

Boletim de Minas

Vol. 54 • Lisboa 2019-2020



Tema
em
Destaque

Rochas Ornamentais



Direção Geral
de Energia e Geologia



Boletim de Minas

Vol. 54 • Lisboa 2019-2020

Breve História das Instituições – A Tutela Pública da Revelação e Aproveitamento de Recursos Geológicos	5
<i>Cristina Lourenço - Subdiretora-Geral da DGEG</i>	
Preâmbulo	9
<i>Luís Martins - Presidente do Conselho de Administração do Cluster Portugal Mineral Resources</i>	
<i>Rochas Ornamentais em Portugal</i>	
Granitos Ornamentais do Norte de Portugal - Características, Potencialidades e Constrangimentos	11
<i>Luís Sousa, Paulo Pita, Jorge Carvalho e José Lourenço</i>	
No norte de Portugal localizam-se os principais núcleos de pedreiras de granito ornamental. A evolução dos últimos anos alterou as perspetivas de crescimento que vinha sendo verificada, forçando as empresas a adaptarem-se a uma nova realidade. A reconversão de unidades extrativas, por ampliação e fusão, contrasta com a inatividade de muitas outras. Neste trabalho apresenta-se uma caracterização dos núcleos de pedreiras dos granitos de Monção-Valença, Ponte de Lima, Alpendurada-Penafiel, Mondim de Basto, serra da Falperra e Pedras Salgadas. São enumerados os principais problemas que afetam a extração, os intrínsecos ao material ou aos maciços, os derivados das condicionantes ao uso do território e também aqueles relacionados com a dimensão e estrutura das empresas. Apresentam-se propostas para melhorar o acesso e a gestão deste importante recurso natural.	
Exploração Sustentável de Recursos no Maciço Calcário Estremenho	31
<i>Jorge M. F. Carvalho, Jorge Cancela, Cristina Martins, Daniel Pires e Sónia Malveiro</i>	
No Maciço Calcário Estremenho ocorre, desde há décadas, uma intensa atividade de extração de blocos de calcário para fins ornamentais. Dos condicionalismos de ordenamento do território, designadamente pelo facto dessa atividade decorrer num espaço territorial consignado para a proteção da natureza – o Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros, resultaram numerosas e prolongadas situações de conflito pelo uso do território. Por um lado, os naturais anseios de desenvolvimento do setor industrial, por outro, o cumprimento dos objetivos de conservação da natureza.	
Visando o estabelecimento de equilíbrios para a resolução da conflitualidade nos principais núcleos de exploração consignados no Plano de Ordenamento daquele parque natural, desenvolveu-se um projeto com o objetivo específico de encontrar mecanismos conducentes à compatibilização da gestão e exploração racional dos recursos em calcários ornamentais com a conservação da natureza, no âmbito dos planos municipais de ordenamento do território.	
Com base nos resultados alcançados, para cada uma das cinco áreas estudadas foi apresentada uma proposta de ordenamento na qual foram considerados quatro fatores determinantes para a decisão: a existência de áreas de ocorrência de calcários com aptidão ornamental, áreas com altos e excecionais valores ecológicos, património geológico de valor relevante e áreas anteriormente recuperadas do ponto de vista ambiental.	
Gestão Sustentável da Indústria Extrativa no Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros	51
<i>Manuel Duarte</i>	
A extração de inertes no Maciço Calcário Estremenho, em particular na área abrangida pelo Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros (PNSAC), é uma atividade secular ligada à vida das gentes que povoaram esta região, que fundamentalmente a partir dos finais dos anos 80 do século passado ganhou nova dinâmica e se transformou numa atividade económica de grande expressão e com relevo em termos nacionais e internacionais. A gestão da atividade extrativa tornou-se assim num dos desafios mais importantes ao nível da gestão do PNSAC, dada a necessidade de conciliar a exploração de um recurso natural não renovável (e com forte impactos sobre os valores e a paisagem), com a salvaguarda e valorização do património natural, cultural e paisagístico desta área protegida.	

Anticlinal de Estremoz: Geologia, Ordenamento do Território e Produção de Rochas Ornamentais após 2000

Anos de Exploração

59

Luís Lopes

No panorama mineiro de Portugal o Anticlinal de Estremoz constitui um caso único por diversos fatores: 1) trata-se de uma estrutura geológica reconhecida por todos e não apenas pelos especialistas; 2) tem um passado de produção de mármore de excepcional qualidade que remonta ao Período Romano; 3) os mármore aqui extraídos têm reconhecimento internacional constituindo-se como uma verdadeira Marca Nacional; 4) é seguramente uma das regiões do País com o registo geológico melhor conhecido, quer à superfície quer em profundidade. Para tal contribuíram vários estudos académicos e as várias campanhas de sondagens profundas realizadas pelas entidades governamentais e as sondagens de prospeção geológica efetuadas pelas empresas. Também a cartografia geológica de base foi realizada à escala 1:5.000 ou maior e encontra-se disponível às escalas 1:25.000 e 1:10.000; 5) há um passado de projetos de investigação, teses de fim de curso, mestrado e doutoramento, para além dos planos de pedreira e vários estudos realizados pelas empresas, etc. que constitui uma enorme base de dados.

Deste modo, os estudos realizados em diversas áreas (geologia; biologia; ecologia; avaliação de impacto ambiental; caracterização dos geomateriais (rochas e solos); avaliação geomecânica do maciço marmóreo; Planos Diretores Municipais; planos de pedreira; etc.) constituem a todos os níveis um acervo de conhecimento enorme que, complementado com a avaliação de riscos (materiais e humanos), permite a curto prazo a implementação de um efetivo projeto de reordenamento do território.

A Rocha Ornamental Portuguesa e a Evolução na sua Caracterização

85

Cristina Isabel Paulo de Carvalho

Neste documento, relata-se o extenso trabalho desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia e pelas suas instituições antecessoras, no âmbito da caracterização das rochas ornamentais portuguesas. Tendo como ponto de partida o primeiro “Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas”, apresentam-se as motivações que estiveram na origem da criação desta obra literária ímpar e das obras literárias que a sucederam, culminando-se no site “Rochas Ornamentais Portuguesas”. A caracterização das rochas ornamentais assenta no conhecimento das suas propriedades, determinadas através de ensaios. Por este motivo, dá-se particular ênfase aos métodos de ensaio e ao seu progressivo e gradual desenvolvimento, fruto da adesão de Portugal à Comunidade Económica Europeia. Termina-se, abordando as repercussões desta adesão na comercialização dos produtos em pedra natural, de modo a dar cumprimento à legislação europeia atualmente em vigor (Regulamento (UE) N.º 305/2011).

Microscopia e Microanálise no Estudo de Pedras Ornamentais Carbonatadas

103

Luís Dias, Fabio Sitzia, Carla Lisci, Luís Lopes e José Mirão

A crescente competitividade de economias emergentes tem criado dificuldades aos países Europeus produtores e exportadores de Pedra Ornamental. Para acrescentar valor, estes países terão que adicionar tecnologia aos seus produtos.

São apresentados três casos de como as técnicas de microscopia e microanálise permitem antecipar e compreender o comportamento das rochas, em diversas condições climáticas. Estas metodologias podem ser usadas em rocha de obra nova, eventualmente seguindo as normas vigentes ou em objetos património.

A Revolução Tecnológica e Humana do Setor da Pedra

117

Joana Frazão, Jorge Frazão e Inês Frazão

As mudanças aceleradas no mercado exigem que as empresas desenvolvam capacidades dinâmicas para se manterem competitivas. Isto significa que as empresas têm de ter capacidade para integrar, construir e reconfigurar competências internas e externas para abordar ambientes em rápida mudança.

Estas capacidades têm de ser desenvolvidas em várias vertentes, o objetivo deste artigo é explorar as áreas tecnológicas e humanas no setor das rochas ornamentais em Portugal. As tecnologias da Fravizel são autónomas, responsivas e digitais o que vai permitir o progresso técnico do setor. Este deve ser acompanhado pela evolução das competências digitais da força de trabalho do setor.

A Indústria 4.0 (quarta revolução industrial) surge como resposta ao desafio de automatizar processos e aumentar a atratividade para os mais jovens para o setor.

Rochas Ornamentais Portuguesas: Operações Indústria 4.0 como Resposta ao Procurement BIM

121

Agostinho da Silva, Andreia Dionísio e Luís Coelho

O setor das Rochas Ornamentais (RO) gera em Portugal mais de 16.000 empregos diretos, registou um crescimento das exportações em 2019 de 15% e centra a sua principal âncora competitiva na produção customizada com escala. Sendo previsível que a prazo o *Building Information Modelling* (BIM) seja a tecnologia de projeto e gestão de obras a nível global, a qual orienta o *procurement* para produtos *standard*. O presente estudo avalia a resposta da Indústria 4.0 (I-4.0) às ameaças decorrentes do *procurement* BIM na Arquitetura Engenharia e Construção.

Cluster dos Recursos Minerais – Um Modelo de Mobilização de Conhecimento, Cooperação e Inovação

127

Marta Rocha Peres

A política de *Clusters* surgiu em Portugal, a partir de 2008. Nessa altura, foi criado o *Cluster* da Pedra Natural. Em 2016, com a entrada em vigor de outro programa político de clusterização, forma-se uma parceria mobilizada para os objetivos comuns dos Recursos Minerais em Portugal. Esta mobilização culmina na evolução para um *Cluster* dos Recursos Minerais reconhecido em 2017, que hoje conta com 67 Associados e mais de 100 parceiros a nível mundial.

