



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**CONTRIBUTO PARA O ESTUDO DO REGIME TÉRMICO DA
REGIÃO SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL**

Eduardo Ekungu Eliseu

Orientador: Prof. Doutor António Correia

Mestrado em Ciência e Tecnologia da Terra, Atmosfera e Espaço

Especialidade de Geofísica Interna

Dissertação de Mestrado

Évora, 2015

Resumo

Contributo para o estudo do regime térmico da região sul de Portugal Continental

Desde 1980 que tem vindo a ser medidas temperaturas em furos com o objectivo de criar um mapa de densidade de fluxo de calor (DFC) à superfície e cartas da distribuição da temperatura para diferentes profundidades para a região sul de Portugal Continental. Os resultados destes estudos têm importância tanto a nível do possível aproveitamento da energia geotérmica (de baixa entalpia – águas termais; alta entalpia – para produção de energia eléctrica), como a nível do conhecimento das propriedades térmicas e reológicas da crosta e manto superior, como ainda a nível de estudos de captação de recursos hídricos subterrâneos e de processos de maturação e migração de petróleo. Com este trabalho pretende-se: (1) compilar a informação geotérmica existente para a região sul de Portugal Continental; (2) realizar novas determinações de temperatura em furos de prospecção hidrogeológica e, assim, actualizar a carta de fluxo de calor existente para o Sul de Portugal Continental; (3) obter para alguns dos furos escolhidos a densidade de fluxo de calor; (4) fazer uma interpretação preliminar dos valores da densidade de fluxo de calor obtidos para sete dos nove furos utilizados para estimar a DFC. Para os sete furos referidos a DFC foi calculada através do produto do gradiente geotérmico, calculado para cada um deles, e a condutividade térmica estimada para as formações por eles atravessadas; o gradiente geotérmico foi calculado através das diagrfias de temperatura obtidas nos furos. Para além da DFC foi também estimada a temperatura aos 500 metros de profundidade para a zona onde os furos foram realizados. Para a área de estudo, que inclui a Zona Ossa Morena (ZOM) e a Zona Sul Portuguesa (ZSP), os valores da DFC variam entre 15 e 91 mWm^{-2} ; para a ZOM os valores variam entre 15 e 80 mWm^{-2} e para a ZSP variam entre 61 e 91 mWm^{-2} . Assim, de acordo com os resultados deste trabalho, a DFC apresenta e confirma um aumento médio da DFC da ZOM para a ZSP. Os resultados do trabalho poderão ser utilizados, em trabalhos futuros, para construir modelos geotérmicos para a região sul de Portugal Continental e, assim, compreender melhor o regime térmico da crosta e do manto superior nessa região.

Palavras-chave: Densidade de fluxo de calor, gradiente geotérmico, condutividade térmica, Portugal Continental.

Abstract

Contribution to the thermal regime of the study of the southern region of mainland Portugal

Since 1980, temperatures have been measured in boreholes in order to create a surface heat flow density (HFD) map and temperature distribution maps for different depths for the southern region of Mainland Portugal. The results of these studies are important to the possible use of geothermal energy (low enthalpy - hot springs; high enthalpy - for power production), to the knowledge of the thermal and rheological properties of the crust and upper mantle, and will be useful for studying groundwater resources and processes of maturation and migration of oil. This study aims to: (1) compile all existing geothermal information for the southern region of Mainland Portugal; (2) make new determinations of temperature in water boreholes, and so update the existing heat flow density map for southern Portugal; (3) determining the heat flow density for chosen boreholes; (4) make a preliminary interpretation of the heat flow density values obtained for seven of the nine new boreholes presented in this work. For the seven boreholes HFD was estimated by multiplying the geothermal gradient, calculated for each borehole, and the estimated thermal conductivity of the borehole geological formations; geothermal gradients were calculated from the temperature logs obtained for each borehole. Besides HFD values, temperatures at 500 m depth were also estimated for each borehole. For the study area, which includes the Ossa Morena Zone (OMZ) and the South Portuguese Zone (SPZ), heat flow density values vary from 15 to 91 mWm^{-2} . For the OMZ heat flow density values vary from 15 to 80 mWm^{-2} and for the SPZ vary from 61 to 91 mWm^{-2} . So, the HFD values show and confirm an increase from the OMZ towards the SPZ. The results of the work may be used in future work to build geothermal models for southern Portugal and so better understand the thermal regime of the crust and upper mantle in this region.

