos que apresentam menores valores para a porosidade correspondem: a materiais resultantes de granitos ou granodioritos onde a alteração foi mínima, mantendo o solo, basicamente, o *fabric* herdado da rocha-mãe, com os respectivos minerais inalterados (quartzo) ou pouco alterados (feldspatos e micas); ou ainda a tonalitos cuja alteração dos seus minerais (nomeadamente plagioclases e ferromagnesianos), se processa de forma mais homogénea, resultando numa matriz mais fechada, principalmente no que respeita aos poros de maiores dimensões.

A relação entre o e_o e o γ_d nos solos estudados, é apresentada na Fig. 7.1. Se considerarmos apenas os valores dos solos resultantes dos granitos, o valor do coeficiente de correlação sobe para 0,9449, significando que existe menos dispersão de valores, mas a diferença não é suficiente para considerar duas populações.

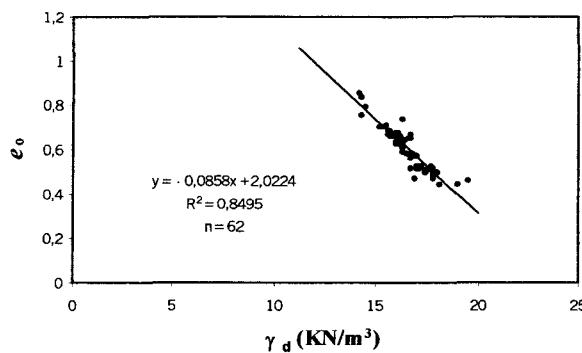


Figura 7.1 – Variação do índice de vazios (e_o) em função do peso volúmico seco *in situ* (γ_d), dos solos residuais graníticos.

No que respeita à preparação das amostras para **ensaios de identificação**, há a referir que nos solos residuais dos granítoides em estudo, a secagem prévia dos provetes não influencia significativamente a composição granulométrica do solo.

Existe uma tendência geral para que a **percentagem de finos** (silte + argila) seja crescente, se considerarmos a sequência: granitos, granodioritos e tonalitos; o contrário se passa para a percentagem de areia, isto é, decrescente segundo a mesma ordem.

A grande maioria dos solos residuais granítoides, apresenta uma **distribuição granulométrica** extensa; são materiais geralmente bem graduados, pois são constituídos por partículas que abrangem uma vasta gama de dimensões, desde as partículas mais finas (fracção argilosa), aos siltes, areias e, por vezes, seixo fino. A percentagem de finos, fracção inferior a 0,075 mm, compreende um intervalo de variação de 2 a 55 %, com uma média de 19 %; variando a percentagem de argila entre 1 a 29 %, com uma média de 6 %. No entanto, é notória a influência das partículas mais finas, mesmo que não tenham grande representação ponderal, no comportamento dos solos, nomeadamente na permeabilidade, na coesão e na deformabilidade. É importante referir que os parâmetros granulométricos obtidos, não são tão correlacionáveis com as propriedades geomecânicas, como o são para os solos sedimentares. Na verdade eles não traduzem a disposição natural das partículas "*in situ*", uma vez que as partículas finas se aglomeram em agregados mais grosseiros, proporcionando uma estrutura relativamente porosa que tem reflexos no comportamento hidráulico e mecânico dos solos residuais "*in situ*".

A percentagem de finos não é inversamente proporcional ao índice de vazios (e_0), o que comprova a estrutura 'alveolar' inerente a grande parte destes solos residuais; isto é, o solo pode ser relativamente silto-argiloso e ter um índice de vazios razoável.

Para a determinação do **limite de liquidez** foram utilizados dois processos: o método da Concha de Casagrande (w_L) e o método do cone penetrométrico da BS (w_{Lc}). A correlação entre os resultados obtidos por ambos os métodos é apresentada na Figura 7.2, e é considerada boa para este tipo de solos tão heterogéneos. Os valores, mínimo, médio e máximo, do w_{Lc} (29, 37 e 61 %) são superiores (5 pontos em média) aos valores de w_L , (23, 32 e 63 %). Salienta-se a maior reprodutibilidade do cone penetrométrico em relação à Concha de Casagrande, devido à maior subjectividade dos resultados obtidos por este método, causada pela maior dependência do operador, (apreciação visual do fecho do sulco, velocidade de aplicação dos golpes, volume de solo colocado na concha, etc.). Além disso é bem conhecida a dificuldade em obter o w_L em solos siltosos e arenosos (Kumapley & Boakye, 1980). No caso dos solos residuais em estudo, nota-se uma maior dispersão de valores, principalmente nos solos mais micáceos, porque as micas, que se apresentam razoavelmente bem preservadas nestes solos, mostram tendência a orientar-se segundo a superfície da Concha de Casagrande, aumentando a velocidade de fecho do sulco, influenciando deste modo os resultados. Pelos motivos apontados, aconselha-se o uso do cone penetrométrico, como método preferível na determinação do limite de liquidez nos solos residuais graníticos (s.l.), até porque nem sempre é possível a determinação deste limite pelo método da Concha de Casagrande.

A existência de muitos minerais micáceos nos solos residuais menos alterados, ao contrário da maioria dos solos sedimentares, compromete a sua **plasticidade**; assim a subavaliação do valor do índice de plasticidade (I_p), tem que ser levada em conta, quando se tenta correlacionar o I_p com outros parâmetros geotécnicos, nomeadamente, expansibilidade,

equivalente de areia, actividade, coesão, etc.. Na generalidade os valores da **expansibilidade** são demasiado elevados (Min. = 3%; Máx. = 25 %; Méd. = 9 %), para os valores de plasticidade determinados (Máx. = 30 %; Méd. = 6 %; sendo 34 % dos solos ensaiados, não plásticos - NP).

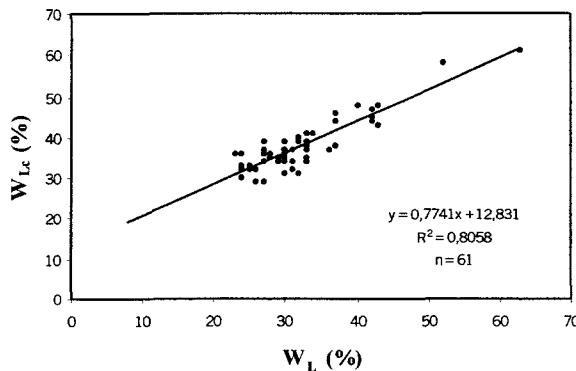


Figura 7.2 – Relação entre os valores do limite de liquidez determinados pelo método de Casagrande (w_L) e pelo método do cone penetrométrico (w_{Lc}).

Em alguns maciços (Montemor-o-Novo, Reguengos, Pias, Fronteira, etc.), apesar das baixas percentagens de argila, os solos apresentam índices de plasticidade consideráveis, assim como **actividade coloidal** e expansibilidade. Isto deve-se não tanto à quantidade como ao tipo de minerais argilosos; e nos exemplos apontados, predomina a esmectite. Por outro lado, a percentagem de argila nestes solos pode estar subavaliada, se considerarmos a fracção granulométrica ‘argila’, a corresponder aos grãos de dimensões inferiores a 0,002 mm; de facto, a fracção granulométrica ‘silte’ pode conter agregados de minerais argilosos que não se desagregaram totalmente durante a análise granulométrica, mas cuja presença se reflecte na plasticidade e actividade destes solos que é relativamente alta para a percentagem de ‘argila’ detectada.

Os valores do **índice de consistência** ($1,2 < I_c < 18$) elevados, na maioria destes solos, assim como os valores negativos do **índice de liquidez** (I_L), justificam-se pelos teores em água *in situ* (w_o), frequentemente baixos, nesta região. A julgar pelos valores de I_L calculados, todos os solos estão longe de liquefazer, até porque os teores em água quando sobem, é por períodos de tempo muito curtos, devido, a precipitações de curta duração e condições de drenagem favoráveis (valores de e_o - índice de vazios *in situ*, geralmente elevados).

À partida, os valores de **equivalente de areia** (EA) determinados (Min. = 14 %; Máx. = 80 %; Méd. = 32 %), deveriam ser, em média, maiores; o que não acontece, devido provavelmente à influência das micas e ao tipo de minerais argilosos, presentes nestes solos. Todavia, assinala-se os menores valores de EA nos solos tonalíticos comparativamente aos solos graníticos; a percentagem de finos é uma justificação, correspondendo os valores mais elevados de EA aos solos graníticos de grão grosso.

O **peso específico das partículas** situa-se entre 24,81 e 26,47 KN/m³ nos solos graníticos, entre 25,98 e 27,75 KN/m³ nos solos granodioríticos e entre 26,18 e 28,05 KN/m³ nos solos tonalíticos. Este parâmetro apresenta valores mais baixos nos solos residuais dos granitos, devido à menor densidade dos minerais félsicos e minerais argilosos resultantes da alteração do feldspato potássico, relativamente aos solos residuais de rochas de composição

granodiorítica e, principalmente tonalítica, onde subsistem minerais ferromagnesianos com densidades maiores.

A **permeabilidade** média dos solos apresenta variações consideráveis, ($4,8 \times 10^{-7}$ a $9,7 \times 10^{-4}$) m/s, mas comprehensíveis, tendo em conta a ampla distribuição do grão destes materiais, e que as partículas finas estão geralmente agregadas no seu estado natural. Sendo assim, consoante a estrutura do solo é mais ou menos aberta, a sua densidade relativa, ou o tipo de ensaio preconizado, até para o mesmo tipo de solo, pode apresentar resultados bastante distintos. O mais correcto seria avaliar este parâmetro *in situ*, até porque a permeabilidade das descontinuidades não é tida em conta nos ensaios laboratoriais; prevê-se, contudo, que a grande variabilidade deste parâmetro, aumente ainda mais no campo, devido à heterogeneidade micro e macroestrutural patente na grande maioria destes solos residuais.

Os solos residuais granítóides foram classificados com base nas **classificações geotécnicas** do Sistema Unificado e AASHTO, tendo-se chegado às seguintes conclusões: i) a grande maioria dos solos agrupa-se nas areias siltosas, SM e SW-SM em 60 % e 21 % dos solos estudados, respectivamente, pertencendo os restantes 19 % a vários grupos menos representados, tais como, SC (8 %), SP-SM (3 %), SC-SM (3 %), GW, GP-GM e MH; ii) a maior parte dos solos apresenta um comportamento bom a excelente na camada sob o pavimento, correspondendo a diversos subgrupos tais como, A-1-b (42 %), A-2-4 (29 %), A-1-a (8 %), A-2-5 (3 %), excepto os solos com mais finos siltosos ou argilosos resultantes de uma alteração química mais pronunciada dos feldspatos, cujos produtos de alteração ainda não tenham sido lixiviados, e que pertencem aos subgrupos A-2-6 (3 %), A-2-7 (7 %), A-4 (3 %), A-6 (3 %) e A-7-5 (2 %).

De acordo com a classificação proposta por Wesley & Irfan (1996), específica para solos residuais (Quadro 1.3), refere-se que os solos granítóides abordados neste estudo incluem-se, quase na totalidade, no Grupo A: grande parte no subgrupo (a) – solos com uma forte influência da macroestrutura, e os restantes no subgrupo (b) – solos com uma forte influência da microestrutura. É importante salientar que, por vezes, ocorrem solos dos subgrupos (a) e (b) no mesmo perfil de alteração. Apenas dois solos (amostras 40 e 42) parecem pertencer ao subgrupo (c) com pequena influência estrutural, e um solo (amostra 46) pode ser incluído no Grupo B, solos fortemente influenciados por minerais argilosos do grupo da esmectite – subgrupo (a); note-se que estes três solos pertencem ao maciço granítico do Vimieiro.

Nas características geotécnicas dos solos residuais dos granítóides de clima temperado, há um forte controle macro e/ou microestrutural e uma menor influência dos minerais argilosos, ao contrário do que acontece nos solos residuais dos climas tropicais.

Apesar de ser necessária a classificação dos solos residuais *in situ*, devido à importância da estrutura no seu comportamento geomecânico, deve-se continuar a utilizar as classificações já existentes baseadas no material remexido, porque a comparação entre os dois sistemas, permite conhecer melhor o comportamento dos solos estruturados.

Realizaram-se ensaios de **compactação** tipo Proctor em quase todos os solos amostrados, tendo em vista a sua utilização em trabalhos de terraplenagem. Alguns locais de amostragem correspondem a ‘saibreiras’ que têm sido exploradas, e cujos materiais, principalmente os resultantes de granitos e granodioritos de grão grosso, têm demonstrado um excelente comportamento em aterros e aptidão para a construção de estradas na região. Tais características de compacidade justificam-se, quer pela distribuição granulométrica extensa,

quer pela preservação dos minerais, basicamente quartzo e feldspatos, que nos casos indicados sofreram essencialmente meteorização física, sendo incipiente a meteorização química.

Os valores do **peso volúmico seco máximo** ($\gamma_{dmáx.}$) variam entre 16,08 e 21,38 KN/m³, com uma média de 18,35 KN/m³, e os valores do **teor em água óptimo** ($w_{ópt.}$) situam-se entre 6,2 % e 19,3 %, com um valor médio de 13,4 %, estando a relação entre estes parâmetros ilustrada na Figura 7.3.

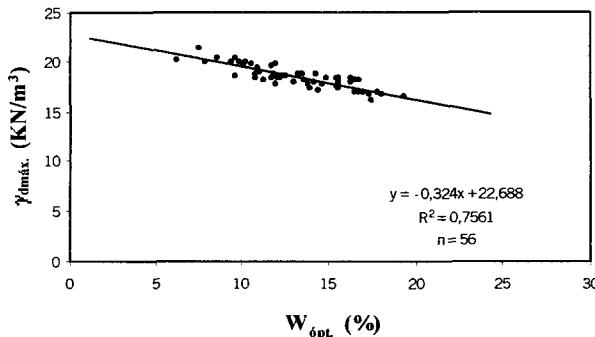


Figura 7.3 – Variação do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx.}$) em função do teor em água óptimo ($w_{ópt.}$), em solos residuais dos granítóides.

Os solos resultantes da alteração das rochas ácidas apresentam, valores de $\gamma_{dmáx.}$ superiores, e melhor comportamento quando colocados em aterro, que os solos provenientes de rochas intermédias. Na realidade, os solos graníticos bem graduados comportam-se melhor quando compactados que os solos tonalíticos, porque estes não possuem características drenantes tão eficientes, devido em parte aos minerais micáceos de hábito lamelar, que subsistiram à alteração, e que dificultam a redução do índice de vazios e a drenagem. Convém relembrar que as plagioclases são mais vulneráveis à alteração que as moscovites, feldspato potássico e quartzo; desta forma enquanto que as micas se apresentam pouco alteradas numa matriz mais fina nos solos tonalíticos, por outro lado, nos solos graníticos, ocorrem em dimensões reduzidas e disseminadas no seio de material essencialmente granular.

Na **resistência ao corte directo**, determinada em amostras deformadas, predomina o carácter granular, friccional, dos materiais ensaiados, que são essencialmente arenosos; deste modo, como a presença de finos e o teor em água no estado natural, são geralmente baixos, a coesão é frequentemente nula, ou próxima de zero; os valores calculados para este parâmetro variam entre 0 e 31,51 KPa, com um valor médio de 3,77 KPa. As maiores coesões verificaram-se nos solos residuais do granito do Vimieiro, correspondendo à amostra 46 (Sabugueiro) o valor mais elevado de todos os solos ensaiados; é importante relembrar, que a este solo corresponde também o maior valor para o limite de liquidez ($w_L = 63\%$), a maior plasticidade ($I_P = 30$), a maior expansibilidade (Exp. = 25 %) e uma das maiores percentagens de argila (22 %), em que o mineral argiloso predominante é a esmectite; por outro lado, é logicamente o solo que apresenta o ângulo de atrito mais baixo ($\phi = 25^\circ$), a permeabilidade mais reduzida ($4,8 \times 10^{-7}$ m/s), assim como um dos equivalentes de areia mais reduzidos ($EA = 18$). Este exemplo, ao ser comparado com os outros solos, comprova sem dúvida, a influência que a mineralogia, principalmente o tipo de mineral argiloso, tem nas propriedades geotécnicas destes solos.

Os valores de **coesão** obtidos nos ensaios de corte directo em amostras indeformadas não são muito elevados, apresentando uma variação de 0 a 27,79 KPa com um valor médio de 10,91 KPa, devendo-se fundamentalmente às ténues ligações constituídas por cimento silto-argiloso, que unem os grãos mais grosseiros. Salienta-se, no entanto, que o teor em água natural com que foram ensaiadas as amostras, indeformadas ou não, exerce uma grande influência nas características de resistência, pois este teor aumenta geralmente a resistência coesiva.

Os **ângulos de atrito** determinados, quer em amostras indeformadas ($29,6^\circ < \phi < 41,1^\circ$ com um valor médio de $34,9^\circ$), ou em amostras desestruturadas ($25^\circ < \phi < 39,2^\circ$ e valor médio de $33,5^\circ$), são usuais em solos sedimentares com características granulométricas semelhantes. Todavia, é notória uma gama de valores mais vasta, devido à heterogeneidade destes solos, assim como em muitos solos com grãos mais angulosos (principalmente aqueles em que a meteorização química é incipiente), os valores do ângulo de atrito são atípicamente elevados. O efeito da angulosidade dos grãos na resistência ao corte, torna-se mais evidente quando as amostras são submetidas ao corte reversivo.

Dois dos solos mais grosseiros dos maciços estudados, foram submetidos a ensaio de corte directo em amostras indeformadas de 400 cm^2 . Os ângulos de atrito ($34,0^\circ$ e $38,7^\circ$) não diferem muito dos obtidos em caixas de dimensões menores (100 cm^2). A coesão, pelo contrário, apresenta valores bastante mais elevados (0,82 e 1,4 MPa), mas admissíveis em granitos decompostos (Rocha, 1981), e que se explicam: pelo equipamento e condições de ensaio diferentes, com tensões normais aplicadas 10 vezes superiores às das caixas normais; a dimensão da amostra permite que seja mais representativa do perfil, mas também inclui mais heterogeneidades; os grãos de maiores dimensões, sobretudo minerais de quartzo e de feldspato com 1-2 cm de diâmetro, praticamente inalterados e fortemente imbricados entre si, ao serem submetidos a esforços transversais sob tensões normais elevadas foram cortados, daí que grande parte da resistência coesiva registada corresponda à coesão intrínseca dos grãos que se partiram durante o ensaio.

Em termos de resistência ao corte, pode-se concluir que, não existem grupos definidos entre os solos resultantes da alteração de granodioritos e/ou tonalitos e granitos; notando-se, contudo, que nos solos residuais de granitos, a variabilidade dos valores dos parâmetros de resistência é significativamente maior, pois os mesmos dependem essencialmente da granularidade do solo e da constituição da matriz, as quais variam bastante nos maciços residuais de granitos. Mesmo dentro de um único maciço, é possível encontrar como rocha-mãe, desde um granito porfiróide a um granito de grão fino (e.g. Nisa, Vimieiro, St^a. Eulália), e os respectivos solos residuais reflectem a textura da rocha que lhes deu origem. Além disso, os grãos de maiores dimensões (fenocristais), são fundamentalmente de feldspato ou quartzo, e tendo estes minerais velocidades de alteração diferentes, condicionam a granularidade dos solos residuais. De igual modo, consoante a composição dos feldspatos seja alcalina ou calco-alcalina, alteram-se em minerais de composição mineralógica e composição granulométrica diferentes, influenciando consequentemente as características de resistência ao corte; o ângulo de atrito depende basicamente do tamanho do grão e, a composição mineralógica da matriz controla principalmente a coesão. Em oposição a esta situação, ocorrem os solos dos maciços de granito homogéneo (e.g. Pias, Fronteira, Elvas, Carreiras) e o conjunto de solos resultantes de granodioritos ou tonalitos, que exibem características granulométricas e composição da matriz mais homogéneas e consequentemente, uma menor variabilidade nos parâmetros de resistência. Em termos comparativos, as médias correspondentes aos três tipos de solos residuais são muito semelhantes: graníticos

($\phi = 34,5^\circ$; $c = 7,7$ KPa), granodioríticos ($\phi = 34,6^\circ$; $c = 4,1$ KPa) e tonalíticos ($\phi = 35,1^\circ$; $c = 4,7$ KPa).

Para a realização dos **ensaios triaxiais**, utilizaram-se amostras remoldadas dos solos residuais, com características texturais e mineralógicas distintas, tentando reproduzir o melhor possível as propriedades físicas *in situ*, uma vez que se verificou que as amostras supostamente ‘indeformadas’ ao serem retiradas dos amostradores de parede dupla, não ofereciam qualidade suficiente para serem consideradas como tal, mostrando tendência à desagregação em placas devido à fraca coesão entre partículas e eventuais descontinuidades relíquia. Assim, os parâmetros de resistência deduzidos do ensaio triaxial, devem ser considerados conservativos, por não contemplarem a parcela devida às ligações estruturais.