Em mais de dois anos de operacionalização, o trabalho em rede e cooperação tem gerado maior conhecimento, mais desenvolvimento. Os resultados do sistema de clusterização são visíveis ao nível da tendência de crescimento das exportações, do volume de negócios e do valor acrescentado das Empresas que pertencem ao *Cluster*.

O modelo adotado pelo *Cluster* dos Recursos Minerais, tem evidenciado que este é o caminho a prosseguir além de 2020.

LIOZ – Rocha Património, foi Real em Portugal e Transportou Arte e Cultura para o Brasil

137

Zenaide Carvalho G. Silva

O estudo do calcário português lioz, abordado neste artigo, abrange uma breve referência à sua história geológica e uma outra, mais extensa, ao seu papel como veículo de divulgação de arte e cultura portuguesa e europeia no Brasil. O lioz, sendo um calcário microcristalino com propriedades físicas e tecnológicas próprias para a construção, é também utilizado como elemento decorativo, uma vez que tem coloração diversa, em branco-marfim, rosa claro e escuro, amarelo dourado e amarelo forte, recebendo por esta razão denominações diferentes na indústria das rochas ornamentais. É um calcário de ambiente recifal, portador de fósseis rudistas que lhe conferem uma textura singular. Ocorre nas zonas de Lisboa e arredores, incluindo a região do município de Sintra, principalmente em Pêro Pinheiro, de cujas pedreiras saiu a maior parte do material para construção em Portugal e no Brasil, desde o século XVIII até o presente. Usado durante décadas em construções na área de Lisboa, em estilos arquitetónicos diversos, em Mafra materializou o complexo arquitetónico emblemático de D. João V, Convento, Igreja e Biblioteca, tornando-se a “pedra real”. Foi transportado para o Brasil como lastro de navios que circulavam entre Portugal e a nova colónia, onde no século XVIII foi a rocha preferida para as grandes construções, principalmente de igrejas e templos de culto religioso, cópias de igrejas portuguesas ou nelas inspiradas, perpetuando a arte e arquitetura transportadas da Europa. Deixou em Salvador, na Bahia uma exposição valiosa do património de arte e cultura portuguesas. O lioz tem hoje o estatuto de “Rocha Património Global” por preencher os requisitos adotados pela *Heritage Stone Subcomission* (HSS) da UNESCO.

Labyrinth in Petris**A Calçada Portuguesa nos Percursos da Ancestralidade**

147

Ernesto Matos

A calçada artística à portuguesa, é desde os meados do século XIX, um método de pavimento que se tem vindo a implementar numa forma persistente. Não só por Portugal, mas ultimamente, também muitos outros países o têm vindo a assumir. Mais recentemente veio a tornar-se já uma referência de ícone internacional, demonstrando-o a cidade do Rio de Janeiro e o seu emblemático Calçadão de Copacabana. Não é assim por o acaso que a Tocha Olímpica de 2016 teve na sua conceção gráfica também a referência a esse característico e emblemático padrão de ondas, já imortalizado, até mesmo por Walt Disney.

Por Portugal, com os anos a passar, vão-se fazendo contas, não só pelo custo dos materiais geológicos provenientes das mais valias extrativas em meio natural e sem auxílio a métodos industriais poluentes, como para o pagamento de uma mão-de-obra desqualificada e que continua ligada a uma profissionalizada classe operária. Se por um lado Almeida Garrett já designava de Arte a este método aplicado no velho Rossio e que recebeu o nome de um país, por outro assistimos a uma cada vez mais descaracterização técnica e que vai fomentando a má imagem que constantemente passa debaixo dos nossos pés. O que é certo, é que passados mais de 170 anos desde o seu surgimento para benefício público e universal, não vemos este método como disciplina em nenhuma escola de artes portuguesa.

O que temos hoje ou o que queremos no futuro para os nossos pavimentos em calçada? Calçada artística ou calçadas de pedras no chão colocadas por uns arrumadores, formados no quintal ali da esquina?

Pretende-se assim com este texto, refletir sobre alguns destes parâmetros que o próprio país se vai confrontado, perante as vicissitudes de uma profissão, de uma técnica, de uma arte, o que quer que seja... mas que faz parte da nossa perseverança.

Louseira de Canelas**Atividade Extrativa e Ciência de Mãos Dadas Durante Três Décadas**

157

Manuel Valério Figueiredo

A reabertura das Louseiras de Canelas em 1988, permitiu desde logo o fornecimento de lousas para os telhados da região. Paralelamente, a empresa então fundada assume o papel de resgate sistemático dos novos achados fósseis, que se vai intensificando ao ritmo da própria exploração, não encarando este património como um entrave. A inauguração do Centro de Interpretação Geológica de Canelas, ou Museu das Trilobites, em julho de 2006, impulsionou a criação do Geoparque Arouca.

Atividade Mineira	173
Caducidades de Contratos de Prospeção e Pesquisa	
Contratos de Prospeção e Pesquisa	
Caducidades de Contratos de Concessão de Exploração	
Transmissão da Posição Contratual de Concessão de Exploração	
Contratos de Concessão de Exploração	
Adenda ao Contrato de Concessão de Exploração	
Contratos de Integração	
Águas Minerais e de Nascente	179
Aprovação/Revisão do Plano de Exploração	
Nomeação de Responsáveis Técnicos	
Rescisão dos Contratos de Exploração	
Contratos de Atribuição de Direitos de Exploração	
Adendas ao Contrato de Exploração	
Suspensão da Licença de Exploração	
Atribuição de Licenças de Estabelecimento	
Transmissão da Licença	
Alteração do Sistema de Captação	
Caducidade da Licença	
Oficinas de Engarrafamento - Títulos de Exploração	
Pedreiras	185
Responsáveis Técnicos Inscritos na Direção-Geral de Energia e Geologia	
Elementos Estatísticos da Indústria Extrativa Nacional – 2019	
Indústria Extrativa – Comércio Internacional	191
Evolução do Comércio Internacional – janeiro a dezembro de 2019	
Informação Vária	197
Glossário Geral para o Sector da Pedra Ornamental	

FICHA TÉCNICA

Propriedade e Edição:

Direção-Geral de Energia e Geologia
Av. 5 de Outubro, 208 - 1069-203 Lisboa
Tel: 217 922 800 - Fax: 217 939 540
energia@dgeg.gov.pt
www.dgeg.gov.pt

Diretor:

João Correia Bernardo

Comissão Editorial deste volume:

Luís Martins, Cristina Lourenço, Carla Lourenço,
José Alcântara Cruz, Patrícia Falé, J. Ferreira da Costa,
Miriam Cavaco e José Miguel Martins

Redação e Coordenação:

Direção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos e Geotérmicos

Periodicidade: Semestral

Depósito Legal: N° 3581/93

ISSN: 00008-5935

Microscopia e Microanálise no Estudo de Pedras Ornamentais Carbonatadas

Luís Dias

Laboratório HERCULES, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

Email: luisdias@uevora.pt

Fabio Sitzia

Laboratório HERCULES, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

Email: fasitzia@tiscali.it

Carla Lisci

Laboratório HERCULES, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

Email: clisci@uevora.pt

Luís Lopes

Instituto de Ciências da Terra, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

Departamento de Geociências, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

Email: lopes@uevora.pt

José Mirão*

Laboratório HERCULES, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

Departamento de Geociências, Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora

* Autor Correspondente

Email: jmirao@uevora.pt

Palavras Chave: Microscopia, pedra ornamental, calcário, mármore.

RESUMO

A crescente competitividade de economias emergentes tem criado dificuldades aos países Europeus produtores e exportadores de Pedra Ornamental. Para acrescentar valor, estes países terão que adicionar tecnologia aos seus produtos.

São apresentados três casos de como as técnicas de microscopia e microanálise permitem antecipar e compreender o comportamento das rochas, em diversas condições climáticas. Estas metodologias podem ser usadas em rocha de obra nova, eventualmente seguindo as normas vigentes ou em objetos património.

INTRODUÇÃO

Portugal possui um território com enorme diversidade geológica que, ao longo da sua história, tem permitido a extração e a produção de rocha ornamental. No mercado atual, Portugal é um dos países líderes na produção de rocha ornamental (Rana *et. al.*, 2016; Lo Vetro & Martini, 2016), que oferece uma ampla variedade de Pedra Natural, nomeadamente calcários, mármore e granitos. Os calcários portugueses, assim como os mármore, são caracterizados pela sua elevada beleza natural e qualidade. As suas propriedades e características colocam o país numa posição privilegiada na indústria mundial da rocha ornamental.

No entanto, o surgimento de países onde os custos de produção são mais baixos (*e.g.* China, Brasil, Turquia, Índia) implica que a aproximação das empresas portuguesas ao mercado terá que ser diferente do que foi no passado. Esta diferença deve ser marcada pelo *input* tecnológico que colocam nos seus produtos. Do ponto de vista dos materiais (*i.e.* da Pedra), estes fatores competitivos só podem ser adquiridos pela certificação dos produtos e pelo conhecimento sobre a Pedra (e de eventuais tratamentos da mesma).