KEY WORDS: Heat flow density, geothermal gradient, thermal conductivity, Mainland Portugal

Agradecimentos

Na execução da presente dissertação, elaborada entre Outubro de 2014 a Agosto de 2015, agradeço, em primeiro lugar, a Deus por tudo que fez por mim até esta fase da minha vida e, em segundo lugar, a várias pessoas cuja contribuição foi imprescindível.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Doutor António Correia do Departamento de Física da Universidade de Évora, responsável pela unidade curricular de Geofísica Aplicada e Ambiental, pela disposição que me dispensou para orientar este trabalho, pela cedência de dados e bibliografia, e pelo rigor científico que sempre me motivaram e inspiraram.

Agradeço ao Dr. Jesús Rosino, coordenador do projeto Investigación de los Recursos Geotérmicos de Extremadura (España), Alentejo y Región Centro (Portugal) en el Marco del Proyecto PROMOEENER A4E, a disponibilização e cedência dos dados geotérmicos dos nove furos utilizados e apresentados na dissertação.

Agradeço à Prof^ª. Doutora Maria João da Costa, Directora do Mestrado em Ciência e Tecnologia da Terra, Atmosfera e Espaço (MCTTAE), pelo apoio constante e contribuição com a sua experiência no módulo de Métodos e Técnicas de Observação em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço.

Agradeço à Prof^ª. Doutora Rosa Duque pelo apoio e contribuição na disciplina de Geotermia do MCTTAE, na qual assenta a base do meu trabalho.

Agradeço ao Prof. Doutor Rui Salgado, da área de Física da Atmosfera, e o Prof. Doutor Bento Caldeira pelo ambiente saudável e disponibilidade durante o período em que frequentei a parte curricular do Mestrado em Ciência e Tecnologia da Terra, Atmosfera e Espaço na especialidade de Geofísica Interna.

Agradeço ainda ao Prof. Doutor José Borges e ao Prof. Doutor António Miguel pelo grande empenho posto na lecionação de várias disciplinas do Mestrado em Ciência e Tecnologia da Terra, Atmosfera e Espaço.

Agradeço também ao meu tio Dom Zacarias Camuenho, Arcebispo imérito do Lubango, Angola, pela contribuição e coragem no apoio à minha saída de Angola para estudar em Portugal.

Agradeço ainda a todos os meus colegas, principalmente ao Osório de Cavacundo, e amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico.

E, por último, agradeço aos meus pais (em memória) e restante família e à minha esposa, Claudeth Silvina Ngueve, pelo seu grande contributo e apoio ao longo da minha formação e estadia aqui em Portugal.

Índice

<i>Listas de Figuras.....</i>	<i>x</i>
<i>Listas de Tabelas.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Nomenclatura.....</i>	<i>xvi</i>
<i>CAPÍTULO I - REGIME TÉRMICO DO GLOBO TERRESTRE.....</i>	<i>1</i>
<i>1.1 Introdução.....</i>	<i>1</i>
<i>1.2 Distribuição mundial da densidade de fluxo de calor.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.1 Densidade de fluxo de calor nos oceanos.....</i>	<i>6</i>
<i>1.2.2 Densidade de fluxo de calor nos continentes.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3 Fontes de calor da Terra.....</i>	<i>9</i>
<i>1.4 Processos de transferência de calor.....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.1 Transferência por condução</i>	<i>12</i>
<i>1.4.2 Transferência por convecção.....</i>	<i>13</i>
<i>1.4.3 Transferência por radiação.....</i>	<i>14</i>
<i>1.5 Fenómenos de produção de calor.....</i>	<i>15</i>
<i>CAPÍTULO II - DETERMINAÇÕES DA DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR NA REGIÃO SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL.....</i>	<i>18</i>
<i>2.1 Introdução.....</i>	<i>18</i>
<i>2.2 Esboço geológico e tectónico da região sul de Portugal Continental.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3 Breve resumo dos trabalhos já realizados.....</i>	<i>22</i>
<i>2.4 Determinações da temperatura e gradiente geotérmico em furo.....</i>	<i>29</i>
<i>2.5 Determinação da condutividade térmica em amostras rochosas.....</i>	<i>30</i>