Acerca dos ensaios triaxiais em amostras intactas de solos residuais, Vaughan (1988) refere que, para tensões de confinamento baixas, pode ocorrer rotura das ligações cimentadas naturais pela aplicação convencional do método da contrapressão durante a fase da saturação. À semelhança da maioria dos solos residuais em geral, os solos estudados encontram-se em condições não saturadas *in situ*, razão pela qual o procedimento adoptado em nove dos provetes ensaiados, foi o da não saturação, ou seja, com os valores do teor em água no estado natural, para além de não consolidados e não drenados, metodologia aliás recomendada por Vaughan (1988) e Blight (1997), por melhor reproduzirem as condições em jazida natural.

Os resultados obtidos para o **ângulo de atrito** nos referidos ensaios ($29,2^\circ < \phi < 37,2^\circ$), relativamente altos e típicos de solos granulares, não se distanciam muito dos valores obtidos no corte directo para as mesmas amostras (diferenças de $0,5^\circ$ a 3°), correspondendo a maior diferença ao solo mais heterogéneo e de grão mais grosso. Os valores da **coesão** revelaram uma variabilidade maior (49 – 79) KPa, mas de acordo com as condições não saturadas que, ao promoverem o efeito de sucção nos solos, aumentam a sua resistência coesiva (coesão capilar).

É importante assinalar, uma vez mais, a influência que as condições físicas iniciais, nomeadamente o teor em água (w_i) e o índice de vazios (e_i), exercem nos parâmetros de resistência (ϕ e c), mais evidente nos ensaios não saturados, e que por sua vez aquelas dependem das características mineralógicas e granulométricas dos solos.

Os solos residuais estão geralmente não saturados, quando amostrados. Saturar uma amostra de solo residual, representa a condição mais desfavorável para estes solos e que é pouco provável acontecer no seu estado natural. Só uma sequência rara de anos chuvosos pode fazer subir o nível freático alguns metros, o que é praticamente impossível em solos alentejanos, nas actuais condições climatéricas. De qualquer modo, a saturação dos provetes pode dar-nos uma ideia do comportamento destes solos nas condições mais severas; em geral, tem pouca influência no ângulo de atrito em termos de tensões efectivas, ϕ' , mas diminui o valor da coesão e reduz evidentemente o efeito de sucção por capilaridade do solo.

Nos ensaios triaxiais com saturação e consolidação das amostras, a coesão foi sempre nula, e os ângulos de atrito, em termos de tensões efectivas e totais, distanciam-se bastante entre si e em relação aos resultados do corte directo, pelo que se conclui que o procedimento anterior, ou seja, ensaios não saturados, é o mais adequado para este tipo de solos residuais.

O ensaio triaxial em amostras indeformadas de solos residuais, só interessa se forem utilizadas tensões relativamente baixas, para além de não se proceder à saturação dos provetes, porque para tensões superiores a 200-300 KPa, o comportamento assemelha-se ao de solos granulares.

Relembra-se que a dimensão dos provetes no ensaio triaxial (1600 cm^3) é pelo menos oito vezes superior aos provetes da caixa de corte directo (200 cm^3), facto que contribui para uma maior representatividade das amostras e naturalmente da heterogeneidade dos solos; sendo assim os resultados do ensaio triaxial reflectem melhor as diferenças entre provetes. Os coeficientes de regressão das rectas de Coulomb no ensaio triaxial são menores, comparando com os obtidos a partir do ensaio de corte directo nos mesmos solos, porque a heterogeneidade dos provetes no primeiro é muito maior que no segundo. Mas é evidente que a comparação entre os resultados dos ensaios de corte directo e triaxial, terá que se fazer com muitas reservas, porque para além dos mecanismos e métodos de ensaio serem diferentes, as condições físicas iniciais (w_i , e_i , dimensão da amostra, etc.), também o são.

O **ensaio edométrico** é provavelmente o ensaio que melhor reflecte a influência da qualidade e dimensão da amostra nos parâmetros geotécnicos, que no caso concreto se relacionam com a compressibilidade dos solos residuais.

Realizaram-se 24 ensaios edométricos: 20 em amostras indeformadas e 4 em amostras deformadas, provenientes de 17 locais de amostragem pertencentes a 13 maciços de solos de granítóides (6 granitos, 2 granitos tectonizados e 5 granodioritos ou quartzodioritos). O índice de vazios inicial nos solos graníticos era, em regra, superior ao dos outros dois tipos de solos.

Os parâmetros iniciais, apresentam variações consideráveis: índice de vazios ($0,317 < e_i < 0,984$), teor em água ($5,2\% < w_i < 19,3\%$), e grau de saturação ($24\% < S < 88\%$); o que constitui um importante facto a ter em conta na análise dos parâmetros de **compressibilidade**, nomeadamente dos índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s), uma vez que a dependência daqueles factores é grande. Para a variabilidade do teor em água contribui o facto da colheita ter sido feita em dias e condições climatéricas distintas; o próprio processo de amostragem (em bloco ou com amostrador), e o tempo de espera até ser ensaiado também influenciam o teor em água.

Com o objectivo de compreender melhor a relação entre a qualidade e a dimensão do provete, utilizaram-se anéis do edómetro com diâmetros diferentes, de 50 e de 99 mm. Essa dependência foi evidente nas amostras 53 e 77, ambas pertencentes ao maciço de Nisa. Assim quanto maior for a dimensão das partículas do solo, maior influência terá o diâmetro do anel na determinação das características de compressibilidade, pelo que se recomenda, para estes solos residuais de granítóides, geralmente contendo partículas grosseiras, a utilização de anéis edométricos com diâmetros grandes.

Quanto aos valores para o **índice de compressibilidade** (C_c) e **índice de expansibilidade** (C_s), o intervalo de variação foi de $0,11 - 0,33$ e $0,01 - 0,02$, com valores médios de $0,18$ e $0,02$, respectivamente; resultados típicos de materiais essencialmente arenos-siltosos, resultantes da alteração de granitos. É notória a dependência destes índices e dos coeficientes de compressibilidade em geral (a_v , m_v , c_v , k), em relação ao índice de vazios, tanto na situação de amostra estruturada como remoldada. Os valores relativamente baixos obtidos

para o C_c , associam-se à existência de um esqueleto rígido no solo, constituído pelos minerais quartzo e feldspato, pouco alterados, que proporcionam rigidez elevada. Os valores do C_c dos solos graníticos apresentam maior variabilidade que os solos de granodioritos ou tonalitos, reflectindo também a maior variabilidade do índice de vazios e da composição granulométrica.

A cedência estrutural, isto é, o ponto em que se dá uma rotura rápida de grande parte das ligações naturais entre partículas, é evidente em algumas curvas de compressibilidade de amostras indeformadas (Cap. 5) e traduz-se por uma diminuição brusca do índice de vazios. A partir deste ponto de colapso, a cedência estrutural dos solos faz-se geralmente de uma forma progressiva. A tensão de pré-consolidação nos solos residuais, resulta essencialmente do processo de alteração, não havendo qualquer relação com a história de tensões, pelo que é comum usar-se o termo “tensão de pré-consolidação virtual”, sinónimo de tensão de cedência.

Nas amostras indeformadas, determinou-se a **tensão de pré-consolidação “virtual”** (σ'_p), e constatou-se haver um intervalo de variação significativo, entre 50 e 398 KPa, com um valor médio de 134 KPa. Tal dispersão deve-se em parte ao método utilizado para o cálculo do parâmetro, a Construção de Casagrande, que é um tanto subjectivo, mas principalmente, às características intrínsecas dos solos residuais, cujo perfil de alteração varia bastante de local para local, revelando ambientes de alteração distintos; claro que o processo de amostragem, manuseamento e transporte da amostra, assim como a sua dimensão, são factores a considerar. Contudo, o valor médio calculado para este parâmetro aproxima-se dos valores determinados por autores como Viana da Fonseca (1996), que considera $\sigma'_p = 130 - 140$ KPa, como valor mais significativo de entre o intervalo de resultados obtidos para os solos residuais de um granito do Porto ($80 < \sigma'_p < 200$ KPa).

É de assinalar que os valores da tensão de pré-consolidação “virtual” calculados nos solos tonalíticos, nomeadamente dos maciços de Montemor-o-Novo, Arraiolos e Redondo (50 – 71) KPa, são consideravelmente inferiores aos determinados para a maioria dos restantes solos resultantes de granitos ou de granodioritos. Esta distância deve-se à menor resistência estrutural que aqueles solos oferecem, facto que está directamente relacionado com o arranjo textural e composição mineralógica, consequência dos processos de alteração que afectam particularmente estas rochas, onde predominam as plagioclases e os minerais ferromagnesianos, mais susceptíveis à alteração química.

É tentador relacionar a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p) com o índice de vazios (e_o), porque em teoria, um solo com uma estrutura mais aberta, teria tendência a ceder para tensões inferiores a um solo com uma estrutura mais fechada. Só que os resultados obtidos provam que esta relação não é simples, porque existem outros factores importantes a ter em consideração tais como, a força de contacto entre partículas, o seu imbricamento e, a distribuição granulométrica que pode proporcionar, em certos casos, uma estrutura formada basicamente por grãos relativamente grosseiros, extremamente porosa, mas que devido à superfície de contacto entre partículas, é pouco compressível, e noutros casos, alguns grãos eventualmente grosseiros mas disseminados numa matriz essencialmente siltosa e/ou argilosa compressível, em que as partículas maiores, em reduzido número, praticamente não se tocam. Nos solos residuais de granítóides é possível encontrar qualquer uma das situações, que dependem essencialmente do estado de alteração do solo e da textura e mineralogia da rocha original.

Durante a submersão das amostras na célula edométrica, a saturação ocorreu quase instantaneamente, em praticamente todas as amostras, devido à significativa porosidade e considerável permeabilidade, consequência da textura granular. Os valores do coeficiente de consolidação (c_v) sugerem que a consolidação ocorreu rapidamente.

A rigidez inicial verificada nas curvas de compressibilidade das amostras indeformadas dos solos residuais dos granítóides, é atribuída às ligações entre partículas herdadas da rocha-mãe e ao facto da estrutura esquelética contribuir com alguma resistência sob o efeito de condições não saturadas. Uma vez saturada a amostra, as partículas silto-argilosas dispersam-se e o *fabric* original é parcialmente destruído; simultaneamente há uma redução da componente de resistência nas ligações entre partículas, e o aumento da tensão efectiva na estrutura granular provoca o seu colapso.

Na maioria dos casos, os valores de σ'_p , reforçam a ideia de ligações ténues entre as partículas mais grosseiras neste tipo de solos residuais granítóides, excepto os solos com grande percentagem de grãos grosseiros resistentes, que têm dificuldade em se ‘arrumarem’ dentro do anel, sendo capazes de suportar as cargas aplicadas através das superfícies de contacto entre si. Verifica-se uma tendência para que solos residuais com valores de peso volúmico no estado seco (γ_d) mais baixos, sejam os que apresentam os menores valores para a tensão de pré-consolidação “virtual” (σ'_p).

Chegou-se à conclusão que, se as condições iniciais do ensaio, em particular o índice de vazios inicial e dimensões das amostras, indeformada e deformada, forem idênticas, para determinado tipo de solo residual, estes materiais, sob tensões elevadas, tendem a evoluir para um comportamento semelhante ao dos solos sedimentares, obtendo-se valores idênticos para os índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s), nos dois tipos de amostra.

O comportamento colapsível dos solos residuais de granítóides, é um fenómeno que ocorre, frequentemente, em zonas climáticas semi-áridas e está relacionado com a existência de precipitações sazonais ou aumento de precipitação anual por longos períodos de tempo, resultando numa maior lixiviação dos solos dos granítóides alterados e consequentemente o aumento do índice de vazios e uma maior tendência a tornarem-se colapsíveis. Esta situação, não é comum acontecer no Alentejo, mas ocorre pontualmente, durante períodos de chuva mais longos. Os solos residuais dos granítóides de regiões temperadas, para níveis de tensão correntes (baixos a moderados), comportam-se como solos potencialmente colapsíveis.

7.4 – Ensaios geotécnicos *in situ*

Para a caracterização mecânica *in situ* dos solos residuais de rochas granítóides foram utilizados diferentes tipos de penetrómetros: SPT, CPT, DPL e DPSH. Acerca destes ensaios, destacam-se em seguida os principais aspectos.

- No que respeita ao SPT, apesar das limitações referidas no Capítulo 6, os dados obtidos provam tratar-se de um ensaio eficaz nos solos ensaiados, e os resultados podem ser melhorados desde que, sejam respeitadas as normas do ensaio e se registem todas as condições de campo.

- De uma forma geral, pode dizer-se que os ensaios de penetração estática - CPT, fornecem elementos de confiança e de aplicação mais fácil e menos empírica que os do SPT. Os maiores inconvenientes consistem em: não permitirem a observação visual das amostras; terem uma capacidade de penetração inferior, logo atingem-se menores profundidades; dificuldade em ultrapassar pequenos fragmentos de rocha; maior dificuldade em manusear o equipamento e fixá-lo ao terreno. Tal como no ensaio SPT, na interpretação dos resultados do ensaio CPT, é essencial a identificação e caracterização dos solos intersectados.
- Os ensaios DP – cones penetrométricos dinâmicos, revestem-se de grande simplicidade e, actualmente, são largamente utilizados. Comparando-os com os outros métodos de penetração (SPT e CPT), os ensaios DP têm a vantagem de acederem a locais de mais difícil acesso e exigirem menor mobilização de mão-de-obra, principalmente se forem mecanizados, permitindo grandes rendimentos, devido à grande manobrabilidade dos equipamentos. Ao contrário do SPT, apresentam um registo do número de golpes em profundidade de uma forma contínua, o que permite detectar pequenas incidências litológicas que os métodos descontínuos não permitem. A possibilidade de utilizar mais do que uma energia de penetração permite abranger uma vasta gama de tipos de solos residuais, podendo atingir grandes profundidades, apresentando-se como os mais adequados para a avaliação da profundidade da rocha sã ou na detecção de obstáculos pontuais ou estruturas singulares do maciço natural.
- A ponteira cónica do DPSH é mais resistente que o amostrador SPT, a qual se danifica com facilidade em terrenos considerados difíceis, impedindo a obtenção de uma caracterização mais profunda destes maciços mais resistentes. Por outro lado, o DPSH fornece uma visão contínua da litologia do maciço, representando melhor a sua macroestrutura. Enquanto que, os elementos mais resistentes podem constituir obstáculo para o DPL, o mesmo não acontece com o DPSH.

Pela análise dos dados coligidos, o DPL raramente ultrapassa os 2,5 m de profundidade, atingindo na grande maioria dos ensaios um número igual ou superior a 60 pancadas para profundidades entre 1 e 2 m, reflectindo claramente o limitado poder penetrativo do DPL, nestes solos residuais. Os dados relativos aos ensaios SPT coligidos, demonstraram que a partir dos 3 m, a grande maioria dos ensaios (90 % dos casos), forneceu resultados superiores a 50 – 60 N_{SPT} , correspondendo a formações muito compactas.

A partir dos ensaios penetrométricos realizados em 11 locais de maciços residuais distintos, pôde constatar-se o seguinte:

- i) nota-se maior sensibilidade às heterogeneidades por parte do DPL, relativamente ao DPSH, o que se justifica pela maior energia de impacto deste último o que lhe permite ultrapassar mais facilmente as zonas mais resistentes;
- ii) a diversidade de valores relativa a ensaios realizados com o mesmo penetrómetro, deve-se à grande heterogeneidade horizontal, nestes perfis de solos residuais;
- iii) os ensaios penetrométricos reflectem uma maior homogeneidade estrutural nos perfis de solos resultantes de tonalitos e/ou granodioritos relativamente aos dos granitos, que apresentam maior variabilidade na textura e na presença de diaclases;

- iv) estes ensaios fornecem resultados pontuais em áreas a investigar bastante heterogéneas; não é aconselhável tecer considerações generalistas a partir de poucos ensaios pontuais, em perfis e solos, tipicamente heterogéneos;
- v) com o penetrómetro super-pesado (DPSH), podem atingir-se profundidades, praticamente duplas das conseguidas com o penetrómetro ligeiro; contudo, o ensaio DPL é muito mais sensível às heterogeneidades do terreno, como sejam, pequenos fragmentos de rocha e diaclases relíquia preenchidas por materiais com resistências diferentes; esta sensibilidade é maior no DPL_{LNEC} do que no DPL₁₀₀, sendo neste último, maior a profundidade atingida para igual número de golpes, o que está directamente relacionado com a geometria do cone e a transmissão da energia do pilão, manual e mecânico, respectivamente;
- vi) no ensaio SPT, apesar de se usar o mesmo pilão que no ensaio DPSH, o amostrador de Terzaghi tem menor poder penetrativo do que a ponteira do DPSH e, oferece maior resistência lateral, logo há maior dissipação de energia devida à coluna de varas e amostrador; a diferença entre os dois ensaios acentua-se com a profundidade; o SPT é muito mais moroso, pois é necessário retirar sempre o amostrador após um ensaio a determinada profundidade;
- vii) o CPT é muito sensível para solos residuais granulares e, a profundidade atingida é limitada à partida para zonas um pouco mais resistentes, como frequentemente acontece nos solos resultantes da alteração de granitos;
- viii) em suma, o DPSH demonstrou ser o ensaio de penetração mais indicado para solos residuais granítóides, pois para além de atingir profundidades maiores, pode fornecer um registo contínuo da resistência à penetração.

Em termos gerais, verificou-se que no campo, os solos residuais granítóides oferecem uma resistência à penetração bastante superior à que se esperava, com base nas características de identificação, resistência e deformabilidade, determinadas em laboratório. Esta situação é explicável pela existência de uma estrutura cimentada herdada da rocha-mãe, assim como um forte imbricamento dos grãos menos alterados destes materiais, propriedades intrínsecas destes solos, que não são fáceis de preservar e/ou de representar em laboratório. O efeito escala e a profundidade da amostragem *versus* ensaio nem sempre é possível representar em laboratório, no entanto, são determinantes na resistência e deformabilidade destes solos *in situ*.

Pelas razões expostas, realça-se a não aplicabilidade de correlações obtidas por diferentes autores em solos distintos dos solos em estudo, utilizando penetrómetros semelhantes; assim como é igualmente duvidosa a comparação entre resultados de diferentes penetrómetros para o mesmo tipo de solo residual. A heterogeneidade vertical e/ou horizontal, verificada nos perfis dos solos residuais de rochas granítóides de clima temperado, por vezes a distâncias inferiores a 1 metro, constitui um factor determinante que afecta as comparações entre ensaios penetrométricos (SPT, CPT, DPL e DPSH) que logicamente não se podem realizar exactamente no mesmo local.

Convém relembrar o carácter pontual destes ensaios, cujos resultados podem variar radicalmente a poucos metros de distância, não sendo conveniente extrapolar valores de resistência dinâmica (R_d) e de resistência de ponta (q_c), obtidos em determinado perfil, para diferentes locais onde seja identificado o mesmo tipo de solo residual; esses valores podem ser apenas indicadores do que se pode encontrar.

Nos solos estruturados não existe linearidade na relação entre o ângulo de atrito (ϕ) e o estado de compacidade do material. Portanto as correlações correntemente utilizadas para solos sedimentares para determinar parâmetros geotécnicos, tais como ϕ , c , E , ou a tensão admissível, a partir dos ensaios *in situ*, de que são exemplos o SPT e o CPT, não são aplicáveis aos solos residuais, devido essencialmente à natureza estruturada destes.

7.5 – Conclusões gerais

Devido a uma certa consonância relativa às interpretações correspondentes aos diferentes maciços, podem retirar-se algumas conclusões gerais para os solos residuais dos granítóides, pois elas confirmam-se entre si; o que não era possível sustentar com a mesma certeza se o estudo se limitasse a um só perfil ou a poucos locais de estudo.

O estudo dos solos residuais requer uma atenção muito maior relativa aos aspectos geológicos, a qual, normalmente, não se exige em Mecânica dos Solos no estudo dos solos sedimentares. Os processos de meteorização têm que ser reconhecidos, pois são responsáveis pelos perfis de meteorização, necessários para compreender a estabilidade de taludes em solos residuais.

Os ensaios de identificação com vista à classificação dos solos residuais, revelam-se insuficientes, pois é necessário um maior empenhamento na caracterização química e mineralógica que permita a definição de índices geológicos e mineralógicos representativos dos graus de meteorização, para que deste modo seja facilitada a compreensão da eventual correlação com as propriedades geotécnicas. Por outro lado, salienta-se que, o trabalho de campo, neste tipo de solos residuais, assume uma importância acrescida, uma vez que o papel da micro e da macroestrutura, em particular das descontinuidades relíquia, influenciam decisivamente o comportamento geotécnico dos taludes dos solos saprolíticos de granítóides.