Há muito, que a comunidade geológica sabe que a complexidade inerente aos materiais e aos processos geológicos só pode ser profundamente reconhecida recorrendo a técnicas de microscopia e microanálise. A sua aplicação a materiais de construção, nomeadamente a Pedra, é mais recente, mas tem mostrado resultados muito interessantes (Koestler *et al.*, 1985; De los Rios & Ascaso, 2005; Domingo *et al.*, 2008; Marszałek, 2008; Reedy, 2008).

DADOS E MÉTODOS

As técnicas de microscopia e microanálise permitem obter a textura e a composição química e em fases (*i.e.* composição mineralógica). A análise textural consiste na capacidade de reconhecer a forma de cada objeto e o modo como estes se dispõem entre si. Condiciona a resistência mecânica, a resposta aos fatores climáticos e determina as possibilidades de valorização da Pedra em fábrica. Requer um microscópio, normalmente um microscópio petrográfico ou um microscópio eletrónico (de varrimento). O primeiro é uma ferramenta funda-

mental em Ciências da Terra, com uma longa tradição no seu uso. O segundo, de uso mais restrito, permite ampliações várias ordens de grandeza superiores. Os tradicionais modos de observação permitem observações complementares, onde o modo de eletrões secundários é especialmente eficiente com aspetos “topográficos” e os eletrões retrodifundidos respondem à composição química.

Se à fonte de eletrões num microscópio eletrónico (ou numa microsonda eletrónica) for associado pelo menos um detetor de raios-X (SEM-EDS) é possível efetuar microanálise por espectroscopia de raios-X. Trata-se do método mais eficiente para reconhecer a distribuição de elementos maiores, com elevada resolução espacial. Mas esta aproximação é pouco eficiente no que concerne a identificação da mineralogia para qual necessitamos de (micro-) difração de Raios-X (micro-DRX) ou espectroscopias vibracionais como micro-FTIR (*Fourier-transform infrared spectroscopy*) e micro-Raman. A micro-DRX é extremamente eficiente na identificação de fases cristalinas. Por outro lado, a espectroscopia Raman tem muito maior resolução espacial. O Micro-FTIR é especialmente importante na presença de minerais com moléculas como água, sulfato ou carbonato.

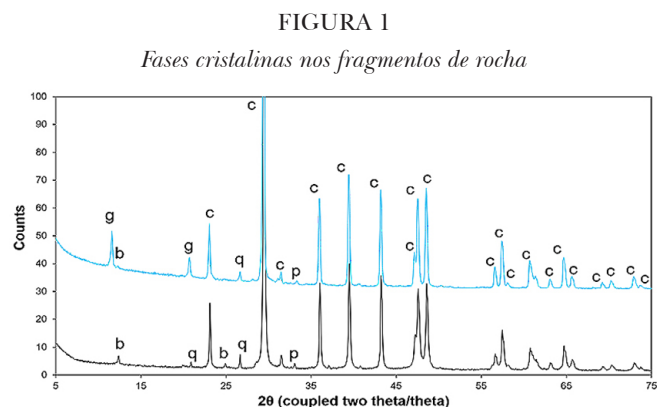
CASOS DE ESTUDO

Alteração dos calcários “azuis”

O calcário “azul” é um tipo de Rocha Natural de diferentes idades, tipicamente utilizado como material de construção em projetos de arquitetura contemporânea em países como Bélgica, Portugal, Irlanda, Vietname e China. Apesar da sua importância económica, sabe-se que este calcário é suscetível a processos de meteorização, induzindo alterações nos padrões de cor. Este fenómeno tem provocado custos onerosos para as companhias que o comercializam, principalmente na Pedra que é exportada. Com o objetivo de determinar o processo de meteorização natural da rocha, foi usada uma abordagem multidisciplinar.

Os resultados obtidos por micro-difração de raios-X mostram que as fases cristalinas da rocha são sobretudo calcite, quartzo, birnessite e pirite (Fig. 1). Estes dados são comprovados por microscopia eletrónica acoplada a um sistema de microanálise por espectroscopia de Raios-X,

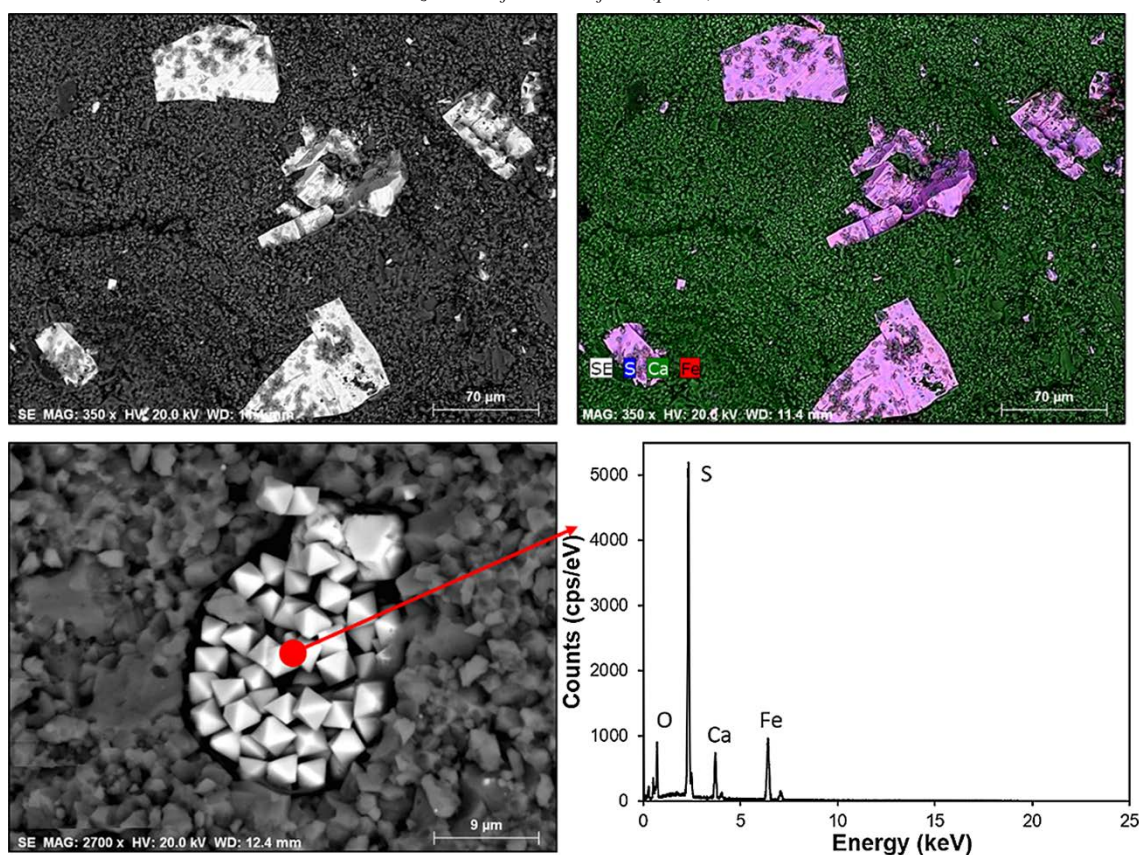
demonstrando-se que a abundância de sulfuretos de ferro na matriz da rocha é relativamente elevada (Fig. 2). Por outro lado, a superfície da rocha alterada revelou um enriquecimento em cristais de gesso (Fig. 1), sendo também detetáveis através da coexistência dos elementos cálcio e enxofre nas mesmas áreas da superfície da rocha (Fig. 3).



sem alteração (—) e com alteração (—).

Abreviaturas: g-gesso; b-birnessite; q-quartzo; c-calcite; p-pirite.

FIGURA 2
Presença de sulfuretos de ferro (pirite) na rocha



A formação destas estruturas está muito provavelmente relacionada com o processo de meteorização natural da pirite (Ritsema and Groenenberg, 1993; Móricz, *et. al.*, 2012). Com base em dados geoquímicos e mineralógicos obtidos em estudos anteriores, o mecanismo de oxidação da pirite tem sido sugerido (Chen *et. al.*, 2014). Assim, quando exposta à água e na presença de oxigénio, a pirite poderá resultar na formação de ácido sulfúrico,

H_2SO_4 (eq1), que por sua vez reagirá com os carbonatos da própria rocha, resultando na formação de gesso (Móricz, *et. al.*, 2012; Chen *et. al.*, 2014), de acordo com a reação eq2:

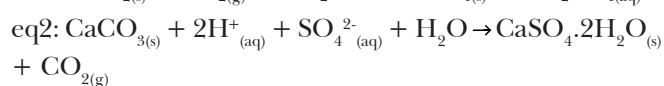


FIGURA 3

Formação de sulfatos de cálcio (gesso) na superfície da rocha, resultantes da sua meteorização natural