2.6	<i>Cálculo da densidade de fluxo de calor.....</i>	35
2.7	<i>Cálculo da temperatura a diferentes profundidades.....</i>	40
CAPÍTULO III - NOVAS DETERMINAÇÕES DA DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR NA REGIÃO SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL.....		42
3.1	<i>Introdução.....</i>	42
3.2	<i>Cálculo da densidade de fluxo de calor com novos dados</i>	46
CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS VALORES DA DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR OBTIDO.....		52
4.1	<i>Discussão e interpretação dos valores da DFC obtidos.....</i>	52
4.2	<i>Conclusões gerais</i>	54
	<i>Referências</i>	57
	<i>Anexo 1</i>	62
	<i>Anexo 2.....</i>	68

LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1: (a) Distribuição mundial das determinações da DFC. (b) Determinações de DFC no Continente Africano. (c) Determinações da DFC na Europa (adaptado de Davies e Davies (2010)).*.....4
- Figura 2: O mesmo que na Fig. 1 mas com inclusão de dados de DFC de Pollack et al. (1993)(pontos azul)(adaptado de Davies (2010)).*.....4
- Figura 3: DFC em função da idade da crosta oceânica em milhões de anos. Os círculos representam o valor da densidade de fluxo de calor. As cruzes representam valores médios para um intervalo de 1 Ma e estão ligadas pela curva a tracejado. A curva sólida corresponde à densidade de fluxo de calor esperado a partir de modelos de formação da litosfera oceânica (adaptado de Brown et al. (1981)).*.....7
- Figura 4: Valores da DFC obtidos em continentes num intervalo de tempo relativamente extenso. No gráfico observa-se uma sobreposição do fluxo de calor em função da idade do último acontecimento tectónico (adaptado de Fowler, (2005)).*.....8
- Figura 5: Densidade de fluxo de calor global nos oceanos e nos continentes (adaptado de Davies e Davies (2010)).*.....9
- Figura 6: Mapa geológico simplificado de Portugal Continental. O rectângulo a vermelho representa a área de estudo apresentada nos Capítulos III e IV (adaptado de Ramalho e Correia (2006)).*.....21
- Figura 7: Esboço geotectónico da região sul de Portugal Continental. II – Bacias Meso-Cenozóicas Ocidental e Meridional; III – Bacias Terciárias do Tejo e Sado; F.F.O=Cavalgamento Ferreira- Ficalho (adaptado de Correia e Ramalho, 1999).*.....22
- Figura 8: Mapa de DFC para Portugal Continental. Valores em mW/m^2 (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).*.....24

<i>Figura 9: Mapa de gradiente geotérmico para Portugal Continental em K/m (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10: Mapa de temperatura a 500 m de profundidade em Portugal sul Continental em °C (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11: Mapa de temperatura a 1000 m de profundidade em Portugal sul Continental em °C (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12: (a) Mapa da densidade de fluxo de calor para a região sul de Portugal Continental. Círculos e quadrados indicam a localização dos furos onde foi calculada a DFC. As linhas de igual DFC estão em mWm⁻². (b) Modelo geotérmico construído ao longo do perfil NS do mapa de densidade de fluxo de calor apresentado em (a). Detalhes quanto à construção do modelo geotérmico podem ser consultados em Correia e Safanda (2002).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13: Distribuição da temperatura ao longo do perfil NS da Fig. 12(a). Valores em °C (adaptado de Correia e Safanda (2002)).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14: Localização dos 19 furos seleccionados a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP). Os números dos furos são os mesmos da Tabela 4.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 15: Exemplo de armazenamento de testemunhos de um furo (Amaral, 2011)...</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16: Fotografia da sonda sobre testemunho para efeito de determinação da condutividade térmica.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 17: A - Preparação dos testemunhos para determinação laboratorial da condutividade térmica; B - Aspecto das superfícies polidas; C - Aparelho ISOMET 2104 (adaptado de Amaral (2011)).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18: A - Equipamento ISOMET 2104 a efectuar leituras de condutividade térmica; B - Sonda superficial plana sobre testemunho cilíndrico (adaptado de Amaral, 2011).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19: Valores de gradiente geotérmico para a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) em °C/km.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20: Valores da DFC na região sul de Portugal Continental em mWm⁻².....</i>	<i>39</i>