Em alguns solos residuais de granítóides menos evoluídos, é notório que a estrutura cimentada do solo está dominantemente relacionada com o enfraquecimento das ligações existentes na rocha original e não tanto com as ligações formadas pelos minerais secundários resultantes do processo de meteorização, as quais predominam onde a meteorização química se desenvolveu mais.

As condições de meteorização pouco agressivas, onde as descontinuidades relíquia favorecem a ocorrência de microambientes de alteração, associadas à variação da composição e da estrutura da rocha original, das quais resultam produtos (rochas alteradas e solos residuais) com características geotécnicas distintas, justificam a dispersão verificada nos resultados obtidos, por vezes, dentro de um único maciço.

A existência de descontinuidades herdadas da rocha-mãe, e as respectivas propriedades geométricas e físicas, parecem ter sido determinantes nas profundidades dos perfis de alteração, principalmente nos granitos, a que se associam outros factores, tais como, a precipitação média anual, a drenagem, a exposição da superfície ao sol e a natureza da rocha-mãe.

Devido às condições intrínsecas e extrínsecas das rochas, a meteorização que afectou os maciços é moderada. Exceptuam-se alguns perfis onde as condições paleoclimáticas assim

como o paleorelevo permitiram uma evolução mineralógica mais intensa e uma lixiviação mais acentuada, associadas a uma protecção contra a erosão por parte da vegetação.

Na maioria dos perfis, os minerais primários permanecem nos diferentes ambientes de alteração e, muitas vezes, em bom estado de conservação. Comparando os solos residuais das rochas granítoides do Alentejo com os de outras regiões do nosso país (Furtado, 1973, 1982; Silva, 1980, 1983; Sequeira Braga, 1985, 1988; Begonha, 1989, 1991; Martins *et al.*, 1993; Santos, 1995; Viana da Fonseca, 1996), conclui-se que o clima e o relevo, grandes responsáveis pela drenagem, têm uma importância decisiva no tipo de meteorização das rochas e, consequentemente, nos respectivos produtos finais. Ao contrário de alguns solos residuais dos granitos do norte e centro de Portugal, os quais revelam tendência para uma 'caulinização' quase generalizada, os solos residuais dos granitos e rochas afins a sul do Tejo, são na sua maioria, solos pertencentes ao Grupo A, segundo a classificação para solos residuais proposta por Wesley & Irfan (1996); ou seja, são solos fortemente influenciados pela estrutura, de natureza essencialmente granular, com pouca percentagem de finos, nomeadamente argila, praticamente arenizados, demonstrando fraca coesão ao nível das ligações interparticulares. Os grãos minerais encontram-se, muitas vezes, fortemente imbricados uns nos outros, por terem sofrido uma meteorização química pouco intensa, ou noutros casos, menos comuns, os feldspatos já quase totalmente alterados e transformados caracterizam os solos residuais com mais finos, em locais onde a alteração química foi mais incisiva. O mineral argiloso gibbsite nunca foi identificado nos difractogramas, ao contrário do que sucede nos solos residuais graníticos do norte de Portugal, onde a precipitação média anual ultrapassa os 1400 mm.

Não se pode afirmar que há uma correspondência directa entre a mineralogia da rocha-mãe e a mineralogia dos solos residuais, principalmente o tipo de minerais argilosos, que condicionam as características geotécnicas tais como a plasticidade, expansibilidade, equivalente de areia, coesão, deformabilidade, porque existem outros factores como o clima (precipitação e temperatura), o relevo (e o paleorelevo), que influenciam a composição destes produtos de alteração. De qualquer forma, a sequência das transformações de minerais primários (feldspatos, micas, etc.), em minerais secundários (caulinita, ilita, esmectita, etc.), pode ser interrompida a qualquer altura; nos climas temperados o processo é mais lento, e pode ser interceptado em qualquer fase, podendo ser variados os produtos secundários de neoformação, dependendo dos factores ambientais, actuais e antigos. É da conjugação complexa dos diferentes factores que resulta o solo residual de determinado perfil com características (físicas, químicas, mineralógicas e geotécnicas) próprias, difíceis de extrapolar para outro local.

O tipo de mineral argiloso, presente no solo residual, assim como o estado, mais ou menos degradado, em que se encontra, é determinante em certas características geotécnicas como sejam, a plasticidade, a expansibilidade, a actividade, a coesão, a compressibilidade, entre outras, e que se reflectem consequentemente no desempenho geotécnico desse solo quando utilizado como maciço de fundação ou aplicado em obras de engenharia, nomeadamente na construção de aterros, estradas, etc..

As condições de campo, traduzidas pelas propriedades físicas iniciais (e.g. e_0 , n , w_0 , γ_d) reflectem a estrutura dos diferentes solos residuais e, influenciam as propriedades mecânicas, nomeadamente, resistência, deformabilidade e permeabilidade. Do modo como as condições iniciais destes solos, principalmente e_0 e w_0 , variarem *in situ*, pode-se esperar um certo

comportamento geomecânico, podendo os solos manifestar uma grande variabilidade, inclusive dentro do mesmo perfil.

A integridade estrutural do material não é garantida com os processos de amostragem clássicos em Mecânica dos Solos, concluindo que a colheita de blocos de solo de grandes dimensões, de modo a permitir a subamostragem em laboratório, é o método mais indicado para este tipo de solos residuais.

Apesar da importância dos limites de consistência no conhecimento e classificação dos solos residuais, deve, no entanto, ter-se presente que, estes limites e os índices com eles relacionados, são determinados sobre amostras de solo que são completamente remexidas, e transformadas numa mistura uniforme de solo e água. Deste modo, os limites não dão nenhuma indicação sobre o arranjo estrutural, ou ligações residuais entre partículas, que existem frequentemente nos solos residuais no estado natural e são destruídas durante a preparação da amostra para a execução dos ensaios. Nesse sentido, outros métodos simples e expeditos, deveriam ser desenvolvidos para a identificação e classificação destes solos no seu estado natural, complementando, desta forma, as classificações usuais em Mecânica dos Solos: o Sistema Unificado e a A.A.S.H.T.O..

Nos estudos de consolidação dos solos residuais, tem que haver um compromisso entre a dimensão da amostra a colher e o tamanho do grão; porque se por um lado, quanto maior for a amostra, mais representativa se torna das condições naturais, por outro lado, é mais difícil a obtenção de amostras indeformadas de grande dimensão, que preservem a sua qualidade; não esquecendo porém que nas amostras mais pequenas é mais evidente a perturbação do solo nos ensaios. Pelas razões referidas, a amostra não deve ser nem muito grande, nem muito pequena.

Relativamente à compressibilidade, na construção de aterros sobre solos de natureza granítica, nos quais a meteorização física predominou sobre a alteração química, prevê-se que à partida não existam assentamentos a longo prazo.

As ligações entre partículas revelaram-se ténues, em alguns solos residuais, durante o ensaio de corte directo e edométrico, porque as amostras são relativamente pequenas e quebram-se durante a fase da consolidação; mas no campo, o conjunto do enorme número de ligações ténues, resulta numa coesão verdadeira suficiente para manter verticais taludes de solo que podem atingir 10 metros de altura .

A possibilidade dos solos residuais granítoides do Alentejo entrarem em liquefação ou colapso é remota; para que tal acontecesse o teor em água teria que subir bastante, durante muito tempo, o que não é provável perante as condições climatéricas dominantes na região, e para que os solos sofram colapso, as tensões efectivas verticais teriam que ser consideravelmente aumentadas.

De uma forma geral, relativamente às características de resistência, a quase totalidade dos solos residuais granítoides apresenta ângulos de atrito superiores a 30°. No que respeita às forças coesivas, elas manifestam-se no campo ao observarmos taludes praticamente verticais, e devem-se: i) à presença de ligações estruturais, cimentadas, entre os grãos e/ou agregados de maiores dimensões; ii) à existência de um forte imbricamento entre minerais, principalmente em perfis que sofreram alteração química reduzida; iii) ao estado não saturado destes solos residuais, o qual promove uma resistência adicional por capilaridade

(efeito de sucção), contribuindo para um aumento da coesão total. O peso relativo de cada um destes factores, depende das características intrínsecas de cada solo, do seu grau de alteração e das condições locais em que se encontra.

A existência de ligações estruturais é variável consoante a composição mineralógica e os processos de alteração a que esteve sujeito o maciço rochoso. No entanto, é necessário reter que mesmo que as ligações sejam tão frágeis que dificilmente se consiga manusear uma amostra indeformada sem a danificar, elas fornecem uma componente de resistência e rigidez, que influencia consideravelmente o comportamento geomecânico dos maciços de solos residuais *in situ*. Negligenciar o efeito das ligações estruturais nos resultados, implica uma subavaliação da resistência dos maciços terrosos assim como uma subestimação da estabilidade de taludes em solos residuais.

A campanha de ensaios realizados *in situ* no âmbito do presente estudo contribuiu para: i) sustentar o conhecimento das limitações e potencialidades dos ensaios penetrométricos face aos solos residuais granítóides; ii) concluir que não é possível tecer modelos teóricos e generalistas a partir destes ensaios, devido principalmente a duas razões concomitantes: 1) características intrínsecas dos perfis dos solos residuais, como sejam, a grande heterogeneidade lateral e vertical destes materiais, que se prende com a variabilidade da sua textura, presença de estruturas relíquia, espessuras variáveis de solo, variações do teor em água, no espaço e no tempo (ao longo do ano), etc.; 2) limitações dos equipamentos, principalmente o facto de se tratarem de ensaios pontuais, para além da já referida falta de sensibilidade em alguns casos e, falta de energia, outros.

Apesar de tudo, os ensaios penetrométricos fornecem informações valiosas para a definição da variação de características de resistência, raramente da deformabilidade, ao longo da profundidade, pelo que constituem indicações importantes, por vezes decisivas, na fase de estudo prévio e de projecto de qualquer obra a implantar nestes solos residuais. Salienta-se a importância da interpretação geológica adjacente aos registos de sondagem. É aconselhável que o número de sondagens para estes estudos seja superior, pelo menos o dobro, ao da quantidade prevista nas campanhas de sondagens em solos sedimentares.

Vastas regiões do globo, incluindo Portugal, onde se destaca o Alentejo, estão sob condições de clima temperado, predominando os solos no estado não saturado. Nestas áreas, a aplicação da Mecânica dos Solos de ‘solos saturados’ para estudar o comportamento em fundações, taludes, aterros, ou outro sistema geotécnico, resulta em previsões irrealistas do comportamento mecânico. Uma aproximação mais realista é estudar os solos nas condições que se encontram em jazida e durante a vida útil da obra a implantar, ou seja em condições não saturadas. Assim, a dependência que as propriedades geomecânicas, tais como a resistência e a deformabilidade, têm do teor em água, são logicamente incorporadas no projecto, com vantagens para a segurança e economia. Daí que neste tipo de situações se aconselhe o maior número de ensaios *in situ* que melhor actuam nas condições naturais, uma vez que no laboratório é difícil a reprodução na íntegra dos factores de campo.

A presente tese pôs em evidência a influência que aspectos tão diferentes como a geomorfologia, o clima, a litologia, a tectónica e o tempo, têm na génese dos solos residuais dos granítóides do Alentejo. Assim, os tonalitos e os granodioritos apresentam um comportamento mais brando que os granitos, sendo determinante nas características

geomorfológicas da região; nos tonalitos e em alguns granodioritos, a composição mineralógica parece ter sido particularmente favorável a uma alteração química mais intensa, seguida da remobilização dos produtos de alteração arenosos, e por este motivo, apresentam geralmente espessuras menores de solo residual que as correspondentes aos granitos, onde a alteração física predomina, geralmente acompanhada de arenização e formação de blocos. Por outro lado, as formas de relevo influenciam a escorrência, a infiltração e a drenagem nos maciços, promovendo a lixiviação dos elementos moveis, e favorecendo a formação de minerais argilosos, como a caulinita, enquanto que nas zonas planas ou de depressão domina a esmectita entre os minerais argilosos dos solos residuais dos granítoides estudados.

A existência de climas locais na vasta região do Alentejo, entre os quais se destaca o microclima da Serra de S. Mamede, é determinante no tipo de solo residual formado. Neste caso, o solo não é tão exposto à desagregação física; amplitudes térmicas amenas e a escorrência superficial das águas diminuída pela vegetação mais densa, promovem a alteração *in situ* dos minerais, sendo comum encontrar, nesta região, grandes manchas de minerais secundários que substituem, sob a forma de pseudomorfoses, os minerais primários, como é o caso dos feldspatos.

A tectónica é importante na alteração das rochas, quer pela formação de relevos tectónicos que influenciam o tipo de meteorização, quer pela tectonização a que foram submetidos certos granitos como o de Portalegre e o de Carreiras, incutindo nestes, aspectos peculiares na textura, na fissuração e na composição mineralógica, que se reflectem obrigatoriamente no comportamento geotécnico dos maciços de solos residuais correspondentes. Os maciços mais heterogéneos em termos de características mineralógicas, texturais e consequentemente geotécnicas (Nisa, Vimieiro, Vidigueira), correspondem a formações rochosas que foram submetidas a fenómenos tectónicos, durante a sua formação (as mais recentes), ou posteriormente (as mais antigas).

É de assinalar a importância do factor tempo na alteração das rochas, porque um perfil de solo residual está mais ou menos desenvolvido, consoante o tempo a que está submetido à meteorização, e à intensidade de actuação dos agentes de meteorização. Assim, na altura do nosso estudo podemos interceptar o solo residual em qualquer fase de evolução geoquímica, ou seja, a composição mineralógica de um solo pode variar consideravelmente no tempo, em regiões de clima temperado. Um solo encontra-se muito ou pouco evoluído consoante o tipo de meteorização e o tempo durante o qual esta actuou, controlando desta forma, o rumo a seguir pelos processos de alteração e, em última análise, os produtos de alteração finais, os solos residuais. A sequência de alteração dos minerais pode parar em qualquer fase e pode haver uma reversibilidade do processo, resultante de variações climáticas ou das condições de drenagem.

Em relação às condições hidrogeológicas inerentes aos solos residuais dos granítoides do Alentejo, há a referir que o nível freático localiza-se a grandes profundidades, nunca sendo interceptado nos perfis estudados. Por isso, os solos são tipicamente não saturados, e permitem geralmente boa drenagem devido à porosidade elevada e descontinuidades relíquia que facilitam a rápida infiltração das águas das chuvas. As situações de exceção correspondem a solos graníticos (s.l.), em que os feldspatos se encontram substancialmente alterados e transformados em minerais argilosos e neste caso a permeabilidade pode diminuir significativamente, especialmente se as fracturas relíquia se encontrarem colmatadas por materiais finos. Nestes casos, menos frequentes, as águas pluviais tendem a escorrer superficialmente, e o teor em água do solo no estado natural, tende a ser mais elevado,

porque a evaporação também se torna mais difícil. Note-se que estas situações só acontecem no Alentejo onde os microambientes (zonas deprimidas, vales ou áreas protegidas por vegetação), proporcionam a manutenção dos produtos mais finos. A permeabilidade é um parâmetro extremamente variável e difícil de avaliar, mesmo em laboratório e adoptando métodos e técnicas semelhantes. Recomenda-se, para os maciços de solos residuais, a medição da permeabilidade *in situ* perante casos concretos, porque as fracturas, veios, blocos rochosos, variações bruscas de porosidade, ou seja, a micro e a macroestrutura, são decisivos na avaliação deste parâmetro.

O conjunto de observações e estudos efectuados permite adiantar o seguinte:

- i) rochas semelhantes (e.g. granitos do maciço hercínico do Vimieiro), com percursos de alteração diferentes, proporcionam a formação de solos residuais diferentes, na textura, na porosidade e, consequentemente, nas características geotécnicas;
- ii) rochas diferentes (granitos, granodioritos e tonalitos), mas com percursos de meteorização paralelos, podem originar solos residuais diferentes ou similares;
- iii) rochas diferentes (granitos, granodioritos e tonalitos), e com percursos de meteorização também diferentes, geram normalmente solos residuais diferentes.

Estas constatações levam a compreender a grande diversidade dos solos residuais de granitóides em clima temperado, assim como a considerável variabilidade das suas características geotécnicas.

Em termos gerais, podem-se enquadrar os solos residuais dos granitóides a sul do Tejo de três formas principais e distintas que em seguida se descrevem.

- 1) Sob o ponto de vista global, a grande maioria destes solos são do tipo areno-siltoso, com pouca percentagem de argila e baixa plasticidade; solos que na generalidade apresentam boas características geotécnicas, nomeadamente de resistência mecânica média a elevada, deformabilidade baixa e permeabilidade média a elevada; características típicas de solos saprolíticos, Grupo A (Quadro 1.3), pouco evoluídos do ponto de vista geoquímico.
- 2) Por outro lado, se nos concentrarmos nas características de cada maciço em particular, verifica-se que em certos casos, maciços de maiores dimensões demonstrando grande variabilidade textural e formas de relevo diversas, podem coexistir grandes diferenças no tipo de solo residual resultante, desde, fundamentalmente arenoso e cascalhento, a essencialmente argiloso.
- 3) Por fim, as diferenças existentes entre os solos resultantes de granitos (principalmente alcalinos), de granodioritos ou de tonalitos, são evidentes desde, as características mineralógicas, texturais, espessura e tipo de perfis, vulnerabilidade à erosão, até às propriedades geotécnicas, principalmente as relacionadas com a plasticidade, trabalhabilidade, escavabilidade, entre outras, e que resultam da herança geoquímica e mineralógica da rocha original.

Em resumo, os perfis de solos residuais têm que ser estudados caso a caso. Para a compreensão das suas características químicas, mineralógicas, micro e macroestruturais e, geotécnicas, é fundamental, o contexto geológico – estrutural e o enquadramento geomorfológico e climático, porque encerram aspectos determinantes nas características locais do perfil, tais como: declives (escorrência, drenagem, infiltração, permeabilidade), exposição ao sol (amplitudes térmicas diárias e anuais), coberto vegetal, contactos geológicos, fracturação local (espessura, afastamento, orientação, preenchimento, etc.), variações de fácies, paleorelevo, história geológica, entre as principais.

Tendo em conta tudo o que foi realizado e referido, considera-se que não é possível desenvolver um modelo geral e único para o comportamento dos solos residuais dos granítóides de regiões temperadas, devido à grande heterogeneidade patente nos perfis, função da variabilidade das características intrínsecas e extrínsecas. Apenas se podem apontar tendências. As exceções relativas a uma tendência geral dos parâmetros geotécnicos dos solos residuais granítóides, quando a rocha original é comum, são frequentemente explicadas pela existência de diferentes graus de alteração.

A variação do índice de vazios e da textura ocorre em volumes relativamente pequenos, o que torna a heterogeneidade vertical e horizontal num mesmo perfil, uma característica comum nestes solos. Cada local deve ser considerado individualmente para efeitos de projecto de fundações, taludes ou outro ambiente geotécnico, não se devendo extrapolar os resultados de um local para outro onde o solo residual apresente aparentemente características semelhantes. Cada situação deve ser analisada *per se*.

7.6 – Perspectivas de investigação futuras

Na realidade, no que respeita aos solos residuais granítóides de zonas de clima temperado, não se deve generalizar as situações, extrapolar para outros locais ou desenvolver modelos de comportamento muito específicos, porque estes solos não param de nos surpreender em cada novo local em que se encontram. Quando muito, podemos, e para isso contribuiu esta tese, comentar, concluir e adiantar tendências gerais para estes solos, porque ao aprofundarmos o nosso estudo, vamos forçosamente particularizar as situações. Esta investigação mais profunda pertence a uma fase posterior, que se pode e deve prosseguir na sequência do trabalho efectuado, porque já é possível conhecer e compreender os pormenores relativos a estes solos residuais, uma vez que esta tese faculta uma visão global, mas rigorosa, do que se passa em termos de génesis, condições climatéricas, geomorfologia, processos de alteração, para além das características químicas, mineralógicas, físicas e geotécnicas, assim como das respectivas inter-relações a nível regional.

O Alentejo, possui características climatéricas e topográficas próprias, que o demarcam das restantes regiões do País, e que contribuem para a formação de solos residuais de granítóides distintos dos solos residuais de granítóides de outras regiões. Seria interessante aplicar a metodologia seguida neste estudo a outros tipos litológicos com representação na região, tais como, gabros, gnaisses, xistos, migmatitos, calcários, etc.