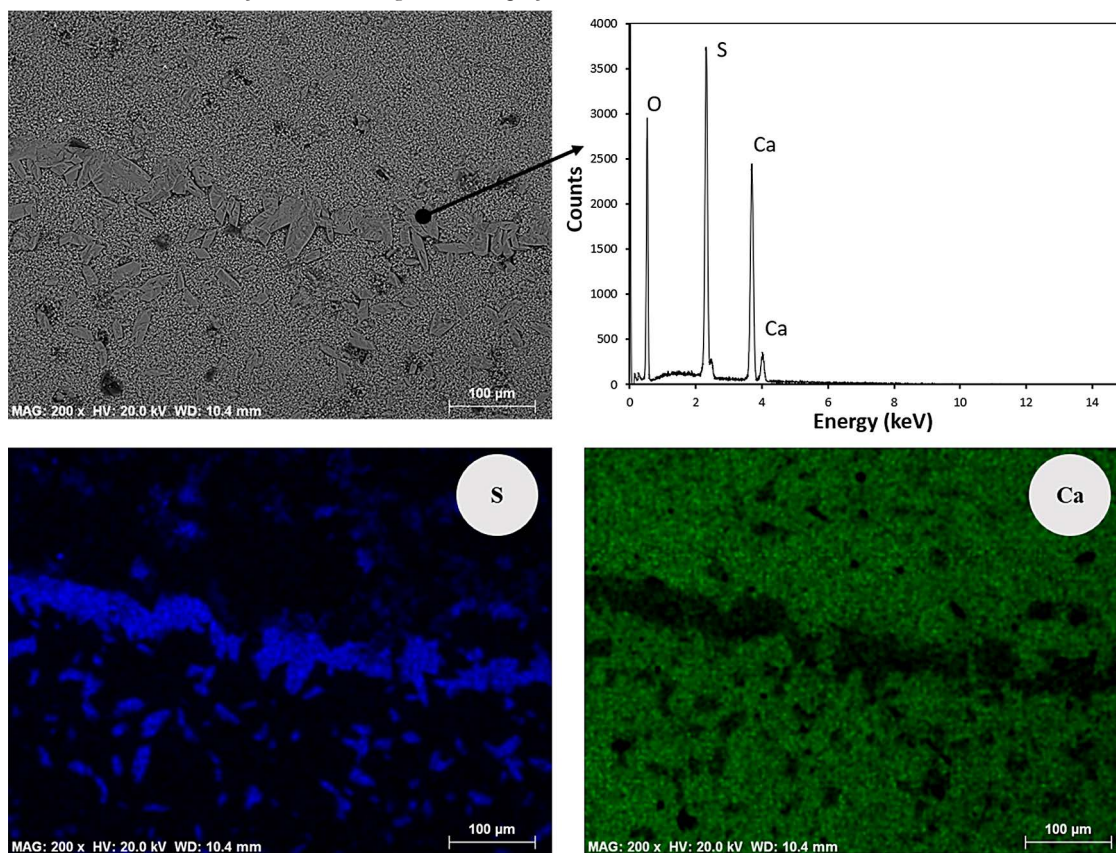
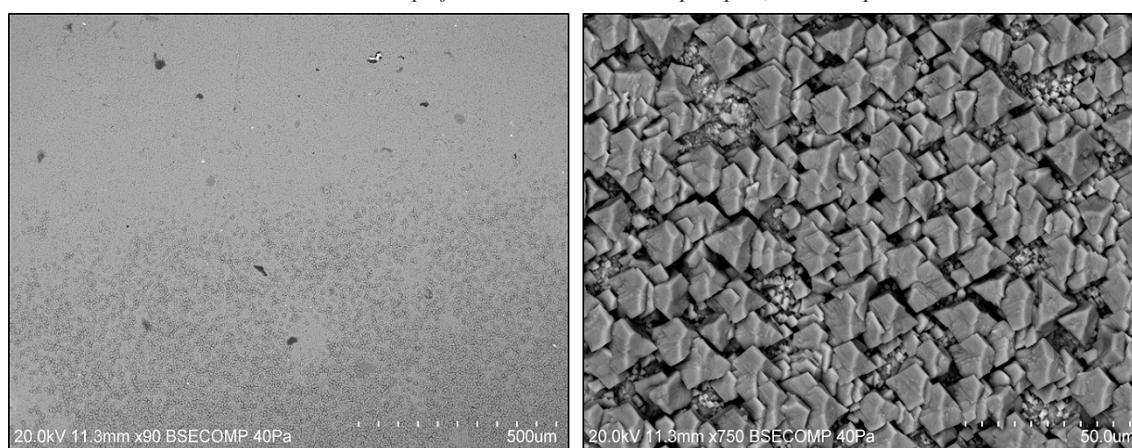


FIGURA 4

Revestimento da superfície da rocha através da precipitação de compostos



Metodologia ainda em desenvolvimento.

Os resultados obtidos demonstram que há uma alteração na mineralogia da rocha, provocada pela sua meteorização natural. Numa tentativa de evitar a oxidação natural da pirite e a consequente reação química entre o sulfato e o cálcio, têm-se realizado várias tentativas com o objetivo de revestir a superfície da rocha, de forma a minimizar

o contacto entre este mineral e a água. Deste modo, foi iniciado o processo de pré-tratamento da pedra através da indução da precipitação de alguns compostos na superfície da rocha (Fig. 4), estando ainda em curso o desenvolvimento desta metodologia.

Caracterização petrográfica de rochas ornamentais

A caracterização petrográfica de rochas ornamentais faz-se segundo a norma europeia EN 12407, de 2007, elaborada pelo CEN/TC 246 “Natural Stones” cuja versão portuguesa foi traduzida pela CT 118 (CEVALOR), tendo sido homologada pelo Instituto Português da Qualidade segundo o termo de homologação n.º 386/2008, de 2008-11-07. Na aplicação da norma são ainda indispensáveis a consulta dos seguintes documentos: EN 12670 Natural Stone – Terminology e EN 12440 Natural Stone – Denomination criteria. No caso das ardósias o estudo petrográfico está definido na norma EN 12326-2. A norma 12407 foi atualizada em 2019 mas no essencial não sofre alterações. Não é nosso objectivo transpor estas normas para o presente texto, mas apenas transmitir o que, segundo a nossa experiência, nos parece mais importante. Para detalhes nos procedimentos e especificações de equipamentos, materiais e consumíveis, devem-se consultar as normas acima referidas.

Como refere a norma EN 12407 “a descrição petrográfica de uma pedra natural é importante não só com o objectivo de efetuar a sua classificação petrográfica, como também para evidenciar aspectos que influenciam o seu comportamento químico, físico e mecânico. De igual forma, poderá ser necessária a determinação da proveniência da pedra (por exemplo no caso da conservação e restauro de edifícios históricos ou monumentos). É assim essencial caracterizar as pedras naturais não só do ponto de vista dos seus componentes minerais e da sua textura ou estrutura, como também em termos de outras características como: cor, presença de veios, de fósseis, de descontinuidades, etc.”

Para uma identificação precisa, é fundamental que os provetes analisados sejam representativos da rocha em análise. Assim, a sua dimensão deve ser preferencialmente determinada em função da heterogeneidade e dimensão dos constituintes. Usualmente, e na maior

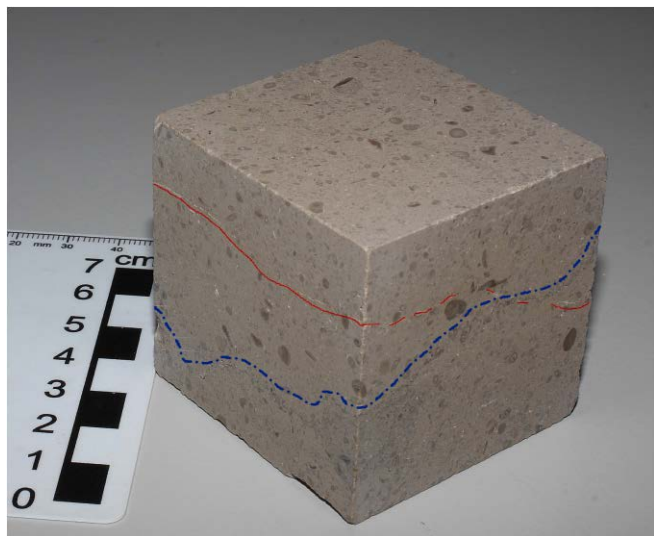
parte dos casos, um cubo com 50mm de aresta e um paralelepípedo com 200x200x30mm (Figs. 5 e 6), permitem uma avaliação primária muito razoável. Casos excecionais terão que ser avaliados pontualmente.

Numa primeira fase faz-se uma caracterização macroscópica com auxílio de lupas de mão ou lupas binoculares. O aumento de contraste facilita a identificação dos elementos constituintes e pode ser facilmente obtido molhando a amostra. Este método expedito também nos permite avaliar o aspeto que a rocha terá se o polimento for possível. Embora não esteja definido na norma, sempre que possível, deve fazer-se o polimento manual de três faces ortogonais de um provete cúbico com 50mm de aresta. Se não for expressamente solicitado, a recolha das amostras para análise não é da responsabilidade do laboratório que faz a caracterização. Assim, preferencialmente as amostras deveriam ser colhidas orientadas em relação a alguma anisotropia observada no terreno (bandado sedimentar, foliação, orientação preferencial dos cristais, lineação de estiramento/intersecção, etc.). Muitas propriedades mecânicas e os aspetos texturais (corte “a favor” ou “ao contra”) são fortemente controladas e condicionadas pelas direções de corte. Assim, o desempenho, enquanto rocha ornamental, pode ser comprometido se não se respeitar a estrutura (aspeto macroscópico) e a textura (aspeto microscópico) da mesma.