<i>Figura 21: Temperatura a 500 m de profundidades na região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) em °C.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 22: Fotografia da cabeça dos furos 117, 118, 119 120.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 23: Fotografia da cabeça dos furos 123, 125 129, 132 e 133.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 24: Mapa geológico da região sudeste de Portugal Continental (adaptado de Serviços geológicos de Portugal (1992)) com a localização dos 9 furos seleccionados e apresentados na Tabela 10 (círculos a azul).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 25: Valores de gradiente geotérmico para a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) em °C/km para 7 dos 9 furos considerados (números e círculos pretos representam os dados já estudados; números e círculos azuis representam os novos dados).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 26: Valores da DFC na região sul de Portugal Continental em mWm⁻² para 7 dos 9 furos considerados (números e círculos pretos representam os dados já estudados; números e círculos azuis representam os novos dados).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27: Valores da temperatura aos 500 m de profundidade para 7 dos 9 furos considerados (números e círculos pretos representam os dados já estudados; números e círculos azuis representam os novos dados).....</i>	<i>50</i>

LISTAS DE TABELAS

<i>Tabela 1: Densidade de fluxo de calor e calor perdido em diferentes regiões da Terra (adaptado de Fowler (2005)).....</i>	<i>5</i>
<i>Tabela 2: Valores médios da DFC para diferentes crustas oceânicas com idades diferentes. N, número de medições, Q densidade de fluxo de calor médio, σ desvio padrão (adaptado de Brown et al. (1981)).</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 3: Taxas de produção de calor (A), meias vidas e concentrações de isótopos radioactivos existentes no interior da Terra (adaptado de Turcotte e Schubert (2004)).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 4: Referência e coordenadas dos 19 furos de prospecção mineira. Prof. é a profundidade de cada furo, n é o número de leituras de temperatura efectuadas e Gr o gradiente geotérmico respectivamente, calculados a partir das temperaturas obtidas ao longo de um troço seleccionado.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 5: Condutividades térmicas médias assumidas para alguns materiais rochosos atravessados por furos de Portugal Continental (adaptado de Cermak e Rybach (1982)).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 6: Resumo relativa a algumas características dos furos e propriedades determinadas (número, referência, observações, litologia geral, profundidade, gradiente geotérmico).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 7: Resumo relativa algumas características dos furos da Tabela 6 (número, referência, condutividade térmica, densidade de fluxo de calor, produção de calor, temperatura a 500 m de profundidade).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 8: Valores da produção de calor média por unidade de volume medidos laboratorialmente para diferentes materiais rochosos do território de Portugal Continental (segundo Correia et al., 1993; Correia, 1995; Correia e Jones,1997) e utilizados para calcular a temperatura a 500 m de profundidade.</i>	<i>37</i>

<i>Tabela 9: Valores assumidos de produção de calor média por unidade de volume (A) para diferentes materiais rochosos (segundo Cermak e Rybach, 1982) e utilizados para calcular a temperatura a 500 m de profundidade.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 10: Referência e coordenadas dos 9 furos onde foi calculada a densidade de fluxo de calor. Prof. - profundidade do furo. n - número de leituras utilizadas para calcular o gradiente de temperatura. Gr - gradiente de temperatura.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 11: Resumo das características e litologia simplificada dos 9 furos utilizados, excepto para os furos 117 e 112. O número/referência é o considerado no projecto "Investigação dos recursos geotérmicos da Extremadura (Espanha), Alentejo e Região Centro (Portugal) PROMOEENER A4E".</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 12: Resumo das características térmicas de 7 dos 9 furos e temperatura a 500 m de profundidade.....</i>	<i>47</i>

Nomenclatura

q – Densidade de fluxo de calor medido à superfície da Terra

Q – Densidade de fluxo de calor ao longo de uma placa.

A – Produção de calor por decaimento radioactivo à superfície da Terra

d – Espessura de uma determinada placa

k, λ – Condutividade térmica

T_0 – Temperatura à superfície da Terra

T – Temperatura

z – Profundidade

V – Velocidade

V_p – Velocidade de propagação das ondas sísmicas P

R_a – Número de Rayleigh

g – A aceleração de gravidade

α – Coeficiente de expansão térmica

ν – Viscosidade cinemática

ΔT – Gradiente vertical de temperatura

R – Quantidade de energia transmitida

σ – Constante de Stefan

C^U – Concentração em urânio

C^{Th} – Concentração em tório

C^K – Concentração em potássio

CAPÍTULO I

REGIME TÉRMICO DO GLOBO TERRESTRE

1.1 Introdução

Desde há muitos anos a Terra tem sido encarada como uma máquina térmica. Muitos dos fenómenos térmicos que ocorrem no seu interior têm influenciado variações na atmosfera e na hidrosfera. O balanço térmico terrestre controla fenómenos que ocorrem na litosfera e na astenosfera, bem assim como no interior do planeta.