Constituindo os solos residuais de rochas granítóides, materiais que são frequentemente solicitados por obras de engenharia *in situ*, como material de fundação de edifícios e de barragens, taludes de escavação, ou como matéria prima para a construção de estradas, aterros, etc., considera-se importante para o prosseguimento da investigação neste domínio

que os estudos se desenvolvam na dependência do projecto, construção e acompanhamento de obras.

É relevante referir que os resultados obtidos nesta tese, constituem uma importante fonte de dados científicos postos à disposição dos técnicos e investigadores que utilizam ou venham a utilizar estes materiais. Esta situação evidencia a necessidade da continuação destes estudos, de forma a complementar a caracterização dos solos residuais dos maciços granítóides estudados. A acumulação e interpretação cuidada dos resultados experimentais obtidos nos diferentes locais estudados, permitirá retirar sugestões e recomendações confiáveis para o projecto e execução das obras geotécnicas que venham a solicitar estes solos residuais.

Sugerem-se, de seguida, algumas hipóteses de trabalho julgadas promissoras, na prossecução da investigação efectuada.

- Aprofundar os estudos relativamente à alteração de rochas granítóides, recorrendo a técnicas, tais como: observação de lâminas delgadas ao microscópio óptico para caracterização petrográfica e micromorfológica dos diferentes ambientes de meteorização; utilização de ensaios laboratoriais por forma a pesquisar a susceptibilidade à alteração dos diferentes tipos litológicos, incluindo a análise dos produtos lixiviados; estudo da alteração diferencial de minerais constituintes dos granítóides, como por exemplo das plagioclases que pode ser pesquisada através de estudos petrográficos e de química mineral.
- Estabelecer modelos de alteração para cada perfil, aprofundando o conhecimento dos processos de alteração, evolução geoquímica e mineralógica.
- Identificar os minerais primários e secundários que predominam em determinadas fracções granulométricas: argila, silte e areia.
- A utilização do microscópio electrónico pode ser fundamental para o conhecimento da microestrutura dos solos residuais, nomeadamente das ligações interparticulas, do tipo de cimento ou ligações que se estabelecem preferencialmente (herdadas ou secundárias), da natureza dos agregados das partículas, da dimensão e forma dos poros, etc.
- É conveniente aplicar diferentes processos de preparação dos solos residuais (secagem, homogeneização, selecção, etc.), e verificar a sua influência nas propriedades índice, e comparar os resultados com os de solos residuais de outras regiões do globo.
- Investigar a influência das micas, minerais abundantes nos solos residuais granítóides, na permeabilidade, na rotura por compressão e na deformabilidade destes solos.
- Proceder à realização de campanhas de ensaios *in situ* de carácter abrangente (e.g. ensaios geofísicos, nomeadamente sísmica de refracção e entre furos “cross-hole”), e de carácter pontual: continuação da execução de sondagens penetrométricas, preferencialmente com maior energia de impacto – DPSH; execução de ensaios de permeabilidade *in situ*; ensaios de carga com placa; etc.
- Tentar estabelecer, para cada perfil estudado, relações entre w_o , γ_d , c , ϕ , C_c , e resistência dinâmica e os índices de meteorização propostos.

- Os parâmetros de resistência residual destes solos podem ser obtidos através da realização de ensaios de corte multi-reversivos.
- Aprofundar os estudos respeitantes à densidade relativa *in situ* nos saprolitos graníticos, porque apesar de difícil determinação, está sem dúvida relacionada com a resposta geomecânica destes materiais (até mais do que a consistência), face à resistência e à compressibilidade.
- Contemplar em futuros estudos a resistência ao corte das descontinuidades relíquia, que tal como se referiu assumem uma grande influência na estabilidade de taludes dos solos residuais saprolíticos.
- Determinar o coeficiente de impulso de repouso – K_0 , tendo como objectivo estabelecer relações com o grau de alteração dos maciços e a estabilidade dos seus taludes.
- Avaliar o potencial de sucção e analisar a sua influência na estabilidade de taludes destes solos residuais que permanecem indubitavelmente em condições não saturadas.
- Proceder à avaliação do potencial de colapso em solos residuais previamente seleccionados.
- Promover técnicas inovadoras para colheita de amostras indeformadas nestes solos, as quais, ficou provado, serem de muito difícil obtenção; note-se que é fundamental a preservação das ligações estruturais dos solos nos ensaios realizados em laboratório, para determinação dos parâmetros de resistência e de compressibilidade, permitindo assim avaliar a sua influência nestes.
- Seria vantajoso realizar ensaios de resistência em solos residuais compactados, com vista à sua utilização em obras de aterro, assim como a implementação, se necessário, de processos de melhoramento de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS, L. (1968) – A análise modal e a definição de um índice de qualidade micropetrográfico. *Bol. Soc. Port. Cient. Nat.*, 2º série, vol. XII, pp. 105-116.
- AIRES-BARROS, L. (1970) – Note préliminaire sur un indice d'altérabilité. *Técnica*, 401, XLV, pp. 9-11.
- AIRES-BARROS, L. (1971) – Alteração e alterabilidade das rochas ígneas. LNEC, Lisboa.
- AIRES-BARROS, L. (1972) – Análise laboratorial da influência da granularidade na alterabilidade das rochas. *Técnica*, 417, XLVII, pp. 65-70.
- AIRES-BARROS, L. (1973) – Geoquímica da meteorização das rochas ígneas. *Curso de pós-graduação, Univ. Fed. Bahia*, 270 p.
- AIRES-BARROS, L. (1978) – Comparative study between rates of experimental laboratory weathering of rocks and their natural environmental weathering decay. *Bull. IAEG*, nº 18, pp. 169-174.
- AIRES-BARROS, L. (1979) – Linhas de rumo da geoquímica. *Com. Serv. Geol. de Portugal*. Lisboa. T.LXIV, pp. 17-38.
- AIRES-BARROS, L. (1991) - Alteração e Alterabilidade de Rochas. I.N.I.C., Lisboa, 384 p.
- AIRES-BARROS, L. & MIRANDA, A. M. (1979) – A alteração laboratorial de rochas pelo extractor de Soxhlet e sua repercussão na oxidação $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ e na variação da densidade aparente. *Com. Serv. Geol. Portugal*, t. LXIV, pp. 243-256.
- AIRES-BARROS, L. & MIRANDA, A. M. (1989) – Weathering and weatherability of rocks and its significance in geotechnics. *Weathering: its products and deposits*. Theophrastus Publ. SA. Athens. Vol. II, pp. 605-645.
- AJAYI, L.A. & BALOGUN, L.A. (1988) – Penetration testing in tropical lateritic and saprolitic soils – Nigerian Experience. *Proc. ISOPT-1*, Orlando, vol. 1, pp. 315-328.
- AKILI, W. A. & AL-JOULANI, N. A. (1988) – Cone penetration on artificially cemented sands. *Penetration Testing, ISOPT-1*, USA, pp. 607-614.
- ALBUQUERQUE, C. (1971) – Petrochemistry of a series of granitic rocks, from Northern Portugal. *Bull. of the Geol. Soc. of America*, nº82, vol. 11.
- ALBUQUERQUE, C. (1978) – Rare Earth Elements in younger granites, Northern Portugal. *Lithos*, nº 11-3, Oslo.
- ALONSO, U.R. (1980) – Correlations between static and dynamic penetration tests for São Paulo city. *Solos e Rochas, Braz. Geot. Journal*, Vol. 3, Nº 3, pp. 19-25.
- ALONSO, E. (1993) – Constitutive modelling of unsaturated soils. *Civil Engng. European Courses*, Barcelona, Spain.
- ALONSO, E.; GEN, A. & JOSA, A. (1990) – A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40, pp. 405-430.
- ALONSO, E. & DELAGE, P. (1995) – Unsaturated Soils. Alonso, E. & Delage, P. (editors). *Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils, UNSAT'95*, Paris, 2 vol., 1145p.
- ALVES, C. (1997) – Estudo da deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos da cidade de Braga (Norte de Portugal). *Tese de Doutoramento. Universidade do Minho*, Braga. 290 p.
- ANON (1970) – The logging of rock cores for engineering purposes. *Geological Society Engng. Group Working Party Report. Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 3, pp. 1-24.

Referências bibliográficas

- BISHOP, A. W. & HENKEL, D. J. (1962) – The measurement of soil properties in the triaxial test. (2nd edition), Edward Arnold Publishers, London, 228p.
- BIROT, P. & FEIO, M. (1948) – Notes sur la morphologie du Portugal méridional. *Mélanges offerts en hommage à M. Daniel Faucher*. Vol. I. Toulouse.
- BLACK, D. K. & LEE, K. L. (1973) – Saturating laboratory samples by back pressure. *Journal of Soil Mech. Found. Div.*, ASCE 99 (SM1), pp. 75-93.
- BLIGHT, G. E. (1967) – Effective stress evaluation for unsaturated soils. *Jour. Soil Mech. and Found. Engng. Div.*, ASCE 93 (SM2), pp. 125-148.
- BLIGHT, G. E. (1983) – Aspects of the capillary model for unsaturated soils. *Proc. Asia Reg. Conf. Soil Mech. & Found. Engng.*, Haifa, Israel.
- BLIGHT, G. E. (1985) – Residual soils in South Africa. In E. W. Brand & H. B. Phillipson (eds.), *Sampling and Testing of Residual Soils, a Review of International Practice*. ISSMFE Technical Committee on Sampling and Testing of Residual Soils. ISSMFE, Scorpion Press, Hong Kong, pp. 159-168.
- BLIGHT, G. E. (1988) – Construction in tropical soils. *Keynote paper, Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol. 2, pp. 449-467.
- BLIGHT, G. E. (1997) – Mechanics of Residual Soils. Blight, G. E., (editor). *Technical Committee 25 on The Properties of Tropical and Residual Soils of the Int. Soc. for Soil Mech. and Found. Eng.* Balkema, Rotterdam. 237 p.
- BONIFAS, M. (1959) – Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mem. Serv. de la Carte Geol. D'Als. et Lor*, vol.17, 159 p.
- BOORDER, N. (1965) – Petrological investigations in the Aguiar-da-Beira Granite Area, Northern Portugal. *Tese de Doutoramento. Universidade de Amsterdam*. Amsterdam.
- BOWLES, J. E. (1986) – Engineering Properties of Soils and their Measurement. 3th edition. McGraw-Hill , New York, 218p.
- BOWLES, J. E. (1988) – Foundation analysis and design. 4th edition. McGraw-Hill , New York.
- BRAND, E. W. & PHILLIPSON H. B. (1985) – Sampling and testing of residual soils. A review of international practice. *Technical Committee on Sampling and Testing of Residual Soils of the Int. Soc. for Soil Mec. and Found. Engineering*. Scorpion Press, Hong Kong. 194 p.
- BS 1377 (1990) – Methods of testing soils for civil engineering purposes. Parts 1,2,3,4,5,7. *British Standards Institution*, London.
- BUENO, B. S.; LIMA, D. C. & MINETTE, E. (1992) – Geotechnical Aspects of Viçosa Soils. *Proc. US/Brazil Geotechnical Workshop on Applicability of Classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils*, Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil, pp. 349-354.
- BURLAND, J. B. & BURBIDGE, M.C. (1985) – Settlement of foundations on sand and gravel. *Proc. Ins. of Civil Engineers*, London, Part 1, 78, pp. 1325-1381.
- BUTLER, J. J.; CALIENDO, J. A. & GOBLE, G. G. (1998) – Comparison of SPT energy measurement methods. *Geotechnical Site Characterization. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 901-905.
- BYRNE, G. P. & McKNIGHT, C. (2001) – The design and performance of soil improvement solutions in a deep collapsing residual soil. *Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng.*, Istanbul, vol.3, pp. 1715-1724.
- CAPDEVILLA, R.; CORRETGE, G. & FLOOR, P. (1973) – Les Granitoides Varisques de la Meseta Ibérique. *Bull. Soc. Geol. de France*, vol. 15.

- CARDOSO, A. S. (1986) – Ensaios triaxiais dos solos residuais da cidade do Porto. *Geotecnia*, n.º 47, SPG, Lisboa, pp. 103-124.
- CARDOSO, J. V. C. (1974) - A Classificação dos Solos de Portugal. *Nova versão. Bol. Solos SROA*, Lisboa, pp. 14-46.
- CARRETERO, R. S.; EGUILUZ, L.; PASCUAL, E. & CARRACEDO, M. (1990) - Igneous Rocks In: Dallmeyer, R.D. & Martinez Garcia, E. (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer-Verlag, pp. 292-313.
- CARVALHO, A. M. G. & CARVALHOSA A. B. (1982) - Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 32-A, Ponte de Sôr, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 57 p.
- CARVALHO, J. B. Q. (1991) – Microstructure of concretionary lateritic soils. *Proc. IX Panamerican Conf. of Soil Mech. Found. Engng.*, I, pp. 117-128.
- CARVALHO, J. B. Q. & SIMMONS, J. B. Q. (1997) – Mineralogy and microstructure. In Blight, G. E. (ed.), *Mechanics of Residual Soils. Technical Committee 25 on The Properties of Tropical and Residual Soils of the Int. Soc. for Soil Mec. and Found. Engng.* Balkema, Rotterdam, pp. 31-40.
- CARVALHOSA, A. B. (1967) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 40-D, Portel, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 21 p.
- CARVALHOSA, A. B. (1983) – Esquema geológico do Maciço de Évora. *Com. Serv. Geol. Portugal*, Tomo 69, fasc. 2, pp. 201-208.
- CARVALHOSA, A. B. (1992) – Paleozóico: Estrtigrafia: Zona de Ossa-Morena: Granitóides. In *Carta Geológica de Portugal à escala de 1/200000. Oliveira, J. T. (Coord.), Notícia explicativa da folha 8, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 91 p.
- CARVALHOSA, A. B. (1999) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 36-C, Arraiolos, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 52 p.
- CARVALHOSA, A. B.; CARVALHO, A. M. G.; ALVES, C. A. M. & PINA, H. L. (1969) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. *Notícia explicativa da folha 40-A, Évora. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 26 p.
- CARVALHOSA, A. B. & CARVALHO, A. M. G. (1970) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. *Notícia explicativa da folha 43-B, Moura. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 30 p.
- CARVALHOSA, A. ; GONÇALVES, F. & OLIVEIRA, V. (1987) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. *Notícia explicativa da folha 36-D, Redondo. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 63 p.
- CARVALHOSA, A. B. & ZBYSZEWSKI, G. (1972) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. *Notícia explicativa da folha 40-C, Viana do Alentejo. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 24 p.
- CARVALHOSA, A. & ZBYSZEWSKI, G. (1991) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. *Notícia explicativa da folha 40-B, Reguengos de Monsaraz. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 51 p.
- CARVALHOSA, A. & ZBYSZEWSKI, G. (1994) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. *Notícia explicativa da folha 35-D, Montemor-O-Novo. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 86 p.
- CASAGRANDE, A. (1936) – The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.*, Cambridge, Mass., vol. 3.
- CASAGRANDE, A. (1947) – Classification and identification of soils. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 73. n.º 6, Part 1.
- CASSAN, M. (1982) – Los ensayos in situ en la mecanica del suelo. Editores Técnicos asociados, Barcelona.
- CASTRO, G. (1988) – Penetrómetros. *Informação Técnica – ICT, Geotecnia ITG11*, LNEC, Lisboa, 18p.

- CHACÓN, J. (1974) – Metamorfismo dinámico en la banda Badajoz-Córdoba: Los gneises milonitas de Higuera de Llerena (prov. de Badajoz). *Bol. Geol. Min.*, 84 - 5; pp. 700-712.
- CHAMINÉ, H. I. (2000) – Estratigrafia e Estrutura da Faixa Metamórfica de Espinho - Albergaria-A-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. *Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências Universidade do Porto*. Porto. 497p.
- CHAN, D.C. (1976) – Coefficients of earth pressure at rest of Hong Kong soils. *M. Phil. Thesis, University of Hong Kong*.
- CHANG, M. F. (1988) – In situ testing of residual soils in Singapore. *Proceedings of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol. 1, pp. 97-108.
- CHEN, H. W. & YAMAMOTO, L. D. (1987) – Permeability test for hazardous waste management with clay liners. *Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management*. Lewis Publishers, USA, pp. 229-243.
- CHESWORTH, W. (1973) – The parent rock effect in the genesis of soil. *Geoderma*, 10, pp. 215-225.
- CHESWORTH, W. (1975a) – Soil minerals in the system Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O : Phase equilibrium model. *Clays and Clay Miner.*, vol.23, pp. 55-60.
- CHESWORTH, W. (1975b) – The system SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 and the kaolinitic stage of the goethite facies. *Clays and Clay Miner.*, vol. 23. pp. 389-392.
- CHESWORTH, W. (1977a) – The weathering of granite. *Proc. 1Ind Symp. Origin Distrib. of Elements*, Paris.
- CHESWORTH, W. (1977b) – Weathering stages of common igneous rocks, index minerals and assemblages at the surface of the earth. *Journ. Soil Science*, 28, pp. 490-497.
- CHEUNG, C. K.; GREENWAY, D. R. & MASSEY, J. B. (1988) – Direct shear testing of a completely decomposed granite. *Proceedings of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol. 1, pp.109-118.
- CHITTLEBOROUGH, D. J. (1991) – Indices of weathering for soils and paleosoils formed on silicate rocks. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38, pp. 115-120.
- CHORLEY, R. J. (1969) – The role of water in rock disintegration. *Introduction to Fluvial Processes*, Methuen, pp. 53-73.
- CLARK, A. (1970) – Potassium argon age and regional relationships of the Panasqueira tin tungsten mineralization. *Comun. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, nº54.
- CODUTO, D. P. (1994) – Foundation design: principles and practices. Prentice Hall, New Jersey, 796 p.
- COLLARES, E. G. & LORANDI, R. (1994) – Geotechnical characterization of weathered material in tropical regions. *Proc. 7th Congress Int. Assoc. Engng. Geology*, Lisbon, vol. 5, pp. 3433-3439.
- COLLINS, K. (1985) – Towards characterization of tropical soil microstructure. *Proc. 1st Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, Brasilia, 1, pp. 85-96.
- COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. & TAYLOR, R. N. (1995) – Strength and stiffness of structured and unstructured soils. *Proc. 11th European Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Copenhagen, vol. 1, pp. 1.55-1.62.
- COOPER, A. H. & ROMANO, M. (1982) – The lower Ordovician stratigraphy of the Dornes-Figueiró dos Vinhos area, central Portugal, with descriptions of *Merostomichnites* ichnosp. and *Rosselia socialis*; two previously unrecorded trace fossils. *Com. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 68, pp. 73-82.
- COOK, J. R. & NEWILL, D. (1988) – The field description and identification of tropical residual soils. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, Balkema, vol. 1, pp.3-10

COSTA FILHO, L. M. & VARGAS Jr. E. (1985) – Topic 2.3 . Hydraulic properties. Peculiarities of geotechnical behaviour of tropical lateritic and saprolitic soils. *Progress Report (1982-1985). Brazilian Society of Soil Mechanics*, pp. 67-84.

COWLAND, J. W. & CARBRAY A. M. (1998) – Three cut slope failures on relict discontinuities in saprolitic soils. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, Balkema, vol. 1, pp. 253-258.

DANZIGER, F. A. B.; POLITANO, C. F. & DANZIGER, B. R. (1998) – CPT - SPT correlations for some Brazilian residual soils. *Geotechnical Site Characterization. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 907-912.

DAY, S. R. & DANIEL, D. E. (1985) – Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. *ASCE Journal of Geotech. Engng.*, 111(8), pp. 957-970.

DEARMAN, W. R. (1974) – Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice. *Bull. Int. Assoc. of Engineering Geology*, 9, pp. 33-42.

DEARMAN, W. R. (1976) – Weathering classification in the characterisation of rock: a revision. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13, pp. 123-127.

DEARMAN, W. R. (1986) – State of weathering: the search for a rational approach. In Hawkins, A.B. (ed.), *Site Investigation Practice: Assessing BS5930*, Geological Society, Engineering Geology Special Publication, 2, London, pp. 132-142.

DEARMAN, W. R. (1995) – Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930: 1981 proposals. *Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 28, pp. 267-276.

DEARMAN, W. R.; BAYNES, F. J. & IRFAN, T. Y. (1978) – Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, pp. 345-374.

DEERE, D. U. & PATTON, F. D. (1971) – Slope stability on residual soils. *Proc. 4th Pan. Am. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Suan Ivan*, Puerto Rico, vol. 1, pp. 87-179.

DELGADO RODRIGUES, J. (1976) – A alterabilidade das rochas, aplicação a casos portugueses. *Tese para Especialista*, LNEC, Lisboa.

DELGADO RODRIGUES, J. (1978) – Some problems raised by the study of the weathering of igneous rocks. *Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments*, UNESCO/RILEM, Paris, Paper 2.4.

DELGADO RODRIGUES, J. & COSTA, D. (1996) – Conservation of Granitic Rocks. LNEC. Lisboa, 101 p.