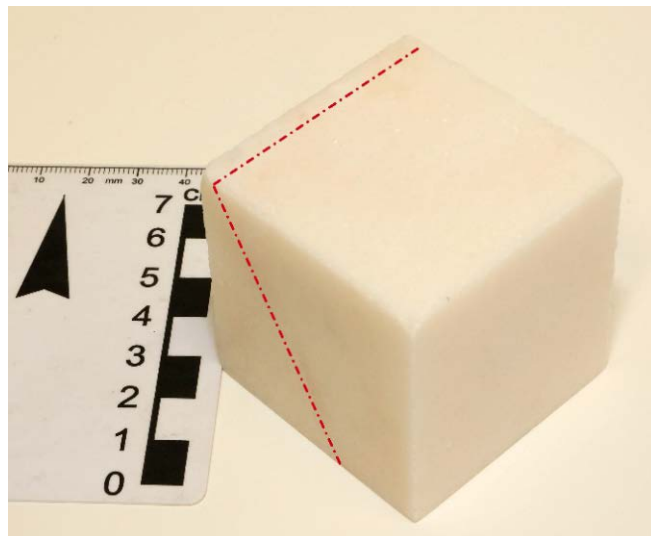
A caracterização petrográfica em amostra de mão inclui a indicação da cor, ou intervalo de cores, que a rocha apresenta, sendo aconselhável a utilização de uma carta de cores (*Rock Colour Chart*), estrutura, dimensão do grão, fraturas e sua abertura, existência de poros e cavidades assim como a natureza do seu preenchimento, referência ao estado de alteração e meteorização e indicação de quaisquer manchas daí resultantes, presença de microfósseis, presença de xenólitos e outras observações pertinentes que auxiliam na caracterização da rocha.

FIGURA 5

Provete cúbico de Calcário Moleanos, com indicação do plano de estratificação, a vermelho, e superfície estilolítica, a azul



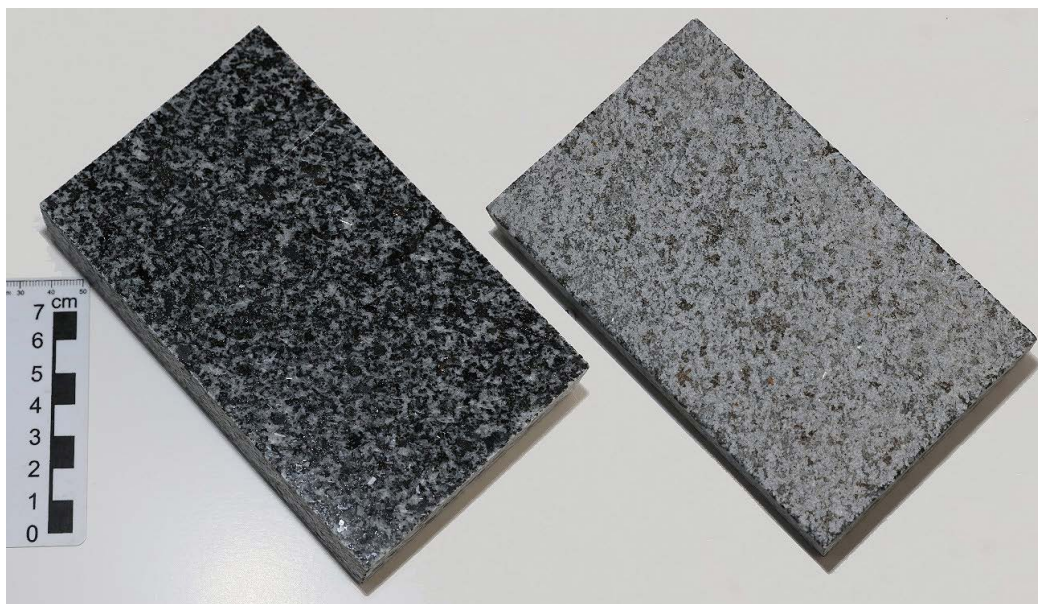
Provete cúbico de mármore branco de Estremoz, com indicação do plano de orientação cristalográfica preferencial



Neste caso as lâminas delgadas cujas imagens se representam adiante, foram realizadas segundo este plano e segundo um plano perpendicular que também contém o estiramento mineral.

FIGURA 6

Provete paralelepípedo de diorito, isótopo e homogêneo à escala da amostra de mão



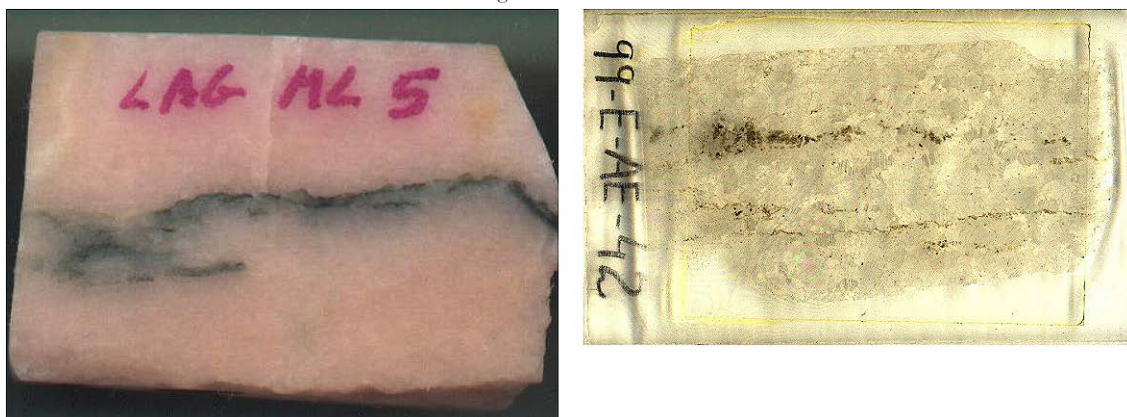
Representam-se as faces opostas, polida (à esquerda) e serrada (à direita).

O passo seguinte consiste na análise ao microscópio petrográfico. Para tal, no mínimo e segundo os procedimentos descritos na norma, elaboram-se duas lâminas delgadas. Corta-se uma talisca da rocha que se cola numa lâmina de vidro com 44x28mm, ou 75x50mm, se a textura for muito grosseira, posteriormente faz-se o desgaste até a rocha ficar com $0,030 \pm 0,005\text{mm}$

(Fig. 7). Duas das lâminas são sempre feitas em seções ortogonais entre si de forma a controlar melhor eventuais anisotropias presentes na rocha. A norma EN 12407 também refere a necessidade de se prepararem seções polidas no caso de a rocha apresentar uma percentagem elevada de minerais opacos.

FIGURA 7

Talisca e lâmina delgada de dois mármore de Estremoz



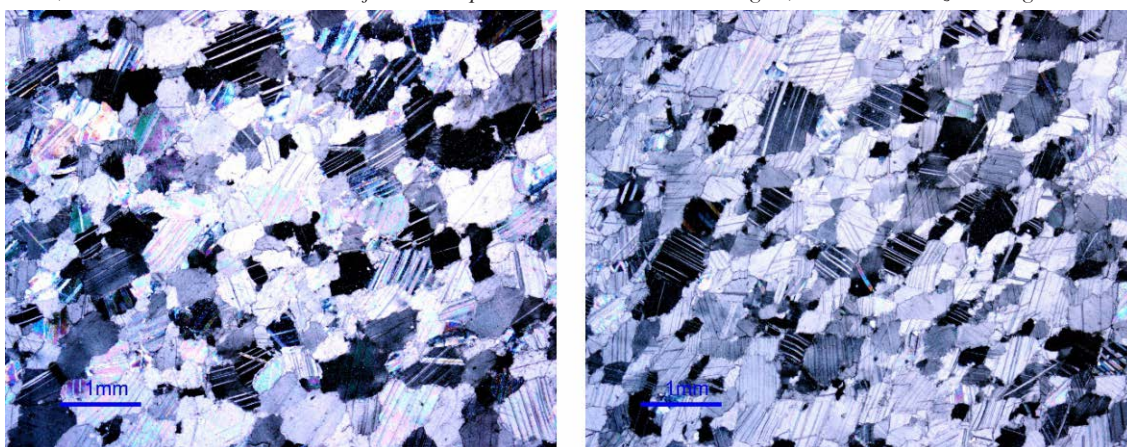
O campo de visão nas duas fotos é sensivelmente de 4 centímetros. Neste caso as amostras foram orientadas e as seções representadas são perpendiculares à orientação preferencial cristalográfica dos cristais de calcite.

A norma refere ainda que para assegurar que a classificação petrográfica seja objetiva, é essencial que a caracterização do material seja, tanto quanto possível, quantitativa. Deste modo, ao microscópio petrográfico faz-se uma estimativa ótica, *i.e.* através da contagem de pontos ou medição de áreas relativas ocupadas pelos diferentes elementos constituintes. No caso das rochas sedimentares consideram-se os elementos figurados e a matriz envolvente, no caso de rochas ígneas e metamórficas, avalia-se a percentagem relativa dos minerais presentes.

A descrição microscópica deve incluir informações sobre a estrutura e a partir daí indicar a que tipo de rochas, ígnea, sedimentar ou metamórfica, a rocha em análise pertence. Em seguida e em função da estrutura determinada, faz-se uma avaliação dos constituintes (minerais/grãos) quanto à natureza, dimensão, percentagem relativa de cada família identificada, hábito, forma, grau de calibração (nas rochas sedimentares), fronteira entre elementos constituintes, orientação (Fig. 8), indícios de meteorização e alteração.