O balanço energético entre o calor que chega a superfície da Terra proveniente do Sol e o calor de origem terrestre (calor proveniente do núcleo e do manto transportado até a litosfera por convecção e condução) influencia os fenómenos físicos e químicos (e mesmo biológicos) que ocorrem desde pequenas profundidades até profundidades da ordem da base da litosfera. O Sol emite radiação com diferentes comprimentos de onda. Parte dessa radiação incidente na superfície da Terra é reflectida para o espaço; outra é absorvida pela atmosfera e, novamente, absorvida e/ou reflectida pelas nuvens quer para o espaço quer para a superfície terrestre; desta, parte é absorvida pelo solo alimentando, assim, vários ciclos vegetativos e naturais. Dependendo do seu comprimento de onda, a porção da energia térmica que penetra no solo pode atingir várias dezenas de metros de profundidade. Os efeitos da energia solar são desprezados quando se consideram fenómenos energéticos terrestres de grande intensidade como, por exemplo, a geração do campo magnético terrestre ou o movimento das placas litosféricas; estes fenómenos são consequência das elevadas temperatura do interior da Terra e do fluxo de energia do interior para a sua superfície.

Os vários fenómenos geofísicos e geológicos que ocorrem no interior da Terra são devidos à influência da temperatura e da pressão.

Na verdade, fenómenos como a tectónica de placas, a sismicidade, o vulcanismo, o metamorfismo, a orogenia e a maturação de hidrocarbonetos ocorrem em escalas espaciais e temporais diferentes e são controlados pela transferência e geração de calor.

Para o conhecimento da distribuição das fontes de calor e do regime térmico no interior da Terra muito têm contribuído disciplinas como a sismologia, a gravimetria e o magnetismo. Por outro lado, para estudar o comportamento mecânico dos materiais no interior do globo terrestre é necessário compreender a sua estrutura e regime térmicos, uma vez que o comportamento reológico dos materiais depende da temperatura; em particular, a reologia do manto depende do modo como a temperatura varia com a profundidade e aquela, por sua vez, é função da taxa de transferência da energia térmica do interior para o exterior da Terra.

De maneira geral, pode ainda dizer-se que as variações das propriedades físicas dos materiais, como as propriedades magnéticas, eléctricas, a densidade, a resistividade eléctrica e a resistividade térmica, e das propriedades geoquímicas são originadas pela distribuição e variação da temperatura e da pressão no interior da Terra. Assim, o estudo do regime térmico global é fundamental para conhecer as características, a evolução geológica e geofísica temporal e espacial, e a estrutura interna da Terra.

Para o estudo da distribuição da temperatura e do regime térmico do interior do globo terrestre a grandeza fundamental é a chamada densidade de fluxo de calor (DFC), a qual é calculada a partir de determinações de temperatura no interior de furos (de petróleo, de prospecção mineira e de prospecção hidrogeológica) e da condutividade térmica medida em amostras rochosas atravessados por esses furos.

No presente capítulo serão descritos, ainda que de maneira sumária, a distribuição mundial da densidade de fluxo de calor e, em particular, densidade de fluxo de calor nos oceanos e nos continentes, as fontes de calor da Terra e os vários processos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) na Terra.

1.2 Distribuição mundial da densidade de fluxo de calor

A densidade de fluxo de calor tem sido determinada em diferentes partes do globo terrestre; contudo, em algumas regiões ainda não existem determinações desse parâmetro. Na Antártida e em muitos países do interior de África, da América do Sul e em muitas zonas da Ásia não existem dados da DFC (Fig.1(a)).