DELGADO RODRIGUES, J.; GOUVEIA, M. A.; PRUDÊNCIO, M. I.; FIGUEIREDO, M. O. & SILVA, M. T. (1994) – Influence of inherited features in the decay behaviour of granite stones. *Proc. Workshop on Degradation and Conservation of Granitic rocks in Monuments*, Santiago de Compostela.

DEVLIN, C.; KAVANAGH, J. & WIDDIS, T. (1995) – The geotechnical properties of granitic soil. *Proc. XI ECSMFE*, Copenhagen, vol.1, pp. 1.97-1.102.

DOBEREINER, L. & PORTO, C. G. (1993) – Considerations on the weathering of gneissic rocks. *The Engineering Geology of Weak Rock*, Proc. 26th Annual Conf. Engng. Group of the Geological Society, Leeds, pp. 193-205.

DOUGLAS, B. J. & OLSON, R. S. (1981) – Soil classification using electric cone penetrometer. In *Cone penetration and testing*, Norriss & Holtz (ed.), pp. 209-227.

DUARTE, I. M. R. (1993) – Contribuição para a cartografia geotécnica de região de Águeda. *Tese de Mestrado*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL. Lisboa. 2 volumes. 153p.

DUARTE, I. M. R. & LADEIRA, F. L. (1995) – Características Geotécnicas dos Solos Residuais da Região de Águeda. *Actas do 5º Cong. Nacional de Geotecnia*, Coimbra. Vol. 1, pp. 167-172.

Referências bibliográficas

- DUARTE, I. M. R.; LADEIRA, F. L. & GOMES, C.F. (2000) – Características geológico-geotécnicas do solo residual do granito de Marvão (Portalegre). *Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto. Vol. 1, pp. 151-160.
- DUNCAN, J. M. & CHANG, C. H. (1970) – Non linear analysis of stress and strain in soils. *Journ. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, vol. 96, SM5, pp. 1630-1653.
- EBUK, E. J.; HENCHER, S. R. & LUMSDEN, A. C. (1993) – The influence of structure on the shearing mechanism of weakly bonded soils derived from granites. *The Engineering Geology of Weak Rock, Proc. 26th Annual Conf. Engng. Group of the Geological Society*, Leeds.
- ELSBURY, B. R.; DANIEL, D. E.; SRADERS, G. A. & ANDERSON, D. C. (1990) – Lessons learned from compacted earth liners. *ASCE Journal of Geotech. Engng.* 116(11), pp. 1641-1659.
- FEIO, M. (1951) – A evolução do relevo do Baixo Alentejo e Algarve. *Com. Serv. Geol. Port.*, Lisboa, 32.
- FEIO, M. (1983) – O relevo da Serra de Ossa: uma interpretação tectónica. *Finisterra*, XVIII (25), Lisboa, pp. 5-26.
- FEIO, M. (1991) – Clima e agricultura. Exigências climáticas das principais culturas e potencialidades agrícolas do nosso clima. *Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação, Direcção-Geral de Planeamento e Agricultura*, Lisboa, 266 p.
- FEIO, M. & ALMEIDA, G. (1980) – A Serra de S. Mamede. *Finisterra*, XV (29), Lisboa, pp. 30-52.
- FEIO, M. & MARTINS, A. (1993) – O relevo do Alto Alentejo, (traços essenciais). *Finisterra*, XXVIII, 55-56, Lisboa, pp. 149-199.
- FERNANDES, A. P.; PERDIGÃO, J. C. ; CARVALHO, H. F. & PERES, A. M. (1973) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 28-D, Castelo de Vide, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 44 p.
- FERREIRA, H. A. (1950) – Estremadura, Ribatejo e Alto-Alentejo. O Clima de Portugal, Fasc. VI, Serv. Meteorológico Nacional, Lisboa, 48 p.
- FERREIRA, N.; IGLESIAS, M.; NORONHA, F.; PEREIRA, E.; RIBEIRO, A. & RIBEIRO, M. L. (1987) – Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico. Livro Homenagem L. C. García de Figueiroa, F. Bea, A. Carnicero, J. C. Gonzalo; M. Lopez Plaza & M. D. Rodríguez Alonso (Eds.)*, Univ. Salamanca, pp. 37-51.
- FERREIRA, P. A. S. (2000) – Alteração e Alterabilidade das Rochas. Implicações em Obras de Engenharia. *Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra*. Coimbra. 246 p.
- FERREIRA, S. R. M. (1990) – Geology and pedology related to collapsible soils in Pernambuco- Brazil. *Proc. 6th Congress Int. Assoc. Engng. Geology Congress*, Amsterdam, vol. 1, pp. 617-621.
- FERREIRA GOMES, L. M.; CAVALEIRO, V. M. P. & SARAIVA, C. M. A. M. (1995) – Contribuição para a caracterização geotécnica dos solos residuais graníticos da Covilhã. *Actas do 5º Cong. Nacional de Geotecnia*. Coimbra. Vol. 1, pp. 173-178.
- FOLQUE, J. (1982) – Ensaios de penetração. *Seminário 276.LNEC*, Lisboa.
- FOLQUE, J. (1988) – Modernas tendências nas técnicas de ensaio em Mecânica dos Solos. *Informação Técnica – ICT, Geotecnia ITG15*, LNEC, Lisboa.
- FOLQUE, J. (1996) – Introdução à mecânica dos solos. (2ª ed.), LNEC, Lisboa, 131 p.
- FOOKES, P. G. & HAWKINS, A. B. (1988) – Limestone weathering: its engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. *Quarterly Journal Engineering Geology*, 21, pp. 33-57.

FOOKES, P. G. & HORSWILL, P. (1970) – Discussion on engineering grade zones. *Proc. on Conf. on In Situ Investigations in Soils and Rocks. Institution of Civil Engineers, London*, pp. 53-57.

FREDLUND, D. G. (1985) - Soil mechanics principles that embrace unsaturated soils. . *Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, San Francisco, vol.1, pp. 465-472.

FREDLUND, D. G. & MORGESTERN, N.R. (1977) – Stress state variables for unsaturated soils. *J. Geotech. Engng. Div*, ASCE 103 (GT5), pp. 447-466.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. (1993) – Soil Mechanics for unsaturated soils. J. Wiley. New York.

FRYDMAN, S.; HENDRON, N. D.; HORN, H.; STEINBACH, J.; BAKER, R. & SHAAL,B. (1980) – Liquefaction study of cemented sands. *J. Geotech. Engng. Div*, ASCE 106 (GT3), pp. 275-297.

FURTADO, A. F. A. S. (1966) – Alteração dos granitos em Angola. I – Em meio temperado quente húmido. *Garcia de Orta, Serv. Geol.*, Lisboa, 14 (2), pp. 201-216.

FURTADO, A. F. A. S. (1970) – Sur l’arénisation d’un granite à moscovite. *Bol. Geol. y Minero*, Madrid, 81 - 2 - 3, pp. 249-252.

FURTADO, A. F. A. S. (1973) – Sobre a presença de gibbsite em solos derivados de rochas graníticas em climas tropicais e temperados. *Garcia de Orta, Serv. Geol.*, Lisboa, 1 (1), pp. 15-22.

FURTADO, A. F. A. S. (1974) – L’arénisation des granites en climats tropicaux et tempérés – Caractéristiques du complexe d’altération. *Com. X Congr. Int. Soil*. Moscow.

FURTADO, A. F. A. S. (1982) – Novos dados sobre a presença de gibbsite em solos derivados de granitos do NW de Portugal. *Garcia de Orta, Serv. Geol.*, Lisboa, 5, 1-2, pp. 59-68.

GARGA, V. K. (1988) – Effect of sample size on shear strength of basaltic residual soils. *Canadian Geotech. Journal*, vol. 25, pp. 478-487.

GIBBS, H. J. & HOLTZ, W. H. (1957) – Research on density of sands by spoon penetration testing. *Proc. 4 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, London, vol. 1, pp. 35.

GIBSON, R. E. & HENKEL, D. J. (1954) – Influence of duration of tests on “drained” strength. *Géotechnique*, vol. 4, nº 1.

GILKES, R. J. & SUDDHIPRAKARAN, A. (1981) – Mineralogical and chemical aspects of laterisation in Southwestern Australia. *Proc. of the Int. Seminar on Laterisation Processes*. Balkema, Rotterdam, pp. 34-44.

GOLDICH, S. S. (1938) – A study in rock weathering. *J. of Geol.*, vol. 46, pp. 17-58.

GOMES, C. F. (1979) – Raios X no estudo de materiais. *Textos didácticos. Universidade de Aveiro*. Aveiro. 209p.

GOMES, C. F. (1988) – Argilas. O que são e para que servem. *Fundaçao C. Gulbenkian*, Lisboa, 457 p.

GOMES CORREIA, A. (1987) – Ensaios para controlo de terraplenagens. Inf. Técnica, ICP- cpp524, LNEC, Lisboa, 224p.

GONÇALVES, F. (1957) – Notas de mineralogia e petrografia portuguesas. O granito biotítico de Santa Eulália (Elvas). *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Lisboa*. 7ª sér., nº 25, pp. 183-190.

GONÇALVES, F. (1958) – Esboço geológico da região situada entre Santa Eulália e Barbacena (Alto Alentejo). *Ver. Fac. Ciênc. Lisboa*, 2ª Série, vol. 6, fasc. 1, pp. 69-80, Lisboa.

GONÇALVES, F. (1971) – Subsídios para o conhecimento geológico do Nordeste alentejano. *Mem. Serv. Geol. Port.*, nº 18, 62 pp., Lisboa.

- GONÇALVES, F. (1978) – Estado actual do conhecimento geológico do Nordeste alentejano. *Separata do IV Curso de Extensão Universitária de Ciências Geológicas, Faculdade de Ciências de Lisboa*, 23 p.
- GONÇALVES, F. (1981/82) – Membro arenito-conglomerático da parte superior do Câmbrico de Elvas. *Acad. Ciênc.*, tomo 24, pp. 33-39.
- GONÇALVES, F. & ASSUNÇÃO, C. T. (1970) – Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 37-A, Elvas, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 50 p.
- GONÇALVES, F.; ASSUNÇÃO, C. T. & COELHO, A. V. P. (1972) – Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 33-C, Campo Maior, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 41 p.
- GONÇALVES, F. & COELHO, A. V. P. (1970) – Nota prévia sobre o provável carácter subvulcânico do maciço granítico de Santa Eulália (Alto Alentejo). *Bol. Mus. Min. Geol. Fac. Ciênc.*, Vol. 11, fasc. 2, pp. 251-263.
- GONÇALVES, F. & COELHO, A. V. P. (1974) – Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 36-B, Estremoz, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 64 pp.
- GONÇALVES, F. & FERNANDES, A. P. (1973) – Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 32-B, Portalegre, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 45 pp.
- GONÇALVES, F.; LOPES, J. C.; LOPES, L.; RIBEIRO, C. & VIANA, A. (1991) – Maciço ígneo de Santa Eulália – Considerações acerca das suas potencialidades na produção de Rochas Ornamentais. *A Pedra*, ano X, nº39, pp. 7-11.
- GONÇALVES, F. & LOPES, L. (1992) – Aspectos das potencialidades das rochas ornamentais do Alentejo. *Jornadas Técnicas sobre a Indústria Extrativa e transformadora de Rochas Ornamentais do Alentejo, A Pedra*, nº 43, pp. 7-17.
- GONÇALVES, F.; ZBYSZEWSKI, G. & COELHO, A. V. P. (1975) – Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 32-D, Sousel, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 49 pp.
- GOUVEIA, M. A.; PRUDÊNCIO, M. I.; FIGUEIREDO, M. O.; PEREIRA, L. C. J.; WAERENBORGH, J. C.; MORGADO, I.; PENA, T. & LOPES, A. (1993) – Behaviour of REE and other trace and major elements during weathering of granitic rocks, Évora, Portugal. *Chemical Geology*, vol.107, pp. 293-298.
- HAMILTON, J. M.; DANIEL, D. E. & OLSON, R. E. (1981) – Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils. *Permeability and Groundwater Contaminant Transport*, ASTM STP746, pp. 182-196.
- HARNOIS, L. & MOORE, J. M. (1988) – Geochemistry and origin of the Ore Chimney Formation, a transported palaeoregolith in the Greenville Province of southern Ontario, Canada. *Chemical Geology*, 69, pp. 267-289.
- HARRIS, R. C. & ADAMS, J. A. S. (1966) – Geochemical and mineralogical studies on the weathering of granitic rocks. *Amer. Journ. Sci.*, 262, pp. 146-173.
- HASEMAN, J. F. & MARSHALL, C. E. (1945) – The use of heavy minerals in studies of the origin and development of soils. *Missouri Agri. Expt. Sta. Research Bull.*, 387p.
- HASKINS, D. R.; BELL, F. G. & SCHALL, A (1998) – The evaluation of granite saprolite as a founding medium at Injaka Dam, South Africa. *Proc. 8th Congress Int. Assoc. Engng. Geology and Environment*, Vancouver, vol. 5, pp. 3035-3041.
- HEAD, K. H. (1992) – Manual of Soil Laboratory Testing. Vol.1: Soil Classification and Compaction Tests. (2nd edition), Pentech Press, London, 388p.
- HEAD, K. H. (1994) – Manual of Soil Laboratory Testing. Vol.2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. (2nd edition), J. Wiley & Sons, New York, 440p.

- HENCHER, S. R. & MARTIN, R.P. (1982) – The description and classification of weathered rocks in Hong Kong for engineering purposes. *Proc. 7th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Hong Kong, vol. 1, pp. 125-142.
- HENDRICKS, D. H. & WHITTIG, L. D. (1968) – Andesite weathering - II. Geochemical changes from andesite to saprolite. *J. Soil Science*, 19, pp. 147-153.
- HENOEGL, O. (2001) – Capillarity, matrix potential and water permeability in unsaturated soils. *Proc. 15 th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng.*, Istanbul, vol. 1, pp. 583-587.
- HOWAT, M. D. (1985) – Completely weathered granite – soil or rock ?. *Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 18, nº 3, pp. 195-206.
- HOWAT, M. D. (1988) – Written discussion in reply to the question raised by Rocha & Queiroz: The in situ strength of saturated decomposed granite. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol.2, pp. 603.
- HOWAT, M. D. & CATER, R. W. (1985) – Passive strength of completely weathered granite. *Proc. 1st Int. Conf. Geomech. in Tropical, Lateritic and Saprolitic Soils*, Brasilia, vol. 2, pp. 371-379.
- HVORSLEV, M. J. (1951) – Time-lag and soil permeability in groundwater observations. *Bull. US Waterways Experiment Station*, nº 36, Miss., USA
- IGM (1999) – As Cartas Geológicas ao serviço do desenvolvimento. Publicação integrada nas Comemorações dos 150 anos da criação da 1ª Comissão Geológica, 56 p.
- INMG (1991) – Normais climatológicas da região de “Alentejo e Algarve”, correspondentes a 1951-1980. *O Clima de Portugal*, Fasc. XLIX, vol. 4, 4ª Região, Lisboa, 98 p.
- IRELAND, H. O.; MORETTO, O. & VARGAS, M. (1970) – The dynamic penetration tests; a Standard that is not standardised, *Géotechnique*, 20, nº 2, pp. 185-192.
- IRFAN, T. Y. (1988) – Fabric variability and index testing of a granitic saprolite. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol.1, pp. 25-35.
- IRFAN, T. Y. (1996) – Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *The Quarterly Journal Engineering Geology*, 29, pp. 5-35.
- IRFAN, T. Y. & DEARMAN, W. R. (1978a) – The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. *Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 11, pp. 233-244.
- IRFAN, T. Y. & DEARMAN, W. R. (1978b) – Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 17, pp. 79-90.
- IRFAN, T.Y. & WOODS, N.W. (1988) – The influence of relict discontinuities on slope stability in saprolitic soils. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol. 1, pp. 267-276.
- JACKSON, M. L. (1948) – Weathering sequence of clay size minerals in soils and sediments. *Jour. Phys. & Colloidal Chem.*, v. 52, pp. 1237-1260.
- JACKSON, M. L. (1968) – Weathering of primary and secondary minerals in soils. *Trans. 9 th Int. Cong. Soil Sci.*, 4, pp. 281-292.
- JACKSON, M. L.; TYLER, S. A.; WILLIS, A. L.; BOURBEAU, G. A. & PENNINGTON, R. P. (1948) – Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. I - Fundamental generalizations. *J. Phy. Coll. Chem.*, 52, pp. 1237-1260.
- JACKSON, M. L.; HSEUNG, Y.; COREY, R. B.; EVANS, J. & HEUVAL, R. C. (1952) - Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. II-Chemical weathering of layer silicates. *Proc. Soil. Sci. Soc. Amer.*, 16, pp. 3-6.

Referências bibliográficas

- JACKSON, M. L. & SHERMAN, G. D. (1953) - Chemical weathering of minerals. *Adv. Agronomy*, vol.5, pp. 219-318.
- JAE (1976) - Carta de Materiais do Distrito de Beja, à esc. 1: 200000. Sector de geotecnia da Direcção dos Serviços Regionais de Estradas do Sul. Évora.
- JAE (1980a) - Carta de Materiais do Distrito de Évora, à esc. 1: 200000. Sector de geotecnia da Direcção dos Serviços Regionais de Estradas do Sul. Évora.
- JAE (1980b) – EN 18 e EN 246 – Variantes a Portalegre. Projecto. Estudo geotécnico. Vol. 1, Anexo II (Relatório). Vol. 2, Anexo II (Ensaios). Solteste.
- JAE (1983a) - Carta de Materiais do Distrito de Portalegre, à esc. 1: 200000. Sector de geotecnia da Direcção dos Serviços Regionais de Estradas do Sul. Évora.
- JAE (1983b) – EN 245-1 – Entre Alter do Chão e Portalegre. Projecto de execução. Estudo geológico e geotécnico. Estudocivil.
- JAE (1985) – IP2 / EN18 – Portalegre - Monforte e variante de Monforte. Projecto de execução. Estudo geológico e geotécnico. Vol. II. Cotelpro.
- JAE (1987) – IP7 / EN4 – Reforço do pavimento e protecção marginal entre Elvas e Fronteira do Caia. Projecto de execução. Estudo geológico-geotécnico. Relatório e peças desenhadas. Estudocivil.
- JAE (1988) – IP2 / EN18 – Alpalhão - Portalegre. Variante de Fortios. Estudo prévio. Relatório do estudo geológico e geotécnico. Solteste. Vol. 4 - peças desenhadas.
- JAE (1989a) – IP2 / EN18 – Alpalhão (próx.) – Portalegre (próx.). Projecto. Vol. 6. Anexo IX - Estudo geológico e geotécnico. Vol. 10 - Geotecnia - peças desenhadas. Viaprojectos.
- JAE (1989b) – IP2 / EN 118 e EN18 – Tolosa – Alpalhão. Projecto. Estudo geológico e geotécnico. Vol. 7, Anexo VIII. Viaprojectos.
- JAE (1997) – IP2 – Nó de acesso à Zona Industrial e à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Portalegre. Projecto de execução. Vol. 1. Obra geral. Memória, prospecção geotécnica e ensaios. Viés.
- JAE (1998a) – IC 13 – Alter do Chão / Portalegre com ligação ao Crato e Flôr da Rosa. Estudo prévio. Vol.1. Rede Viária. Tomo I - peças escritas, Secção B. Estudo geológico e geotécnico. Provia.
- JAE (1998b) – EN 118 e EN18 – Variante de Alpalhão. Projecto. Estudo geológico e geotécnico. Vol. 5. Relatório geotécnico, prospecção e ensaios de laboratório. Viaprojectos.
- JAE (1999) – IC 33 - Nó de Grândola (Norte) da A2/Évora. Estudo prévio. Parte 2 - Estudo geológico e geotécnico. Vol. 1, Tomo 1.1 - Memória e Tomo 1.2. - Anexos. Engivia.
- JAE/BRISA (1993) – A6 - Auto-estrada Marateca/Elvas; Sublanço Vendas Novas/ Montemor-o-Novo. Projecto de execução nº 1. Terraplenagens. Parte 1.4 - Geotecnia. Memória. Anexo 1- Gráficos individuais e fotografias das sondagens mecânicas. Viés.
- JAE/BRISA (1994) – A6 - Auto-estrada Marateca/Elvas; Sublanço Montemor-o-Novo/Évora. Projecto de execução nº 1. Terraplenagens. Parte 1.4 - Geotecnia. Tomo 1 - Traçado. Memória. Tecnofisil.
- JAE/BRISA (1995) – A6 - Auto-estrada Marateca/Elvas; Sublanço Évora/Estremoz. Projecto de execução nº 1. Terraplenagens. Parte 1.4 - Estudo geológico e geotécnico. Vol.1, Memória descritiva. Vol. 4, Anexo 3 - Gráficos individuais dos ensaios com penetrômetro dinâmico ligeiro. Planvia.
- JAE/BRISA (1999) – A6 - Auto-estrada Marateca/Elvas; Sublanço Borba/Elvas. Mapa resumo das características dos solos. Soares da Costa.