FIGURA 8

Duas lâminas delgadas, observadas em nicóis cruzados, da mesma rocha (mármore branco de Estremoz, referentes ao provete cúbico ilustrado na Fig. 5) obtidas em direções ortogonais



À esquerda segundo a direção preferencial da rocha, “corte ao favor” (segundo esta orientação a rocha apresenta uma textura granoblástica de grão médio), e à direita segundo o corte “ao contra”. Nesta imagem é bem visível a orientação preferencial dos cristais de calcite que definem uma microxistosidade localmente conhecida por “corrume”.

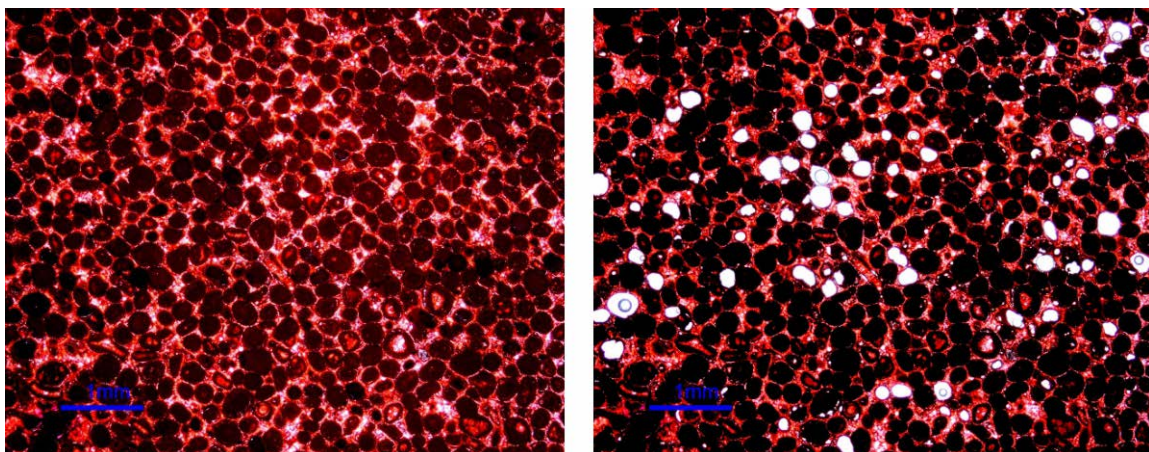
No caso das rochas vulcânicas e sedimentares, deve ser dada especial atenção à matriz que suporta os elementos figurados uma vez que o desempenho enquanto rocha ornamental está intrinsecamente relacionado com a mesma. Por exemplo, calcários esparíticos são frequentemente mais pulverulentos e porosos que os micríticos que se apresentam mais compactos e menos porosos; em contrapartida são mais propensos a apresentarem microfraturas e consequentemente são mais frágeis. Outras propriedades como a presença de descontinuidades, superfícies estilolíticas, fissuras e fraturas abertas, com e sem preenchimento, também devem ser referidas (Fig. 10).

Nos casos extremos em que a análise petrográfica, macro e microscópica, não permita classificar a rocha com rigor, podem ser utilizadas outras técnicas químicas ou difração de raios-X.

Ao responsável técnico cabe a redação e assinatura do relatório de ensaio referente à análise petrográfica. Este relatório deverá ser redigido segundo o estipulado pela norma e deve incluir todas as determinações que fundamentem a classificação científica proposta para a rocha.

FIGURA 9

Duas imagens do mesmo campo de visão, em nicóis cruzados à esquerda e em nicóis paralelos, à direita, de uma lâmina delgada de calcário ooesparítico, preparada com solução da alizarina vermelha



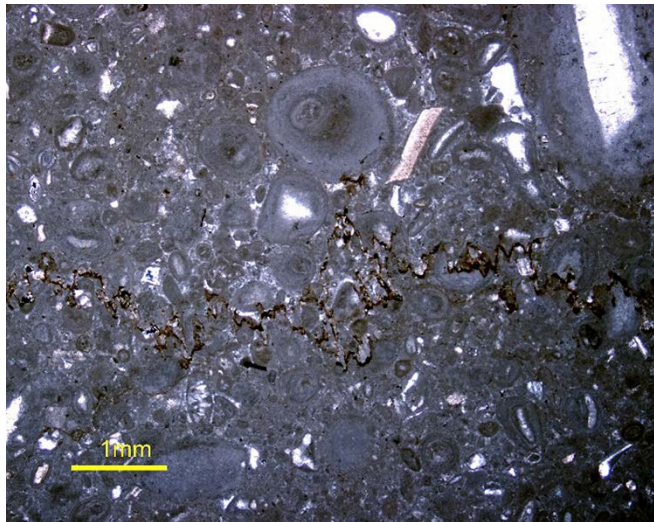
Esta preparação permite a identificação da calcite em relação aos outros carbonatos. Na imagem à direita todos os pontos brancos correspondem a espaços vazios deixados pela fragmentação da rocha. Este aspeto traduz-se nos vestígios pulverulentos que a rocha deixa ao tato e indicia elevada porosidade da mesma.

Cabe ao proprietário ceder os provetes e indicar um nome comercial para a rocha em análise. A nossa experiência diz-nos que, utilizando a tabela de classificação de Folk (1959, 1962) para calcários, rochas sedimentares carbonatadas com nomes comerciais distintos podem corresponder ao mesmo tipo petrográfico e, embora menos frequente mas também acontece que, provavelmente devido a variações naturais de fácies ou por amostragem seletiva e nem sempre representativa, a mesma designação comercial conduza a rochas com distinta classificação petrográ-

fica; *i.e.* oosparite/intrasparite/biosparite, neste caso o cimento/matriz será sempre idêntico mas a natureza dos elementos figurados varia. Em casos ambíguos, onde a estimativa da percentagem relativa dos elementos figurados, deixa dúvidas, é usual a proposta de nomes compostos, *i.e.* oobiosparite. Para um geólogo, isto é normal e pode ser constatado em afloramento através de uma variação lateral de fácies induzida por um processo sedimentar de calibração. As propriedades mecânicas da rocha não sofrem alterações significativas.

FIGURA 10

Lâmina delgada de um calcário micritico com uma superfície estilolítica sublinhada pelo depósito de minerais opacos, provavelmente óxidos de Fe e/ou argilas, resíduos insolúveis resultantes da dissolução da rocha sobre pressão litostática. Maioritariamente estes planos são subparalelos à estratificação da rocha



A observância das regras estipuladas nas normas é condição de credibilidade para a correta identificação das rochas ornamentais e permite a tradução para uma linguagem universal dos nomes comerciais atribuídos pelas empresas, permitindo deste modo aos prescritores uma avaliação mais independente quando escolhem a matéria-prima para as suas obras.

Estudo de Pedra em Património construído: o calcário micritico *Pietra Cantone* (Sardenha, Itália)

Os calcários, particularmente os do tipo biomicrite, são amplamente utilizados na construção de edifícios e monumentos históricos nos países mediterrânicos (*e.g.* Portugal, Espanha, Itália, Malta). Este facto resulta da sua disponibilidade como matéria-prima e a facilidade com que são trabalhados. O calcário biomicrítico *Pietra Cantone* é especialmente importante na área do Mediterrâneo (Columbu *et al.* 2017) e, em particular, no sul da Sardenha (Itália). Este litótipo é frequentemente usado na cidade de Cagliari como silhares (“cantone” em italiano) para a construção de edifícios antigos e contemporâneos como a muralha da cidade, palácios do município, igrejas (Fig. 11a, b) e torres. Trata-se de uma rocha de idade miocénica, marinha, formada com uma coluna de água entre 60-80m (Cherchi 1974).

Para definir a composição mineralógica das rochas e as suas características petrográficas como o *fabric*,

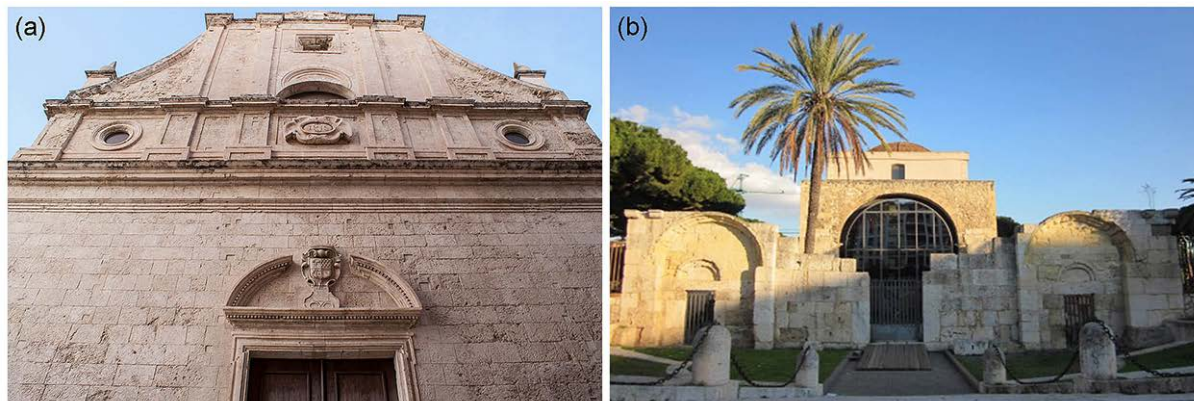
utilizou-se o microscópio ótico de luz polarizada. A caracterização por microscopia ótica foi efetuada em lâminas delgadas polidas com 30µm de espessura. A caracterização de DRX em pó de rocha permite detetar fases minerais não identificáveis no microscópio de polarização, tais como produtos de alteração de rocha e argilas. Uma análise detalhada por microscópio eletrónico de varrimento com espectroscopia de raios-X (SEM-EDS) realizada nas lâminas delgadas e fornece dados composicionais por microanálise.