Os resultados das primeiras medições da DFC em continentes foram apresentados por Benfield (1939), na Grã – Bretanha, e por Bullard (1939) na África do Sul. As primeiras medições obtidas no Oceano Pacífico foram realizadas por Revell e Maxwell (1952) que utilizaram um instrumento desenvolvido por Bullard para determinações da densidade de fluxo de calor no fundo dos oceanos. Em 1954 Bullard apresentou dados de DFC obtidos no Oceano Atlântico.

Nos anos 60 e 70 do século passado o número de determinações da DFC aumentou significativamente; Cermak et al(1979) apresentou um mapa da DFC para a Europa; aí foram utilizados 2590 dados da DFC obtidos em áreas continentais e 486 obtidos em áreas oceânicas. Chapman e Pollack (1980) apresentaram 7217 dados da densidade de fluxo de calor, sendo 2808 obtidos em regiões continentais e 4409 em zonas oceânicas.

A distribuição espacial da densidade de fluxo de calor é fortemente heterogênea; por outro lado, há zonas com poucos dados (antiga Jugoslávia, Bélgica, Holanda, Mar Báltico, parte central do atlântico Norte, Península Ibérica) e zonas com uma grande concentração (Alemanha, República Checa, Eslováquia, Itália e Polónia).

Com todos estes dados foi possível determinar uma média dos valores obtidos tendo em vista estimar a perda global de calor pela Terra (Simmons e Horai (1968); Lee (1970); Kappelmeyer e Haenel (1974); Chapman e Pollack (1975). O valor médio obtido foi cerca de 60 mWm^{-2} ; havendo uma igualdade entre o valor médio do fluxo de calor obtido em zonas continentais e obtidos em zonas. A perda de calor global pelo globo terrestre é de cerca de $3 \times 10^{13} \text{ W}$.

Davies e Davies (2010) usaram 38347 dados da DFC (16333 obtidos em continentes e 22014 obtidos em oceanos) para criar o mapa global da densidade de fluxo de calor. Na Fig. 1 mostra-se a distribuição das determinações da DFC no globo terrestre. Como se pode constatar, a distribuição da DFC é ainda muito heterogênea. Na Fig. 2 pode ver-se um mapa da densidade de fluxo de calor a nível global onde se incluem os dados de Pollack et al. (1993) (a azul).

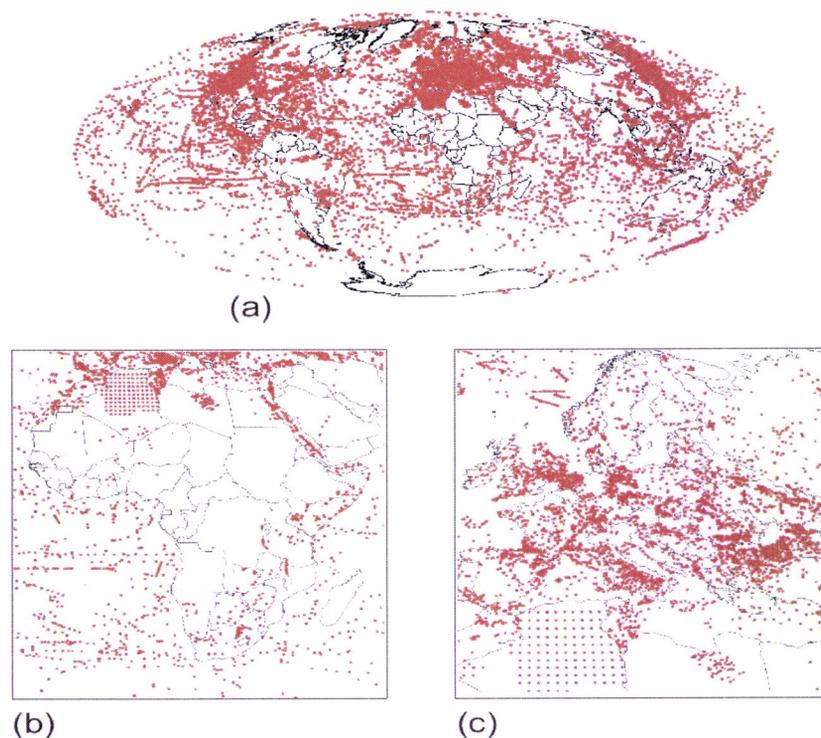


Figura 1: **(a)** Distribuição mundial das determinações da DFC. **(b)** Determinações de DFC no Continente Africano. **(c)** Determinações de DFC na Europa (adaptado de Davies e Davies (2010)).