JENNINGS, J. E.; BRINK, A. B. A. & WILLIAMS, A. A. B. (1973) – Revised guide to soil profiling for civil engineering purposes in Southern Africa. *The Civil Engineering in South Africa*, Jan., pp.3-12.

JENNY, H. (1941) – Factors of soil formation. McGraw Hill Book Co, New York, 281 p.

JOAQUIM, A. N.; LADEIRA, F. & COELHO, A. V. P. (1972) – Contribuição para o conhecimento geológico do maciço eruptivo de Ervedal (Avis). *Bol. Museu e Lab. Min. e Geol. da Faculdade de Ciências*, vol. 13, fasc. 1, Lisboa, pp. 97-131.

JULIVERT, M.; FONTBOTÉ, J.; RIBEIRO, A. & CONDE, L. (1974) – Memória explicativa del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. *Inst. Geol. Min. España*, Madrid. 101p.

KARUBE, D. & KATO, S. (1994) – An ideal unsaturated soil and the Bishop's soil. *Proc. 13 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, New Delhi, vol.1, pp. 43-46.

KRANK, K. D. & WATTERS, R.J. (1983) – Geotechnical properties of weathered Sierra Nevada granodiorite. *Bull. of the Assoc. Engineering Geologists*, 20, pp.173-184.

KATO, S.; YOSHIMURA, Y. & KAWAI, K. (2000) –Estimation of cohesion in unsaturated soil with unconfined compression test. *GeoEng 2000, Proc. Int. Conf. on Geotechnical & Geological Engineering*, Melbourn, Australia. Conference Theme: Stability of Natural and Excavated Slopes. (CD-ROM: GEOENGCD / SNES0997.PDF).

KELLER, W. D. (1957) - The principles of chemical weathering. Lucas, A. Bros., Columbia, Mo., 111p.

KELLER, W. D (1978) – Kaolinization of feldspar as displayed scanning electron microscope. *Geology*, 6, pp. 184-188.

KELLER, W. D.; KIERSCH, G. A. & HOWELL, P. (1955) – Argillation of three silicate rocks expressed in terms actions transfer. *Clays and Clay Miner.*, Proc. 3th Nat. Conf. 1954, pp. 413-417.

KLEIN, C. & HURLBUT, Jr. C. S. (1985) – Manual of mineralogy (after JAMES D. DANA). (20th edition), J. Wiley & Sons, Singapore. 596p.

KLUKANOVÁ, A. & LIŠČÁK, P. (1998) – Monitoring of geological hazards of the Slovak Republic. *Proc. 8th Congress Int. Assoc. Engng. Geology and Environment*, Vancouver, vol. 2, pp. 1113-1120.

KOVACS, W. D. (1979) – Velocity measurement of free – fall SPT hammer. *ASCE, J. Geotech. Engng. Div.*, 105, GT1, pp. 1-10.

KOVACS, W. D.; EVANS, J. C. & GRIFFITH, A. H. (1977) – Towards a more standardised SPT. *IX Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Tokyo, 2, pp. 269-276.

KOVACS, W. D.; GRIFFITH, A. H. & EVANS, J. C. (1978) – An alternative to the cathead and rope for the standard penetration test, *ASTM Geotech. Testing J.*, 1, 2, pp. 72-81.

KOVACS, W. D. & SALOMONE, L. A. (1982) – SPT hammer energy measurement. *J. Geotech. Engng. Div.*, ASCE, 108, GT4, pp. 599-620.

KRAUSKOPF, K. B. (1967) – Introduction to geochemistry. McGraw Hill. New York.

KRONBERG, B. I. & NESBITT, M. W. (1981) – Quantification of weathering, soil geochemistry and fertility. *Journ. Soil Sci.*, vol 32, pp 453-459.

KUMAPLEY, N. K. & BOAKYE, S. Y. (1980) – The use of the cone penetrometer for the determination of the liquid limits of soils of low plasticity. *Proc. 7th African Regional Conf. Soil Mech. Found. Engng*, Accra, vol. 1, pp. 167-170.

KWAN, C. Y. (1981) – In situ stresses of residual soils with reference to weathered granites. *Msc. Thesis. Imperial College of Science and Technology*. London. 172 p.

Referências bibliográficas

- LADEIRA, F. L. (2002) – Sondagens - Elementos básicos. (Em preparação).
- LADEIRA, F. L. & GOMES, M. (1986) – Quantificação da alterabilidade de um gnaisse. *Geociências*, Aveiro, vol.1, pp. 61-66.
- LADEIRA, F. L. & MINETTE, E. (1984a) – Índices físicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. *4º Cong. Bras. de Geol. de Eng.*, Belo Horizonte, vol. 3, pp. 359-363.
- LADEIRA, F. L. & MINETTE, E. (1984b) – Índices geomecânicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. *4º Cong. Bras. de Geol. de Eng.*, Belo Horizonte, vol. 3, pp. 364-370.
- LADEIRA, F. L. & MINETTE, E. (1984c) – A quantificação da alterabilidade das rochas. *Geotecnia*, SPG, Lisboa, nº 40, pp. 27-36.
- LADEIRA, F. L. & FERREIRA GOMES, L. M. (1992) – Novo penetrómetro dinâmico ligeiro. *Rev. Concreto, AICCOPN*, nº 122, 51p.
- LADEIRA, F. L. & OLIVEIRA, R. I. (1995) – Liquid limits by the BS cone method. *Proc. XI ECSMFE*, Copenhagen, vol.3, pp. 3.139-3.143.
- LALOUI, L.; GEISER, F.; VULLIET, L.; LI, X.L. ; BOLLE, A. & CHARLIER, R. (1997) – Characterization of the mechanical behaviour of an unsaturated sandy silt. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Hamburg, vol. 1, pp. 347-350.
- LAMBE, T. W. (1960) – Soil testing for engineers. J. Wiley & Sons, N. York, 165p.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. (1979) – Soil Mechanics, SI version. J. Wiley & Sons, N. York, 553 p.
- LEE, I. K. & COOP M. R. (1995) – The intrinsic behaviour of a decomposed granite soil. *Géotechnique*, 45, nº 1, pp. 117-130.
- LEE, S. G. & De FREITAS, M. H. (1989) – A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. *Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 22, pp. 31-48.
- LELONG, F. (1967) – Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (Guyanne Française). *Thèse Fac. Sci. Nancy*, 182 p.
- LEMOS, J. J. L.; FERREIRA GOMES, L. M.; PAIS, L. J. A. (1997) – Comportamento mecânico de um solo residual granítico – Região da Covilhã. *Actas do VI Congresso Nacional de Geotecnia*, IST, Lisboa. Vol. 1, pp. 63-76.
- LEMOS, L. J. L. & RODRIGUES, C. M. G. (2000a) – Comportamento intrínseco de um solo residual granítico. *Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto. Vol. 1, pp. 229-240.
- LEMOS, L. J. L. & PAIS, L. J. A. (2000b) – Comportamento mecânico de um solo residual granítico da Covilhã. *Geotecnia*, SPG, Lisboa, 90, pp. 51-76.
- LENEUF, N. (1959) – L'altération des granites calco-alcalines et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. *Thèse, Univ. Paris*, VI, 210 p.
- LEROUEIL, S. & VAUGHAN, P. R. (1990) – The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40, nº3, pp. 467-488.
- LIANG, N. (1983) – An examination of the SPT. *Thesis, Univ. of British Columbia*.
- LISBOA, J. V. V.; LOPES, J. M. C. & LOPES, J. L. G. (1997) – Prospecção de granitos ornamentais: Maciço de Santa Eulália. *Actas Com. II Cong. Europeu da Pedra Natural e Industrial. Ass. Ind. Portuguesa / Feira Int. de Lisboa*, Lisboa.

- LITTLE, A. L. (1969) – The engineering classification of residual tropical soils. *Proc. Spec. Session on Eng. Props. Lateritic Soils. 7th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, Mexico City, pp.1-10.
- LLORET, A. & ALONSO, E.E. (1985) – State surfaces for partially saturated soils. *Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, San Francisco, vol. 2, pp.557-562.
- LNEC E 15 (1953) – Solos. Determinação do peso específico das partículas de um solo. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 195 (1966) – Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 197 (1966) – Solos. Ensaio de compactação. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 200 (1967) – Solos. Ensaio de expansibilidade. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 199 (1967) – Solos. Ensaio de equivalente de areia. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 201 (1967) – Solos. Determinação do teor da matéria orgânica. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 218 (1968) – Prospecção geotécnica de terrenos. Colheita de amostras. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 219 (1968) – Prospecção geotécnica de terrenos – vocabulário. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 239 (1970) – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 240 (1970) – Classificação para fins rodoviários. LNEC, Lisboa.
- LNEC NP 83 (1965) – Solos. Determinação da densidade das partículas. LNEC, Lisboa.
- LNEC NP 84 (1965) – Solos. Determinação do teor em água. LNEC, Lisboa.
- LNEC NP 143 (1969) – Solos. Determinação dos limites de consistência. LNEC, Lisboa.
- LO, K. W.; LEUNG, C. F.; HAYATA, K. & LEE, S. L. (1988) – Stability of excavated slopes in the weathered Jurong formation of Singapore. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol. 1, pp. 277-284.
- LOPES, J. L. & GONÇALVES, F. (1997) – Potencial económico das jazidas de rochas ornamentais na Zona de Ossa-Morena. In *Estudo sobre a Geologia da Zona de Ossa-Morena (Maciço Ibérico). Homenagem ao Prof. Francisco Gonçalves. A. Araújo e M. F. Pereira (Eds.), Univ. Évora*, pp. 263-282.
- LOPES, J. M. C. (1989) – Geoquímica de granitóides Hercínicos na Zona de Ossa-Morena: O Maciço de Santa Eulália. *Dissertação apresentada no âmbito de provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Univ. Évora*, Évora, 138 p.
- LOPES, J. M. C. & LOPES, L. (1996) – Caracterização ornamental do maciço granítico de Santa Eulália: I. Anel G0: Bordo Sudoeste. *Relatório interno*, I. G. M., Lisboa.
- LOPES, J. M. C.; LOPES, J. L. & LISBOA, J. V. (1997) – Caracterização petrográfica e estrutural dos granitos róseos do Complexo Plutónico de Monforte-Santa Eulália (NE -Alentejo, Portugal). *Est. Notas e Trabalhos, Inst. Geol. e Mineiro*, Tomo 39, pp. 141 –156.
- LOPES, J. M. C.; MUNHÁ, J. M. & OLIVEIRA, V. M. J. (1990) – Petrologia, geoquímica e especialização metalogenética do maciço granítico de Santa Eulália (Alentejo-NE, Portugal). *Resumos das comunicações, s / p, VIII Semana de Geoquímica*, Lisboa.
- LOPES, J. M. C.; MUNHÁ, J. M. ;WU, C. T. & OLIVEIRA, V. M. J. (1998) – O Complexo Plutónico de Monforte-Santa Eulália (Alentejo-NE, Portugal Central): caracterização geoquímica e considerações petrogenéticas. *Com. Inst. Geol. e Mineiro*, Tomo 83, pp. 127-142.
- LOTZE, F. (1945) – Zur Gliederung der Varisciden der Iberischen Meseta. *Geoteckt. Forsch.*, 6, pp. 78-92.

Referências bibliográficas

- LOUGHNAN, F. C. (1969) – Chemical weathering of the silicate minerals. Elsevier Publishing, Co., Amsterdam.
- LUMB, P. (1962) – The properties of decomposed granite. *Géotechnique*. 12: pp 226-243.
- LUMB, P. (1965) – The residual soils of Hong-Kong. *Géotechnique*. Vol. XV, 2, pp. 180-194.
- LUMB, P. (1975) – Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 8, pp. 31-65.
- LUMB, P. & LEE, C. F. (1975) – Clay mineralogy of Hong Kong soils. *Proc. of the 4th Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Kuala Lumpur, pp. 1.41-1.50.
- LUNNE, T.; POWELL, J. & ROBERTSON, P. (1995) – Use of piezocone tests in non-textbook materials. *Proc. Advances in Site Investigations Practice*, Thomas Telford, pp. 348-451.
- LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K. & POWELL, J. J. M. (1997) – Cone penetration testing in geotechnical practice. *Blackie Academic & Professional*, Chapman & Hall, London, 312 p.
- MACIEL, I. C. Q. (1991) – Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gneisse facoidal. *Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da PUC/RJ*, Rio de Janeiro.
- MACCARINI, M. (1980) – Ensaios triaxiais e de cizalhamento directo no solo residual gnaissico jovem do campo experimental da PUC/RJ, Gávea. *Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da PUC/RJ*, Rio de Janeiro.
- MACHADO, S. L. & VILAR, O.M. (1997) – Collapse strains and at rest lateral stresses under controlled suction on a lateritic soil. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Hamburg, vol.1, pp. 151-152.
- MALOMO, S. (1980) – Abrasive Ph of feldspars as an engineering index for weathered granite. *Bul. Int. Assoc. Engng. Geology*, 22, pp. 207-211.
- MARTIN, R. E. (1977) – Estimating foundations settlements in residual soils. *Journ. Geot. Eng. Div.*, 103, ASCE, pp. 197-212.
- MARTIN, R. E.; RAYMOND, A. & DeSTEPHEN, P. E. (1992) – Improvement of structured soils. A middle Atlantic perspective. *Proc. US/Brazil Geotechnical Workshop on Applicability of Classical Soil Mechanics to Structured Soils*. Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil, pp. 407-421.
- MARTIN, R. P. & HENCHER, S. R. (1986) – Principles for description and classification of weathered rocks for engineering purposes. In Hawkins A. B.(ed.), *Site Investigation Practice: Assessing BS5930*, Geological Society, Engineering Geology Special Publication, London, 2, pp. 299-308.
- MARTINS, A. A. A.; MADEIRA, M. V. & FURTADO, A. F. A. S. (1993) – Características e classificação de solos derivados de granitos consoante as condições climáticas (Portugal). *Actas del XII Congresso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Salamanca. Tomo II, pp. 1036-1044.
- MARTINS, F. F. & MARTINS, J. B. (1989) – Alguns resultados da prospecção geotécnica e considerações sobre a colheita da amostras inalteradas em solos residuais da região Norte. *Painel de prospecção geotécnica*, 23 Nov. 1989, Fac. de Ciências e Tecnologia, Univ. de Coimbra.
- MARTINS, F. F.; MARTINS, J. B. & ARAÚJO, P. A. M. (1995) – Characteristics of North Portuguese granitic residual soils. *Proc. XI ECSMFE*, Copenhagen, vol.1, pp. 179-182.
- MARTINS, F. F.; MARTINS, J. B.; VIEIRA, C. F. S. & VALENTE, B. D. S. S. (2001) – Probability of failure of slopes. Application to slopes of a granitic residual soil. *Proc. XV ICSMGE*, Istanbul, vol. 3, pp. 2143-2146.
- MARTONNE, E. (1953) – Panorama da Geografia. *Trad. dos tomos I e II do Traité de Géographie Physique* (1^a ed., 1925). Cosmos, Lisboa, 797 p.

- MASSEY, J. B.; IRFAN, T. Y. & CIPULLO, A. (1989) – The characterization of granitic saprolitic soils. *Proc. of the 12 th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng.*, Rio de Janeiro, vol. 6, pp. 533-542.
- MELLO, V. (1972) – Thoughts on soil engineering applicable to residual soils. *Proc. of the 3rd Southeast Asian Conf. on Soil Engng.*, Hong Kong.
- MENDES, F. (1967/1968) – Contribution à l'étude géochronologique par la méthode au strontium, des formations cristallines du Portugal. *Bol. do Museu e Lab. Min. e Geol. da Fac. de Ciências, Lisboa*, nº11.
- MEYERHOF, G. G. (1956) – Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 82, SM 1, pp. 1-19.
- MILLOT, G. (1970) – Géologie des argiles. Masson and Cie, Paris.
- MILLOT, G. & BONIFAS, M. (1955) – Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de lateritisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Cart. Geol. Als. Lorr.*, 8, pp 3-10.
- MINEIRO, A. J. C. (1994) – Avaliação do potencial de liquefação sísmica de solos. O risco de insucesso com métodos 'acreditados'. Os ensinamentos com a barragem de Al Wahda, em Marrocos. *Conferência Especial, 2º Encontro sobre sismologia e Engenharia Sísmica, Soc. Portuguesa de Estruturas*. FEUP, Porto.
- MIRANDA, A. M. (1984) – Comparação entre a evolução da alteração por via experimental e evolução da meteorização em perfis naturais. *Mem. e Not.*, nº 98, pp. 217-222.
- MIRANDA, A. M. (1985) – Algumas consequências geológicas e geotécnicas dos estudos de alteração das rochas. *Geotécnico*, nº 1, Lisboa, pp. 73-84.
- MIRANDA, A. M. (1986) – Contribuição para o conhecimento da evolução mineralógica e geoquímica da meteorização no maciço eruptivo de Sintra. *Est. Not. e Trab.*, D.G.G.M., t. 28, 3-86 p.
- MIRATA, T. (2001) – Total stress approach for shear strength of unsaturated soils. *Proc. 15 th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng.*, Istanbul, vol.1, pp. 607-608.
- MITCHELL, J. K. (1976) – Fundamentals of soil behaviour. Chichester: Wiley
- MITCHELL, J. K & SITAR, N. (1982) – Engineering properties of tropical residual soils. *Proc. of Conf. on Engng. and Construction in Tropical and Residual Soils*, Honolulu, ASCE, pp. 30-37. New York.
- MIURA, K. (1973) – Weathering in plutonic rocks (Part I) – Weathering during late Pliocene of Gotsu plutonic rocks. *Japan. Soc. Eng. Geol.*, 14 (3).
- MOITINHO DE ALMEIDA, I. M. B. (1991) – Características geotécnicas dos solos de Lisboa. *Tese de Doutoramento. Universidade de Lisboa*. 485p.
- MOORE, D. M. & REYNOLDS JR., R. C. (1989) – X – Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press. New York, 332p.
- MOREIRA, A. (1994) – Reconhecimento geológico, estrutural, petrográfico e geoquímico dos granitos de Alpalhão, Gafete e Quareleiros (Alto Alentejo). *Estudos, Notas e Trabalhos*, IGM, t. 36, pp. 103-117.
- MORIN, W. J. & AYETEY, J. (1971) – Formation and properties of red tropical soils. *Proc. 5 th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng.*, Luanda, Angola, 1, pp.45-53.
- MOYE, D. G. (1955) – Engineering geology for the Snowy Mountain scheme. *Journal of Institution of Engineers, Australia*, vol. 27, pp. 287-298.
- MUNDRY, E. (1968) – Ueber die Abkühlung magmatischer Körpers. *Geol. Jahrbuch*, vol. 85.
- NASCIMENTO, U. (1970) – O problema da alterabilidade das rochas em engenharia civil. *Memória nº 363*. LNEC. Lisboa.