A rocha, caracterizada por microscopia ótica, mostra cerca 75% de micrite e 25% de cimento de esparrítico (Fig. 12a). Outros minerais estão presentes até 5% do volume e consistem em quartzo, feldspato-K e minerais opacos. Bioclastos de foraminíferos (*i.e.* Globigerinidae, Fig. 12b), crinoides, braquiópodes, briozoários estão dispostos aleatoriamente na matriz calcária (Lisci, 2014). A fauna fóssil consiste em organismos marinhos de água limpa e oxigenada com grau de salinidade normal, indicando um ambiente de deposição próximo da costa (Barroccu *et al.*, 1981). De acordo com a classificação de calcário Folk, esta rocha é considerada um biomicrito.

A difração de raios-X da rocha em pó confirma a presença de minerais como calcite, quartzo e feldspato-K já observados em OM e ainda illite (Sitzia, 2019).

FIGURA 11

Monumentos usando Pietra Cantone

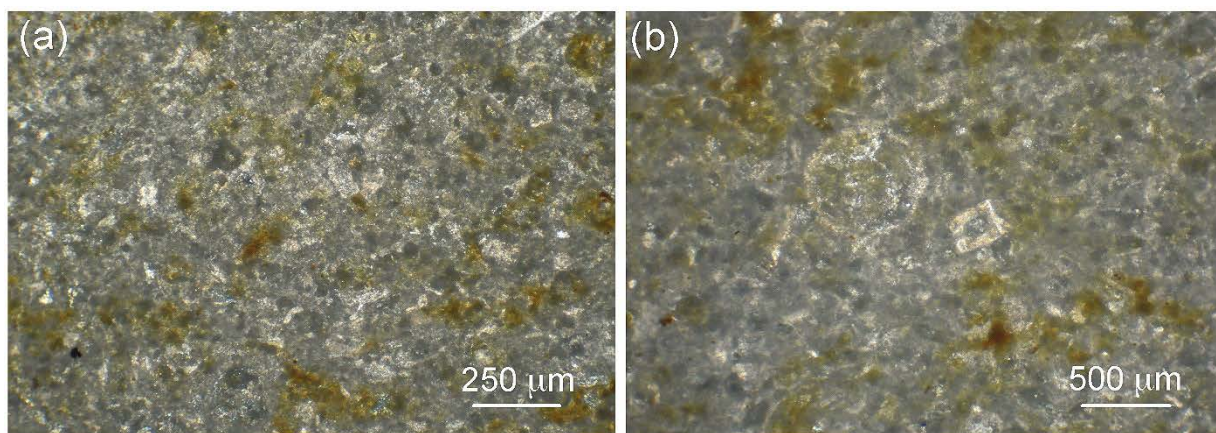


(a) Basílica de Santa Croce (Cagliari, Itália).

(b) Basílica de San Saturnino (Cagliari Itália).

FIGURA 12

Lâmina delgada da Pietra Cantone (Nicóis cruzados)



(a) Matriz micrítica e esparrite.

b) Detalhe de bioclasto de Globigerinidae.

Nos biomicritos amostrados nos monumentos da cidade de Cagliari (*e.g.* Basílica de São Saturnino, São Pancrácio e Torre do Elefante), a difração de raios-X mostra a presença de fases minerais resultantes do processo de sulfatação da matriz carbonatada, por *External Sulphate Attack* (ESA). A ESA é causada pelo anião SO_4^{2-} das emissões antropogénicas (tráfego urbano) e de fontes naturais, como ambientes marinhos.

A alteração da rocha produz minerais da classe dos sulfatos, como Thenardite (Na_2SO_4) e a Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), frequentemente sob a forma de eflorescência (Fig. 13a), em ambientes específicos com elevada humidade e oscilações geralmente cíclicas da temperatura. As duas fases são solúveis e transformam-se uma na outra quando as condições termo-higrométricas se alteram. O volume destes dois minerais pode variar

em função da proporção de água na sua estrutura, produzindo pressões consideráveis, causando fraturas internas significativas, que podem comprometer a integridade da rocha (Columbu *et al.* 2019).

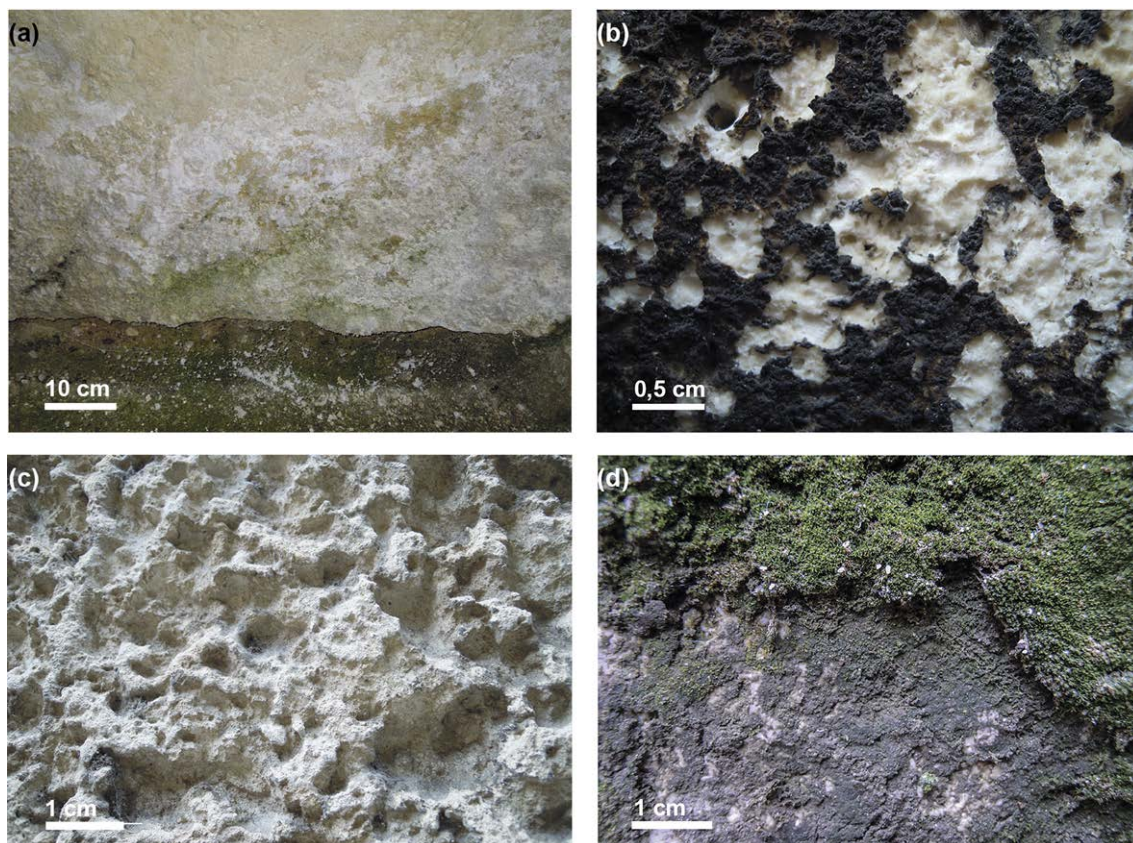
A alteração da rocha nestes casos consiste em eflorescência superficial, como mostrado na figura 13a, mas também em crostas negras (Fig. 13b), alveolização / pulverização (Fig. 13c) e colonização biológica (Fig. 13d) podem ocorrer. A alveolização / pulverização consiste na perda de detritos com tamanho de partícula $10 < \phi < 100 \mu\text{m}$. Por exemplo, na Basílica de São Saturnino registam-se deposições de resíduos na ordem de $470 \text{g/m}^2/\text{ano}$, na área da abside (Sitzia *et al.* 2020).

No biomicrito, o processo de sulfatação da matriz de carbonato também é visível pela observação em SEM-EDS (Fig. 14).

Uma fração da textura biomicritica em lâmina delgada e previamente observada por microscopia ótica (Fig. 14a) foi mapeada por SEM-EDS (Fig. 14b). Neste caso, o SEM provou ser uma técnica indispensável para identificar o

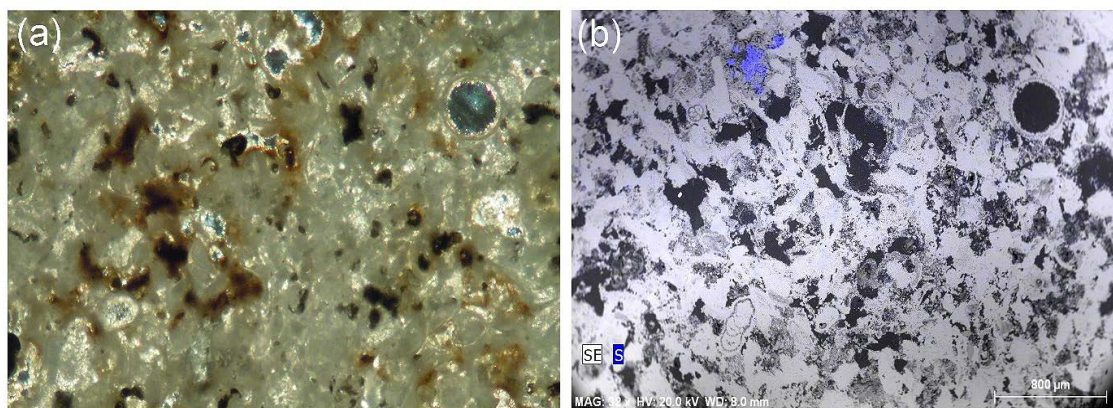
início da sulfatação da rocha que não foi identificada com o microscópio ótico. Estes processos levam a mudanças na mineralogia da rocha e consequente alteração *in-situ* das características físicas e mecânicas.