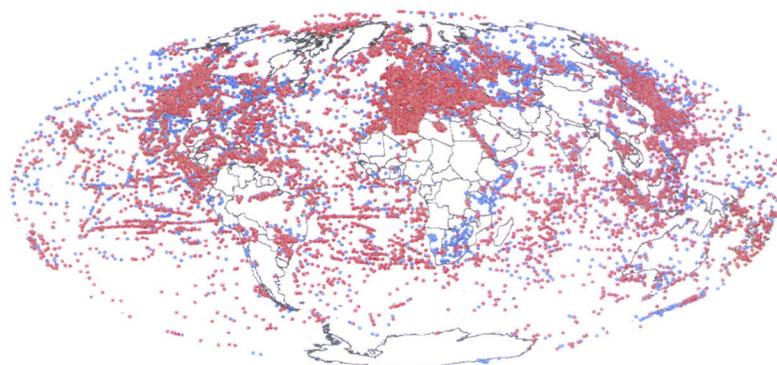


Figura 2: O mesmo que na Fig. 1 mas com inclusão de dados de DFC da Pollack et al (1993)(pontos azul)(adaptado de Davies e Davies (2010)).

O calor perdido através da superfície do planeta não está distribuído de modo uniforme. Na Tabela 1 apresenta-se a DFC e a quantidade de calor perdido para cada uma das áreas nela apresentadas; assim, 71% deste calor perdido ocorre nos oceanos. Esta perda de calor resulta da criação e arrefecimento da litosfera nas cristas médias oceânicas (Fowler, 2005).

Tabela 1: Densidade de fluxo de calor e calor perdido em diferentes regiões da Terra (adaptado de Fowler (2005)).

Região	Área (km ²) (x10 ⁶)	Fluxo de calor médio (mWm ⁻²)	Calor perdido (W) (x10 ¹²)
Continentes (pós - Arcaico)	142	63	9,0
Arcaico	13	52	0,7
Plataformas continentais	46	78	3,5
Área continental total	201	65 ± 1,6	13,1 ± 0,3
Oceanos (incluindo bacias sedimentares)	309	101 ± 2,2	31,2 ± 0,7
Total	510	87,0 ± 2,0	44,2 ± 1,0

Enquanto na litosfera a transferência de calor é realizada, fundamentalmente, por condução, no manto a transferência de calor realiza-se por convecção. A estimativa de transporte de calor por convecção é de, aproximadamente, 65% do calor total perdido pelo globo terrestre para o exterior; esta estimativa inclui a criação de placas litosféricas em oceanos e a actividade magmática e vulcânica nos continentes.

A estimativa do calor gerado por decaimento radioactivo na crosta é, aproximadamente, 17% do calor perdido. Apesar das regiões oceânicas mais jovens representarem um terço de área da superfície da Terra, elas contribuem com metade do calor perdido a nível global. Cerca de um terço de calor perdido em regiões oceânicas é por convecção hidrotermal. A estimativa do calor perdido no núcleo é 10¹² W a 10¹³ W.

1.2.1 Densidade de fluxo de calor nos oceanos

Os oceanos são caracterizados como a área de maior DFC; na verdade, perto das cristas médias oceânicas a DFC varia entre 100 a 200 mWm^{-2} , diminuindo à medida que nos afastamos delas; nos oceanos antigos verifica-se uma diminuição da DFC para valores da ordem de 50 mWm^{-2} (Brown et al., 1981(a)).

Os valores médios da DFC nos oceanos aproximam-se dos valores teóricos calculados a partir de modelos geotérmicos de evolução da litosfera continental para idades não inferiores a 70 Ma; contudo, nas regiões litosféricas mais jovens os valores obtidos para a DFC são superiores aos previstos teoricamente (Fig. 3). As medições de DFC são feitas considerando apenas transferências de calor por condução. Porém, Lister (1972) apresentou um modelo que considera uma crosta ígnea oceânica muito permeável atravessada por fendas que permitem a circulação de água do mar dando origem a transferência de calor por convecção.

Como se pode observar na Fig. 3, a DFC, a partir das cristas oceânicas, decresce com o aumento da idade da crosta oceânica. Todos os oceanos mostram uma distribuição similar de DFC. Assim, nos oceanos com uma idade até cerca de 35 Ma a DFC varia no tempo e mantém-se, aproximadamente constante para os oceanos com cerca de 65 Ma (Brown et al., 1981(a)).