Referências bibliográficas

- NEIVA, A. (1981) – Geochemistry of hybrid granitoid rocks and for their biotites from central Northern Portugal and their petrogenesis, *Lithos*, nº 14.
- NEIVA, A. (1983) – Geochemistry of granitic rocks and their micas from the West border of the Alvão Plateau, Northern Portugal. *Chemistry Erde*, nº 42.
- NEIVA, A. (1984) – Tin-bearing granitic rocks. *Memórias e Notícias*, nº 98, Museu e Lab. Min. e Geol., Coimbra.
- NEIVA, A. (1985) – Geoquímica da biotite de rochas plutónicas. *Memórias e Notícias*, nº 99, Museu e Lab. Min. e Geol., Coimbra.
- NEIVA, A. (1987) – Geochemistry of white micas from the Portuguese tin and tungsten deposits. *Chemical Geology*, nº 63, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- NEIVA, J. M. C. (1944) – A idade dos granitos portugueses. *Bol. da Soc. Geol. de Portugal*, vol. 3.
- NEIVA, J. M. C. & CASTRO, T. (1950) – O granito de S. Gens e o jazigo de caulino da Sr^a da Hora (Porto). *Mem. e Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, nº 28.
- NEIVA, J. M. C.; NEIVA, A. M. R. & GODINHO, M. M. (1965) – Meteorização do granito em clima temperado quente – alteração do granito de Pisões (Montalegre). *Mem. e Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 60, pp. 33-53.
- NESBITT, H. W. (1979) – Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, vol. 279, pp. 206-210.
- NESBITT, H. W. & YOUNG, G. M. (1982) – Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, vol. 299, pp. 715-717.
- NETTERBERG, F. (1994) – Keynote lecture: Engineering geology of pedocretes and other residual soils. *Proc. 7th Congress Int. Assoc. Engng. Geology*, Lisbon, vol. 5, pp. XIX-XXXVIII.
- NETTERBERG, F. & HAUPT, F. J. (1981) – Comparison of the TMH1 Casagrande cup and BS cone methods for determining the liquid limit of soils. *National Institute for Transport and Road Research, unpublished Technical Note TS/5/81*, Council for Scientific and Industrial Research, Pretória.
- NEWBERY, J. (1971) – Engineering geology in the investigation and construction of the Batang Padang hydroelectric scheme, Malaysia. *Quarterly Journal Engineering Geology*, vol. 3, pp. 151-181.
- NG, C. W. W.; PUN, W. K. & PANG, RICHARD, P. L. (2000) – Small Strain Stiffness of Natural granitic Saprolite in Hong Kong. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, vol. 126, nº 9, pp. 819-833.
- NICHOLS, T.C. (1980) – Rebound, its nature and effect on engineering works. *The Quarterly Journal Engineering Geology*, 13, pp. 133-152.
- NICHOLS, T.C. & ABEL, J. F. (1975) – Mobilised residual energy – a factor in rock deformation. *Bul. Assoc. Engineering Geologists*, 12, pp. 213-225.
- NIXON, I. K. (1988) – Introduction to papers 10-13. Penetration testing in U.K. . *Proc. Geot. Conf. Of Inst. Of Civil Engineers*, Birmingham, Thomas Telford, London, pp. 105-111
- NOVAIS FERREIRA, H. (1985) – Charaterisation, identification and classification of tropical laterite and saprolitic soils for geotechnical purposes. *Proc. of 1st Int. Conf. on Tropical Saprolitic and Lateritic Soils*, Brasilia. Relatório nº 76/85, NGR, LNEC, Lisboa, 33 p.
- NOVAIS FERREIRA, H. & NUNES, M. M. N. (1990) – Possibilidade de controlar a compactação de aterros pelo penetrómetro dinâmico ligeiro. *Informação Técnica, Vias de Comunicação*, ITVC5, LNEC, Lisboa.

- NOVAIS FERREIRA, H. & VIANA DA FONSECA, A. (1988) – Engineering properties of a saprolitic soil from granite. *Proc. of 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol. 1, pp. 181-188.
- OEN, I. (1958) – The geology, petrology and ore deposits of the Viseu region, Northern Portugal. *Comun. Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, nº 41.
- OEN, I. (1970) – Granite intrusion, folding and metamorphism Central Northern Portugal. *Bol. Geológico y Minero*, T. 81, 82, 83.
- OLIVEIRA, J.T.; OLIVEIRA, V. & PIÇARRA, J.M. (1991) – Traços gerais da evolução tectono-estratigráfica da zona de Ossa-Morena, em Portugal. *Cuadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña*, Vol. 16, pp. 221-250.
- OLIVEIRA, J.T.; RAMALHO, M.; ANTUNES, M. T. & MONTEIRO, J.H. (coord.) (1992a) – Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000, *Serv. Geol. Portugal*. Lisboa.
- OLIVEIRA, J.T.; PEREIRA, E.; PIÇARRA, J.M.; YOUNG, T. & ROMANO, M. (1992b) – O Paleozóico Inferior de Portugal: síntese da estratigrafia e da evolução paleogeográfica. In: *Gutiérrez-Marco, J.C.; Saavedra, J. & Rábano, I. (Eds.) - Paleozóico Inferior de Ibero- America, Universidad de Extremadura*, pp. 359-375.
- OLIVEIRA, V. M. J. (1975) – Cartografia inédita do granito de Santa Eulália (anéis G1, G2 e G3). *Serv. Fom. Min. Dir. Ger. Geol. Minas*, Portugal.
- OLLIER, C. D. (1984) – Weathering. Longman. London.
- OLLIER, C. D. (1991) – Ancient Landforms. Belhaven Press.
- OLSON, R. E. & DANIEL, D. E. (1981) – Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. *Permeability and Groundwater Contaminant Transport*, ASTM STP746, pp. 18-64.
- ONODERA, T. F.; YOSHINAKA, R. & ODA, M. (1974) – Weathering and its relation to mechanical properties of granite. *Proc. III rd Int. Cong. Rock Mechanics*, Denver, Co, vol. II (A), pp. 71-78.
- O'Rourke, J. E.; ESSEX, R. J. & RANSON, B. K. (1977) – Field permeability test methods with applications to solution mining. *Report N° PB-272452*, US Dept. of Commerce, National Technical Information Service.
- PAIS, L. J. A. (1998) – Comportamento mecânico de um solo residual granítico da Covilhã. *Tese de Mestrado*. Universidade de Coimbra. Coimbra. 234 p.
- PAIS, L. J. A. (2000) – Zonas idealizadas no espaço de tensões do comportamento mecânico para o solo residual granítico da Covilhã. *Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto. Vol. 1, pp. 273-278.
- PALÁCIOS, T. (1976) – Contribuição para o conhecimento petrográfico do maciço granítico de Fronteira e comparação com os de Ervedal e Santa Eulália (Nordeste alentejano). *Comunic. Serv. Geol. Portugal*, LX, Lisboa, pp. 239-260.
- PALMER, D. J. & STUART, J. G. (1957) – Some observations on the standard penetration test and the correlation of the test in situ with a new penetrometer. *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engng.*, London, vol. 1, pp. 231-236.
- PARKER, A. (1970) – An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Mag.*, vol. 107, pp. 501-504.
- PASTORE, E. L. & CRUZ, P. T. (1993) – Resistência ao cisalhamento de maciços de solos saprolíticos. *Publicação IPT 2052*.
- PASTORE, E. L.; CRUZ, P. T. & CAMPOS, J. O. (1994) - Engineering geology of the saprolite soils in tropical climates. *Proc. 7th Congress Int. Assoc. Engng. Geology*, Lisbon, vol. 5, pp. 3479-3488.
- PAVLAKIS, M. (1983) – Prediction of foundation behaviour in residual soils from pressuremeter tests. *PhD Thesis, Witwatersrand University*, Johannesburg.

Referências bibliográficas

- PECK, R. B.; HANSON, W. E. & THORNBURN, T. H. (1974) – Foundation Engineering, J. Wiley & Sons, N. York.
- PEDRO, G. (1959) – Considérations sur une forme d'altération des roches: l'arenisation. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t.248, pp. 993-996.
- PEDRO, G. (1964a) – Contribution à l'étude expérimentale de la altération géochimique des roches cristallines. *PhD thèse. Univ. Paris*. Paris. 344 p.
- PEDRO, G. (1964b) - Principes géochimiques de la pédogenèse – incidences minéralogiques. *C.R. VIII Com. Int. or la Sci. du Sol.*, pp. 1087-1094.
- PEDRO, G. (1966) – Sur l'évolution chimique des roches dans les conditions superficielles. *91º Cong. Soc. Savantes*, t. II, pp. 129-131.
- PEDRO, G. (1968) – Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. *Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn.*, (2), vol.X, pp. 457-470.
- PEDRO, G. (1993) – Argiles des altérations et des sols. *Colloque Sédimentologie et Géochimie de la surface à la mémoire de Georges Millot*, Paris, pp. 1-17.
- PERDIGÃO, J. C. (1971) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 41-A, Monsaraz, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 16 p.
- PERDIGÃO, J. C. (1980) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 41-C, Mourão, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 17 p.
- PERDIGÃO, J. C. & FERNANDES, A. P. (1976) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 29-C, Marvão, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 18 p.
- PEREIRA, E. (1987) – Estudo geológico-estrutural da região de Celorico de Basto e sua interpretação geodinâmica. Serv. Geol. de Portugal, Lisboa.
- PEREIRA, L. G. (1991) – Mobilização “in situ” do granito arenizado de Figueiró dos vinhos em camadas da base do Ordovícico. *III Congresso Nacional de Geologia, Resumos*. Coimbra.
- PEREIRA, L. G.; CAMPOS, A. B. A.; RIBEIRO, M.L.; SOLÁ, A. R. & MOREIRA, M. (1998) – Modelo tectónico da implantação do Complexo Eruptivo de Nisa (Alto Alentejo – Portugal). *Actas do V Cong. Nac. Geol., Inst. Geológico e Mineiro*, Lisboa, Tomo 84, Fasc. 1, pp. B-11– B-14.
- PEREIRA, J. H. F. & FREDLUND, D. G. (2000) – Volume change behaviour of collapsible compacted gneiss soil. *Journ. Geotech. Geoenvironmental Engng.*, vol.126, nº 10, pp. 907-916.
- PEREIRA, L. C. J.; WAERENBORGH, J. C.; GOUVEIA, M. A.; PRUDÊNCIO, M. I.; FIGUEIREDO, M. O.; MORGADO, I.; SILVA, T. P. & LOPES, A. (1993) – A comparative study of biotite weathering from two different granitic rocks. *Chemical Geology*, vol.107, pp. 301-306.
- PEREIRA, M. F. C. C. (1999) – Caracterização da Estrutura dos Domínios Setentrionais da Zona de Ossa-Morena e seu Limite com a Zona Centro-Ibérica, no Nordeste Alentejano. *Tese de Doutoramento. Dep. de Geociências, Univ. Évora*, Évora. 115 p.
- PEREIRA, M. F. C. C. & SILVA, J. B. (1995) – Characterization of the ductile variscan deformation within the Ossa-Morena Zone (OMZ) – Central Iberian Autochthonous (CIA) transition zone (NE Alentejo-Portugal). *In Comunications XIII RGOP, M.D. Rodriguez Alonso y J. C. Gonzalo Curral (Eds.)*, Univ. Salamanca, Salamanca, pp. 135-139.
- PEREIRA, M. F. C. C. & SILVA, J. B. (1997) – A estrutura nos domínios setentrionais da Zona de Ossa-Morena: a Faixa Blastomilonítica e a zona de transição com o Autóctone Centro Ibérico (Nordeste Alentejano-Portugal). *In Estudo sobre a Geologia da Zona de Ossa-Morena (Maciço Ibérico). Homenagem ao Prof. Francisco Gonçalves. A. Araújo e M. F. Pereira (Eds.)*, Univ. Évora, pp. 183-204.

- PINGS, W. B. (1968) – Bacterial leaching. *Mineral Industries Bulletin*, Colorado School of Mines 2 (3), 19 p.
- PINHO, A. B. (1993) – Correlações entre parâmetros índice e propriedades geotécnicas de solos argilosos. *Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL*. Lisboa. 191 p.
- PINTO, M. (1979) – Geochemistry and geochronology of granitic rocks from the Aveiro and Viseu districts, Northern Portugal. *Tese de Doutoramento. Universidade de Leeds*, Leeds.
- PINTO, M. (1983) – Geochronology of Portuguese granitoids: a contribution. *Studia Geologica Salmanticensia*, vol. 18.
- PINTO, M. S.; CASQUET, C.; IBARROLA, E.; CORRETGÉ, L. G. & FERREIRA, M. P. (1987) – Síntese geocronológica dos Granitóides do Maciço Hespérico. In *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico. Livro Homenagem L. C. García de Figueiroa, F. Bea, A. Carnicero, J. C. Gonzalo; M. López Plaza & M. D. Rodríguez Alonso (Eds.)*, Univ. Salamanca, pp. 69-86.
- PITCHER, W. (1979) – Comments on the geological environments of granites. Origin of the granite batholiths. In *M. P. Atherton and J. Tarney (eds.) Geochimical evidence*, vol. 1, nº 8, Shiva Publishing Ltd.
- POLYNOV, B. (1937) – The cycle of weathering. Murby, London, 220 p.
- POULOS, H. G. & BROWN, P.T. (1986) – Problems in determination of design parameters from in situ methods. *Research Report nº R533*, Univ. of Sidney, School of Civil and Mining Engineering, Sidney.
- PREGL, O. (1987) – Natural lining materials. *Int. Symp. On Process, Technology and Environmental Impact of Sanitary Landfills*. Cagliari, Italy, II (paper XXVI), pp. 1-7.
- PRICE, D. G. (1995) – Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal Engineering Geology*, 28, pp. 243-252.
- PRIEM, H.; BOELROK, N.; VERSCHURE, R.; HEBEDA, E. & VERDURMEN, E. (1970) – Dating events of plutonism through the Paleozoic of the Western Iberian Peninsula. *Eclog. Geol. Helvet*, nº 63-1.
- PRIEM, H. & DEN TEX, E. (1982) – Tracing crustal evolution in the N. W. Iberian Peninsula through Rb-Sr and U-Pb Systematics of Paleozoic granitoids – a review. *Int. Colloq. On Géochimie et petrologie de granitoids*, vol. Abstr., Clermont – Ferrand.
- PUN, W. K. & HO, K. K. S. (1996) – Analysis of triaxial tests on granitic saprolite performed at Public Works Central Laboratory. *Discussion Note DN 4/96. Geotechnical Engineering Office*, Hong Kong Government of the Special Administrative Region, Hong Kong.
- PUPPALA, A. J.; ACAR, Y. B. & TUMAY, M.T. (1995) – Cone penetration in very weakly cemented sand. *J. Geotech. Engng.*, ASCE, 121(8), pp. 589-600.
- PUPPALA, A. J.; ARSLAN, S.; TUMAY, M. T. & ACAR, Y. B. (1998) – Cone penetration testing in cemented soils: comparisons between field and laboratory chamber test results. *Geotechnical Site Characterization. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 1139-1145.
- QUESADA, C., APALATEGUI, O., EGUILUZ, L., LIÑAN, E. & PALACIOS, T. (1990) - Ossa Morena Zone. Stratigraphy. Pre-Cambrian In: *Dallmeyer, R.D. & Martínez García E. (Eds.)*, *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer-Verlag , pp. 252-258.
- RAD, N. S. & CLOUGH, G. W. (1982) – The influence of cementation on the static and dynamic behavior of sands. *Rep. N° 59, Stanford University*, Stanford, California, USA.
- RAGUIN, E. (1957) – Géologie de Granite. Masson et Cie, Paris, 275 p.
- RAJ, J. K. (1985) – Characterization of the weathering profile developed over a porphyritic biotite granite in Peninsular Malaysia. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 32, pp. 121-129.

Referências bibliográficas

- RAYMAHASHAY, B. C. & SHARMA, S. (1993) – Decay of building stones: a mineralogical model for Konark Sun Temple, India. *Quarterly Journal Engineering Geology*, 26, pp. 155-157.
- REICHE, P. (1943) – Graphic representation of chemical weathering. *J. Geol. Petrol.*, 13, pp. 58-68.
- REICHE, P. (1950) – A survey of weathering processes and products. *Univ. of New Mexico, Publi. Geol.*, nº 3, Albuquerque, New Mexico, 95 p.
- REIS, R. M. M. & GONÇALVES, M. Z. (1987) – Caracterização climática da região agrícola do Alentejo. *O Clima de Portugal*, Fasc. XXXIV, INMG.
- RIBEIRO, A. (1974) – Contribution à l'étude tectonique de Trás-os-Montes oriental. *Mem. Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa, nº 24.
- RIBEIRO, A. (1984) – Evolução geodinâmica da Zona Centro-Ibérica. *Assoc. Port. de Geólogos, Geonovas*, nº 7.
- RIBEIRO, A.; ANTUNES, M. T.; FERREIRA, M. P.; ROCHA, R. B.; SOARES, A. F.; ZBYSZEWSKI, G.; MOITINHO DE ALMEIDA, F.; CARVALHO, D. & MONTEIRO, J. H. (1979) – Introduction à la Géologie Général du Portugal, *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 114 pp.
- RIBEIRO, M. (1983) – Considerações sobre a génese dos diferentes granitos da região de Tourém – Montalegre – Gerês. *Com. Serv. Geol. de Portugal*, Tomo 69, fasc. 1.
- RIBEIRO, M. L.; MATA, J. & MUNHÁ, J. (1992) – Magmatismo do Paleozóico Inferior em Portugal. In: *Gutiérrez-Marco, J.C.; Saavedra, J. & Rábano, I. (Eds.) - Paleozóico Inferior de Ibero-America, Universidad de Extremadura*, pp. 377-395.
- RIBEIRO, M. L.; MOREIRA, A.; MOREIRA, M. E.; MOREIRA, M.; FERREIRA, P. & TORRES, L. (1995) – Geoquímica das fácies internas do complexo eruptivo de Nisa (NE Alentejo). *IV Cong. Nac. Geol., Fac. Ciencias Univ. Porto, Mus. Lab. Min. Geol.*, Porto, Mem. nº 4, pp. 801-804.
- RIBEIRO, O.; TEIXEIRA, C.; CARVALHO, H.; PERES, A. & FERNANDES, A. P. (1965) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 28-B, Nisa, Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 29 p.
- RIBEIRO, O.; LAUTENSACH, H. & DAVEAU, S. (1988) – Geografia de Portugal. O ritmo climático e a paisagem. Edições João Sá da Costa Lda. , Lisboa, Vol. 2, 623 p.
- RIBEIRO, O.; LAUTENSACH, H. & DAVEAU, S. (1991) – Geografia de Portugal. A posição geográfica e o território. (2^a ed.), Edições João Sá da Costa Lda. , Lisboa, Vol. 1, 334 p.
- RIGGS, C. O. (1986) – American Standard Penetration Test Practice, *14th PSC*, ASCE, pp. 949-967.
- RIGHI, D. & MEUNIER, A. (1995) - Origin of clays by rock weathering and soil formation In: *Velde, B. (Ed.) - Origin and Mineralogy of Clays. Clays and the Environment*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 43-161.
- ROBERT, M. (1966) – Sur la nature des phénomènes de désagrégation, d'arénisation et d'altération chimique: études expérimentales. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 262, série D, pp. 1519-1522.
- ROBERTSON, P. K. (1990) – Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotech. J.*, vol. 27, pp. 151-158.
- ROBERTSON, P. K. & CAMPANELLA, R. G. (1983) – Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand. "Part II : Clay". *Canadian Geot. J.*, vol. 20, nº 4, pp. 718-745.
- ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. & WIGHTMAN, A. (1983) – SPT – CPT correlations. *J. Geotech. Engng. Div.* , ASCE, vol. 109, nº 11, pp. 1449-1459.

- ROBERTSON, P. K. & MAYNE, P. W. (1998) – Geotechnical Site Characterization. *P. K. Robertson & P. K. Mayne (Editors). Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, USA, Balkema, vol.2, pp. 721-1471.
- ROCHA, M. (1981) – Mecânica das Rochas. LNEC. Lisboa. 445 p.
- ROCHA FILHO, P. (1989) – Aspectos geotécnicos de solos saprolíticos de gnaisse visando fundações. *Proc. II Colóquio de solos Tropicais e Subtropicais e suas Aplicações em Engenharia Civil*, Porto Alegre, RS, Brasil, pp. 173-200.
- ROCHA FILHO, P. (1991) – Ensaios in situ em solo residual. *SEFE II, Anais do 2º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais*, São Paulo, vol. 2, pp. 147-165.
- ROCHA FILHO, P.; ANTUNES, F. S. & FALCÃO, M. F. G. (1985) – Qualitative influences of the weathering degree upon the mechanical properties of an young gneissic residual soil. *Proc. 1st Int. Conf. on Geomech. in Tropical Laterites and Saprolitic Soils*, Brasilia, vol. 1, pp. 281-294.
- ROCHA FILHO, P. & CARVALHO, J. B. Q. (1988) – General report: Building foundation in tropical lateritic and saprolitic soils. *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomech. in Tropical Soils*, Singapore. Vol. 2, pp. 587-601.
- RODRIGUES, C. M. G. & LEMOS, L. J. L. (2002a) – A amostragem de saprolitos graníticos da Guarda com amostrador de tubo aberto; avaliação da qualidade. *Actas do 8º Cong. Nacional de Geotecnica*. Lisboa. Vol. 1, pp. 15-24.
- RODRIGUES, C. M. G.; CRUZ, N. & LEMOS, L. J. L. (2002b) – Caracterização geotécnica de um solo residual granítico: correlação paramétrica. *Actas do 8º Cong. Nacional de Geotecnica*. Lisboa. Vol. 1, pp. 155-164.
- RODRIGUES, C. M. G. & SOUSA, L. M. O. (2002c) – Influência da composição química e mineralógica no comportamento do saprolito granítico da Guarda. *Actas do 8º Cong. Nacional de Geotecnica*. Lisboa. Vol. 1, pp. 321-330.
- RUDDOCK, E. C. (1967) – Residual soils of the Kumasi district in Ghana. *Géotechnique*, vol.17, nº 4, pp. 359-377.
- RUXTON, B. P. (1968) – Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journ. Geology*, 76. pp. 518-527.
- RUXTON, B. P. (1980) – Slope problems in Hong Kong – a geological appraisal. *Hong Kong Engineer*, 8, nº6, pp. 31-39.
- RUXTON, B. P. & BERRY, L. (1957) – Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Bulletin of Geological Society of America*, 68, pp.1263-1292.
- SABBAGH, A. (1997) – The volume change of unsaturated soils. . *Proc. 14 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. ,Hamb. Proc. 14 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. ,* Hamburg, vol. 1, pp.193-196.
- SAIKI, K. (1983) – Methods of analysis for correcting the standard penetration resistance measured in normally consolidated clays. *In Balasubramanian, A. S.; Chandra, S. & Bergado, D. T. (ed.), Recent developments in laboratory and field tests and analysis of geotechnical problems*. Balkema, Rotterdam, pp. 375-380.
- SALAS, J. A. J.; ALPAÑES, J. L. J. & GONZALEZ, A. A. S. (1976) – Geotecnia y cimientos, Propiedades de los suelos y de las rocas. vol. 1, Ed. Rueda, Madrid.
- SANDRONI, S. S. (1985) – Sampling and testing of residual soils in Brazil. *Sampling and Testing of Residual Soils – a Review of International Practice. ISSMFE Technical Committee on Sampling and Testing of Residual Soils*, ISSMFE, pp. 31-50.
- SANGERAT, G. (1972) – The penetrometer and soil exploration. Elsevier Publishing Co., Amsterdam.