FIGURA 13



(a) Eflorescências numa parede da Basílica de San Saturnino (Cagliari, século XII d.C.), (b) crostas negras com gesso na torre San Pancrazio (Cagliari século XIII d.C.), (c) forte alveolização e pulverização das paredes em edifícios históricos da cidade de Cagliari, (d) exemplos de biodegradação de calcário devido à proliferação de organismos em uma superfície vertical.

FIGURA 14



(a) Microscopia ótica em luz polarizada de calcário biomicritico.

(b) calcário biomicritico por SEM-EDS. A cor azul indica a presença de enxofre (S) devido a um processo superficial de sulfatação.

Assim, o calcário biomicritico, ou simplesmente biomicrito, denominado *Pietra Cantone*, apesar de sua disponibilidade e fácil trabalhabilidade, apresenta problemas de alteração relacionados com as suas características texturais, mineralógicas e geoquímicas apenas perceptíveis por técnicas como difração de Raios-X e por microscopia ótica e eletrônica. Além disso, a pedra possui uma porosidade efetiva de 35%, o que favorece a absorção de grandes quantidades de soluções aquosas. Outras características, como alta higroscopicidade e baixa permeabilidade, devido aos grandes teores de argila, facilitam a retenção na pedra de soluções salinas prejudiciais. Além disso, a fração microcristalina carbonatada da matriz, tem uma forte apetência para reagir com os aniões sulfatados da atmosfera, especialmente em áreas citadinas, promovendo a formação de eflorescência e causando problemas, como pulverização e alveolização. Este fenómeno é particularmente nefasto em ambientes húmidos e / ou mal ventilados, típico da área de *Cagliari*, onde a humidade relativa média varia de 65% a 80%. Neste ambiente, os processos de alteração progridem rapidamente, envolvendo os blocos utilizados na construção de elementos estruturais dos edifícios. Assim, os mecanismos de meteorização estão relacionados com as características das rochas, a presença de aerossóis marinhos e a poluição citadina.

CONCLUSÕES

A crescente competitividade de países como a China, o Brasil, a Turquia e outros no setor das Pedras Ornamentais aumenta a necessidade de países como a Itália, Portugal e a Espanha acrescentarem valor aos seus produtos.

Este aspeto está inegavelmente associado à capacidade de identificar e antecipar o comportamento futuro dos materiais. Considerando a natureza complexa e heterogénea dos materiais rochosos, o uso de técnicas de microscopia e microanálise é essencial. Só desta forma é possível perceber a natureza dos materiais e a forma como se alteram.

Este aspeto é importante em “obra” nova, onde alguns procedimentos devem seguir as normas vigentes. E em objetos de património, como património construído, onde a importância económica destes objetos é medida pelos impulsos turísticos que suscitam.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por diversas entidades e projetos, nomeadamente pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), projetos UID/Multi/04449/2013 e UID/GEO/04683/2013, apoiado pelo FEDER e COMPETE 2020 com os projetos POCI-01-0145-FEDER-007649 e POCI-01-0145-FEDER-007690. As atividades experimentais são apoiadas pelos projetos INOVSTONE4.0 (POCI-01-0247-FEDER-024535) e *ColourStone* (ALT20-03-0145-FEDER- 000017), financiados pelo FEDER, Portugal 2020 e Alentejo 2020.

Luís Dias agradece ainda à FCT pela bolsa de doutoramento (SFRH/BD/111498/2015) cofinanciada pelo Fundo Social Europeu (ESF) e fundos nacionais.

REFERÊNCIAS

- BARROCCU G., CREPELLANI T., LOI A. (1981) - *Caratteristiche geologico-tecniche del sotto suolodell'area urbana di Cagliari*. Riv. Ital. Geotec., 15:98-144.
- CHEN Y, LI J, CHEN L, HUA Z, HUANG L, LIU J, XU B, LIAO B and SHU W (2014) - *Biogeochemical processes governing natural pyrite oxidation and release of acid metalliferous drainage*. Environmental Science & Technology 48 (10): 5537-5545. DOI: 10.1021/es500154z;
- CHERCHI A. (1974) - *Appunti biostratigrafici sul Miocene della Sardegna* (Italia). In: Actes V congrès du Neog. Médit., Lyon.
- COLUMBU S., LISCI C., SITZIA F., BUCCELLATO G. (2017) - *Physical-mechanical consolidation and protection of Miocenic limestone used on Mediterranean historical monuments: the case study of Pietra Cantone* (southern Sardinia, Italy) Environ Earth Sci., 76:148.
- COLUMBU S., MARCHI M., MARTORELLI R., PALOMBA M., PINNA F., SITZIA F., TANZINI L., VIRDIS A. (2019) - *Architettura romanica e territorio. Indagini archeometriche sulle pietre e i marmi delle chiese della Sardegna in età giudicale: nuovi approcci per la loro caratterizzazione, valorizzazione e conservazione*. CUEC, Cagliari.
- DE LOS RIOS, A., & ASCASO, C. (2005) - *Contributions of in situ microscopy to the current understanding of stone biodeterioration*. International Microbiology, 8 (3), 181.
- DOMINGO, C., DE BUERGO, M. A., SÁNCHEZ-CORTÉS, S., FORT, R., GARCÍA-RAMOS, J. V., & GOMEZ-HERAS, M. (2008) - *Possibilities of monitoring the polymerization process of silicon-based water repellents and consolidants in stones through infrared and Raman spectroscopy*. Progress in Organic Coatings, 63(1), 5-12.
- EN 12326-2:2011. *Natural stone test methods*. Slate and stone for discontinuous roofing and external cladding. Methods of test for slate and carbonate slate.

- EN 12407:2007. *Natural stone test methods. Petrographic examination*
- EN 12407:2019. *Natural stone test methods. Petrographic examination*
- EN 12440:2017. *Natural stone test methods. Denomination criteria*
- EN 12670:2019. *Natural stone. Terminology*
- FOLK, R. L. (1959) - *Practical petrographic classification of limestones*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bulletin K V43, pp 1-38.
- FOLK, R.L., (1962) - *Spectral subdivision of limestone types*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1, pp. 62-84.
- KOESTLER, R. J., CHAROLA, A. E., WYPYSKI, M., & LEE, J. J. (1985) - *Microbiologically induced deterioration of dolomitic and calcitic stone as viewed by scanning electron microscopy*. In Ve congrès international sur l'alteration et la conservation de la pierre. Actes. Vth international congress on deterioration and conservation of stone. Proceedings, lausanne, 25-27.9. 1985 (pp. 617-626).
- LISCI C. (2014) - *Physical and chemical analysis of "Pietra Cantone" of Cagliari: Importance of petrography applied to the protection of cultural heritage*. Bachelor degree in Geological Sciences, University of Cagliari (Italy).
- LOVETRO D., and MARTINI F. (2016) - *Mesolithic in Central-Southern Italy: Overview of lithic productions*. Quaternary International 423: 279-302. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.12.043;
- MARSZALEK, M. (2008) - *Application of optical microscopy and scanning electron microscopy to the study of stone weathering: a Cracow case study*. International Journal of Architectural Heritage, 2(1), 83-92.
- MÓRICZ F, MÁDAI F., and WALDER IF. (2012) - *Pyrite oxidation under circumneutral pH conditions*. GeoScienceEngineering 1: 111-116. DOI: 10.1016/0016-7037(91)90005-P;
- NP EN 12407:2008. *Métodos de ensaio para a pedra natural. Estudo petrográfico*.
- RANA A., KALLA P., VERMA HK., and MOHNOT JK. (2016) - *Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review*. Journal of Cleaner Production 135: 312-331. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.126;
- REEDY, CHANDRA L. (2008) - *Thin-section petrography of stone and ceramic cultural materials*. London: Archetype.
- RITSEMA C.J. and GROENENBERG J.E. (1993) - *Pyrite oxidation, carbonate weathering, and gypsum formation in a drained potential acid sulfate soil*. Soil Science Society of America Journal 57 (4): 968-976. DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700040015x;
- SITZIA F. (2019) *Decay monitoring and conservation of Sardinia monumental heritage by geochemical, petro-physical and micro-photogrammetric characterization of stone surfaces*. PhD thesis in Earth and Environmental Sciences and Technologies. University of Cagliari (Italy).
- SITZIA F., LISCI C., MIRÃO J. (2020) - *Accelerate ageing on building stone materials by simulating daily, seasonal thermo-hygrometric conditions and solar radiation of Csa Mediterranean climate*. Constrution and building materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121009>