Referências bibliográficas

- SANTOS, L. (1995) – Estudo de um Perfil de Alteração do Granito do Porto. *Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, Lisboa.* 167 p.
- SANTOS NETO, P. M. & ALMEIDA, M. S. S. (1995) – Pore pressure parameter in unsaturated soil. *Proc. 11th European Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Copenhagen, vol. 3, pp. 3.225-3.230.
- SAMPSON, L. R. (1983) – Investigation into the use of a cone penetration method for determination of the plastic and liquid limits of South African soils. *National Research, Research Report RS/5/83, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria.*
- SARAZIN, G. ; FOUILLAC, C. & MICHARD, G. (1976) – Étude de l'altération des roches granitiques sous climat tempéré. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 40, pp. 1481-1486.
- SCHERMERHORN, L. (1956) – Igneous, metamorphic and ore geology of the Castro Daire – S. Pedro do Sul – Satão region. *Comun. dos Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa.
- SCHMERTMANN, J. H. (1970) – Static cone to compute static settlement over sand. *ASCE, J. Soil Mech. Found. Div.*, 96, SM 3, pp. 1011-1043.
- SCHMERTMANN, J. H. (1971) – The importance of side friction and lateral stress to the SPT value. *4th PanAmerican Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, vol. 3, Puerto Rico.
- SCHMERTMANN, J. H. (1978) – Use of the SPT to measure dynamic soil properties ? – Yes, but...! *Dynamic Geotech. Testing*, Denver, ASTM, SPT 654, pp. 341-355.
- SCHMERTMANN, J. H. (1979) – Statistic of SPT. *ASCE, J. Geotech. Engng. Div.*, 105, GT5, pp. 655-670.
- SCHMIDT, W. E. (1967) – Field determination of permeability by the infiltration test. *Permeability and capillarity of soils*. ASTM STP 417, pp. 142-158.
- SCHNAID, F. (1997) – Panel discussion: Evaluation of in situ tests in cohesive frictional soils. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Hamburg, vol. 4, pp. 2189-2190.
- SCHNAID, F. & CONSOLI, N. C. (1996) – Discussion on cone penetration in very weakly cemented sand. *J. Geotech. Engng.*, ASCE, 122(11), pp. 948-958.
- SCHNAID, F.; CONSOLI, N. C. & AVERBECK, J. H. (1998) – Aspects of cone penetration in natural weakly-cemented deposits. *Geotechnical Site Characterization. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 1159-1163.
- SEARLE, I. W. (1979) – The interpretation of Begemann friction jacket cone results to give types and design parameters. *Proc. 7th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, vol. 2, pp. 265-270.
- SEED (1985) – Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *J. Geotech. Engng. Div.*, ASCE, vol. 111, nº 12, pp. 1425-1445.
- SELBY, M. J. (1993) – Hillslope materials and processes. Oxford. University Press.
- SENNESET, K.; JANBU, N. & SVANI, G. (1982) – Strength and deformation parameters from cone penetration tests. *Proc. 2nd Eur. Symp. on Penetration Testing*, A. A. Balkema, The Netherlands, pp. 24-27.
- SEQUEIRA BRAGA, M. A. (1985) – Gibsite em estruturas filonianas e em perfis de meteorização de rochas graníticas do Minho. *Bol. Soc. Geol. Portugal*, vol. XXIV, Lisboa, pp. 7-16.
- SEQUEIRA BRAGA, M. A. (1988) – Arenas e depósitos associados da bacia de drenagem do rio Cavado (Portugal) – contribuição para o estudo da arenização. *Tese de Doutoramento. Universidade do Minho*. Braga. 325 p.

SEQUEIRA BRAGA, M. A. & PAQUET, H. (1987) – Gibbsite as a biotite weathering product in a granitic saprolite from Cávado river basin, Northwest Portugal. *Proc. Int. Meeting Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation*. Granada. 1986. CSIC, Madrid, pp. 175-186.

SEQUEIRA BRAGA, M. A.; LOPES NUNES, J. E.; PAQUET, H. & MILLOT, G. (1989) – Essai sur les arènes de l'Europe atlantique. Zonalité climatique. Place de l'arénisation parmi les grands systèmes mondiaux d'altération météorique. *C.R. Académie Sciences de Paris*, T. 309, Série II, pp. 1955-1962.

SEQUEIRA BRAGA, M. A.; LOPES NUNES, J. E.; PAQUET, H. & MILLOT, G. (1990) – Climatic zonality of coarse granitic saprolites (“arènes”) in Atlantic Europe from Scandinavia to Portugal. *IXth Int. Clay Conference Strasbourg, 1989, Sciences Géologiques*, 85, Strasbourg, pp. 99-108.

SEQUEIRA BRAGA, M. A.; ALVES, A. & BEGONHA, A. (1993) – Meteorização do granito do Porto e degradação do edifício do Hospital de Santo António: monumento histórico construído com materiais graníticos. *Proc. Workshop Alteración de Granitos y rocas afines, empleados como materiales de construcción 1991*, CSIC, Madrid, pp. 153-154.

SEROTA, S. & LOWTHER, G. (1973) – SPT practice meets critical review. *Ground Engineering* 6(1), pp. 20-22.

SERRANO, L. (1979) – A alteração do granito de Moldes (Arouca). *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Cien. Lisboa*, 16, pp 273-283.

SHELTON, J. C. & COOPER, A. J. (1984) – The shear strength of decomposed granite from Glenealy area. *Technical Note TN 1/84, Geotechnical Control Office*, Hong Kong Government, Hong Kong.

SHORT, N. M. (1961) – Geochemical variations in four residual soils. *J. Geology*, 69, pp. 534-571.

SILVA, J. A. H. (1974) – Residual soils from granite. Subsidy to their geologic-geotechnical knowledge. *Publication nº 195. L. N. E. A. , Luanda. Angola*.

SILVA, J. B. (1989) – Estrutura de uma geotransversal da Faixa Piritosa: zona do vale do Guadiana. *Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências Univ. Lisboa*, Lisboa. 450 p.

SILVA, J. B. (1997) – Geodinâmica ante-Mesozóica do sector Oeste da Zona de Ossa-Morena e regiões limitrofes: síntese com base em recentes observações. *In Estudo sobre a Geologia da Zona de Ossa-Morena (Maciço Ibérico). Homenagem ao Prof. Francisco Gonçalves. A. Araújo e M. F. Pereira (Eds.), Univ. Évora. Évora*. pp. 231-262.

SILVA, J. M. V. (1980) – Ocorrência de vermiculite – Al e gibsite em solos de granitos do noroeste de Portugal. Génese destes minerais. *Comun. Serv. Geol. Portugal*, 66, pp. 71-77.

SILVA, J. M. V. (1982) – Meteorização de uma rocha granítica da região de Portalegre. Génese dos minerais da argila. *Bol. Soc. Geol. Portugal*, 22, pp. 71-78.

SILVA, J. M. V. (1983) – Estudo mineralógico da argila e do limo dos solos derivados de granitos e de rochas básicas da região de Trás-os-Montes. *Garcia de Orta, Estudos Agron.*, 10, pp. 27-36.

SILVA, J. M. V. (1990) – Mecanismos de Alteração em Rochas Eruptivas do Baixo Alentejo. *Tese de Doutoramento. Fac. Ciências da Univ. Clássica de Lisboa*, Lisboa. 240 p.

SILVEIRA, A. B. (1990) – Neotectónica e Sismotectónica da região Vidigueira – Moura. *Tese apresentada como tema de dissertação no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, equivalentes a Mestrado. Dep. de Geologia F.C.U.L*, Lisboa, 314 p.

SIMONS, N. E. & MENZIES, B. K. (1977) – Introdução à engenharia de fundações. Interciência Lda., Rio de Janeiro, 199p.

SLUIJK, D. (1963) – Geology and tin-tungsten deposits of the Regoufe area, Northern Portugal. *Tese de Doutoramento. Universidade de Amsterdam*, Amesterdam.

- SKEMPTON, A. W. (1986) – Standard penetration tes procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Géotechnique*, nº 36, pp. 425-437.
- SMITH, B. A.; CLEMENCE, S. P. & DOH, D. H. (1994) – Engineering properties of crushable/collapsible granitic soil. . *Proc. 13 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.* ,New Delhi, vol.1, pp. 252-254.
- SOLÁ, A. R.; RIBEIRO, M. L.; MOREIRA, M. E. & MOREIRA, M. (1998) – Complexo Eruptivo de Nisa – cartografia geoquímica e mecanismo de implantação. *Actas do V Cong. Nac. Geol., Inst. Geológico e Mineiro*, Lisboa, Tomo 84, Fasc. 1, pp. B-39 – B-42.
- SOWERS, G. F. (1963) – Engineering properties of residual soils derived from igneous and metamorphic rocks. *Proc. 2nd Pan. Am. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Brasil, vol. I, pp. 39-61.
- STAPLEDON, D. H. (1976) – Geological hazards and water storage. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 14, pp.249-262.
- STRAKHOV, N. M. (1967) – The principles of lithogenesis. Vol.1, Edinburgh. Oliver and Boyd
- STRECKEISEN, A. (1967) – Classification and nomenclature of igneous rocks. *Neues Jahrb, Mineral Abhandl*, nº 107.
- STROUD, M. A. (1974) – The Standard Penetration Test in insensitive clays and soft rocks. *Proc. Eur. Symp. on Penetration Testing (ESOPT)*, Stockholm, 2(2), pp. 367-375.
- STROUD, M. A. (1988) – The Standard Penetration Test – its application and interpretation. *Penetration Testing in U. K., Proc. of the Geot. Conf. Inst. of Civil Engineers*, Birmingham, Thomas Telford, London, pp. 24-49.
- SUEOKA, T. (1988) – Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index. *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomech. in Tropical Soils*, Singapore, 1, pp. 55-62.
- TARDY, Y. (1968) – Une méthode de détermination des types d'altération actuels, par l'étude des eaux en pays granitiques et gneissiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 267, pp. 579-582.
- TARDY, Y. (1969) – Géochimie des altérations: étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte Geol. Alsace et Lorraine*, vol. 31, pp 1-199.
- TEIXEIRA, C. (1945) – Alguns aspectos da geologia dos granitos do Norte de Portugal. *Publ. da Soc. Geol. de Portugal*, Porto.
- TEIXEIRA, C. (1978) – Acerca da idade das rochas graníticas portuguesas. *Bol. da Soc. Geol. de Portugal*, nº 20, Lisboa.
- TEIXEIRA, C. (1981) – Geologia de Portugal. Vol. 1 – Precâmbrico, Paleozóico. *Fundação C. Gulbenkian*, Lisboa, 629 p.
- TEIXEIRA, C. & GONÇALVES, F. (1980) – Introdução à Geologia de Portugal. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 475 p.
- TEIXEIRA DUARTE, P. (1986) – Alguns casos de obras de fundações em granitos decompostos da região do Porto. *Painel sobre o Ensino e o Exercício da Geotecnica na Engenharia*. Ordem dos Engenheiros, Porto.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1967) – Soil mechanics in engineering practice. (2nd edition), J. Wiley & Sons, N. York, 729p.
- THÉNOZ, B.; PERAMI, R. & CAPDECOMME, L. (1967) – Sur l'arénisation et l'altération en boules des granites. *Act. Soc. Linnéene de Bordeaux*, vol. Sp. AFAS.
- TOWNSEND, F. C. (1985) – Geotechnical characteristics of residual soils. *Journal of Geotechnical Engng.* , vol. 111, nº1, pp. 77-94.

- UEHARA, G. (1982) – Soil Science for the tropics. Engineering and construction in tropical and residual soils. *ASCE Geotech. Div. Spec. Conf.*, Honolulu, Hawaii, pp. 13-26.
- UTO, K. & FUYUKI, M. (1981) – Present state and future trend of penetration testing in Japan. *Japanese Soc. Soil Mech. Found. Engng.*, 14 p.
- VARGAS, M. (1953) – Some engineering properties of residual clay soils occurring in southern Brazil. *Proc. of 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng.*, Zurich, 1, pp. 259-268.
- VARGAS, M. (1970) – Origin, properties and nature of undisturbed residual soils. *Pub. 2/70, COPPE/UFRJ* (in Portuguese).
- VARGAS, M. (1971) – Geotécnica dos solos residuais. *Revista Latino-Americana de Geotecnia*, nº 1, pp.20-41.
- VARGAS, M. (1974) – Engineering properties of residual soils from South-Central Region of Brazil. *Proc. 2nd Congress Int. Assoc. Engng. Geology*, São Paulo, vol. 1, pp. 5.1-5.26.
- VARGAS, M. (1992) – Identification and Classification of Tropical Soils. *Proc. US/Brazil Geotechnical Workshop on Applicability of Classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils*, Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil, pp. 200-205.
- VARGAS, M. (1988) – Characterization, identification and classification of tropical soils. *Proceedings of the Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol.1, pp. 71-75.
- VAUGHAN, P. R. (1985) – Mechanical and hydraulic properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particularly as related to their strength and mineral components. *Proc. 1st Int. Conf. on Geomech. in Tropical Laterites and Saprolitic Soils*, Brasilia, 3, pp. 231-262.
- VAUGHAN, P. R. (1988) – Characterising the mechanical properties of in-situ residual soil. *Proceedings of the Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, 2, pp. 469-487.
- VAUGHAN, P. R. & KWAN, C. W. (1984) – Weathering, structure and in situ stress in residual soils. *Géotechnique*, 34, nº1, pp. 43-59.
- VAUGHAN, P. R.; MACCARINI, M. & MOKHTAR, S. M. (1988) – Indexing the engineering properties of residual soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21, pp. 69-84.
- VELLOSO, P. P. C. (1981) – Geotechnical aspects of bored piles. *Proc. Inst. of Engineers*, Rio de Janeiro.
- VIANA DA FONSECA, A. (1988) – Caracterização Geotécnica de um Solo Residual do Granito da Região do Porto. *Tese de Mestrado. Universidade do Porto*. Relatório 130/88, NGR, LNEC, Lisboa, 422p.
- VIANA DA FONSECA, A. (1991) – A influência das estruturas cimentadas na evolução dos parâmetros geotécnicos dos solos do tipo residual. *Actas do 4º Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa, SPG. Vol. 3, pp. 195-204.
- VIANA DA FONSECA, A. (1993) – Correlating in situ parameters from different testing procedures in Oporto residual soil from granite. *Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Proc. Int. Symp. of Hard Soils – Soft Rocks*, Athens. Anagnastopoulos et al. (ed). Balkema. Vol. 1, pp. 841-848.
- VIANA DA FONSECA, A. (1996) – Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas. *Tese de Doutoramento. Universidade do Porto*. Porto. 774 p.
- VIANA DA FONSECA, A. (1998) – Identifying the reserve of strength and stiffness characteristics due to cemented structure of a saprolitic soil from granite. *Proc. 2nd Int. Symp. on Hard Soils – Soft Rocks*. Naples. Italy. Vol. 1, pp. 361-372.
- VIANA DA FONSECA, A. (2000a) – Ensaios em laboratório para avaliação da resistência ao corte de um solo residual de granito. Ensaios de corte directo. *Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto. Vol. 1, pp. 409-422.

VIANA DA FONSECA, A. (2000b) - Ensaios em laboratório para avaliação da resistência ao corte de um solo residual de granito. Ensaios triaxiais convencionais. *Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto. Vol. 1, pp. 423-436.

VIANA DA FONSECA, A. (2000c) - Ensaios em laboratório para avaliação da resistência ao corte de um solo residual de granito. Ensaios triaxiais não convencionais. *Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto. Vol. 1, pp. 437-450.

VIANA DA FONSECA, A.; MATOS FERNANDES, M.; CARDOSO, A.S.; BARREIROS MARTINS, J. (1994) – Portuguese experience on geotechnical characterisation of residual soils from granite. *Proc. XIII ICSMFE*, New Dehli, Índia. Balkema. Vol. 1, pp. 377-380.

VIANA DA FONSECA, A.; FERNANDES, M. M.; CARDOSO, A.S. (1997) – Interpretation of a footing load test on a saprolitic soil from granite. *Géotechnique*, Vol. 47, 3, pp. 633-651.

VIANA DA FONSECA, A.; FERNANDES, M. M.; CARDOSO, A.S. (1998) – Characterization of a saprolitic soil from Porto granite by in situ testing. *Proc. of 1st Int. Conf. on Site Characterization – ISC'98*, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 1381-1387.

VIANA DA FONSECA, A. & ALMEIDA E SOUSA, J. (2001) – At rest coefficient of earth pressure in saprolitic soils from granite. *Proc. XV ICSMGE*, Istanbul. Vol. 1, 1.2, pp. 397-400.

VOGEL, D. E. (1975) - Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, South-Central Quebec. *Canadian Journal Earth Science*. 12, pp. 2080-2085.

WAKATSUKI, T.; FURIKAWA, H. & KYUMA, K. (1977) – Geochemical study of the redistribution of elements in soils: I – Evaluation of degree of weathering of transported soil materials by distribution of major elements among the particle size fractions and soil extracts. *Geoch. et Cosmochim. Acta*, 41, pp. 891-902.

WASTI, Y. & BEZIRCI, M. H. (1986) – Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test. *Can. Geotech. J.*, vol. 23, pp. 241-246.

WEINERT, H. H. (1964) – Basic igneous rocks in road foundations, *C.S.I.R. Research Report 218*, CSIR, Pretoria, South Africa.

WEINERT, H. H. (1974) – A climatic index of weathering and its application in road construction. *Géotechnique* 24 (4), pp. 475-488.

WESLEY, L. D. (1988) – Engineering classification of residual soils. *Proc. 2nd Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol.1, pp. 77-84.

WESLEY, L. D. (1994) – The use of consolidometer tests to estimate settlement in residual soils. *Proc. XIII ICSMFE*, New Dehli, India. A. A. Balkema. Rotterdam. Vol. 2, pp. 927-934.

WESLEY, L. D. & IRFAN, T. Y. (1996) – The classification of residual soils. *In Guide to Design Evaluation of Tropical and Residual Soils* (In preparation by ISSMFE Technical Committee on Tropical and Residual Soils).

WESLEY, L. D. & IRFAN, T. Y. (1997) – Classification of Residual Soils. *In Blight, G. E. (ed.), Mechanics of Residual Soils. Technical Committee 25 on The Properties of Tropical and Residual Soils of the Int. Soc. for Soil Mec. and Found. Engng.* Balkema, Rotterdam. pp. 17-29.

WESTON, D. J. (1978) – A comparison of the Casagrande cup and BS cone methods for determining the liquid limit of soils and discussion of some of the uses of Atterberg limits. *National Institute for Transport and Road Research, Research Report RS/5/78*, Council for Scientific and Industrial Research, Pretória.

YUDHBIR (1982) – Collapsing behaviour of residual soils. *Proc. 7th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, Hong Kong, pp. 915-930.

YUDHBIR, B. C. R. & SAHU, B. K. (1988) – Identification and classification of tropical soils. *Proceedings of the Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, vol.1, pp. 85-88.

ZARUBA, O. & MENCL, V. (1976) – Engineering Geology. Elsevier Scientific, Amsterdam.

ZBYSZEWSKI, G.; CARVALHOSA, A. B. & FERREIRA, O. V. (1980) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 36-A, Pavia, Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa, 39 p.

ZBYSZEWSKI, G.; CARVALHOSA, A. & GONÇALVES, F. (1981) – Carta Geológica de Portugal à escala de 1/50000. *Notícia explicativa da folha 28-A, Gavião, Serv. Geológicos de Portugal*, Lisboa, 50 p.