Vários modelos geofísicos têm sido desenvolvidos para estudar a relação entre a densidade de fluxo de calor e a idade da crosta oceânica. Na Tabela 2 apresentam-se, de maneira resumida, os valores médios da DFC para diferentes idades correspondentes a diferentes modelos de crosta oceânica.

Tabela 2: Valores médios da DFC para diferentes crustas oceânicas com idades diferentes. N, número de medições, Q densidade de fluxo de calor médio, σ desvio padrão (adaptado de Brown et al. (1981)).

Idade (Ma)	0-4	4-9	9-20	20-35	35-52	52-65	65-80	80-95	95-110	110-125	125-140	140-160	> 160
N	506	444	470	304	252	265	277	204	193	162	178	66	26
Q (mWm^{-2})	149	117	71	60	57	62	57	54	54	55	49	49	50
σ (mWm^{-2})	126	180	53	38	35	31	28	20	17	21	16	16	25

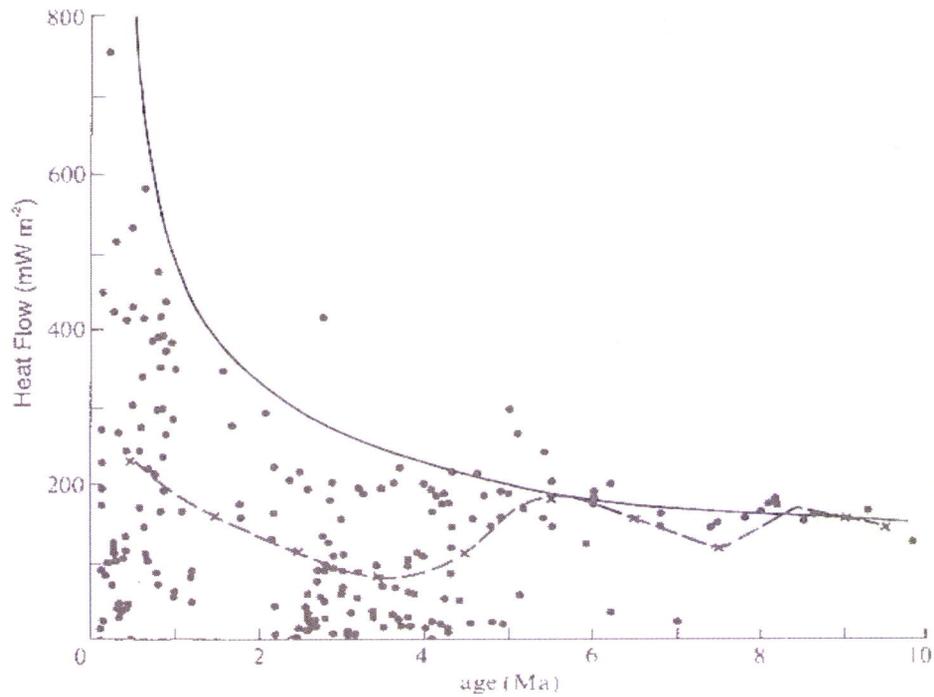


Figura 3: DFC em função da idade da crosta oceânica em milhões de anos. Os círculos representam o valor da densidade de fluxo de calor. As cruzes representam valores médios para um intervalo de 1 Ma e estão ligadas pela curva a tracejado. A curva sólida corresponde à densidade de fluxo de calor esperado a partir de modelos de formação da litosfera oceânica (adaptado de Brown et al. (1981(a))).

1.2.2 Densidade de fluxo de calor nos continentes

A distribuição da densidade de fluxo de calor nos continentes e nos oceanos é diferente; na verdade, a litosfera continental é muito mais heterogênea do que a litosfera oceânica devido a sua longa evolução geológica, geofísica e tectónica. Isto leva a que seja mais difícil medir a densidade do fluxo de calor nos continentes do que nos oceanos. Por outro lado, o fluxo de calor nos continentes é muito influenciado pelos processos de diferenciação magmática que levam a um aumento das concentrações em urânio, tório e potássio; o aumento destas dá origem a um aumento da densidade de fluxo de calor.

O fluxo de calor nos continentes é influenciado por vários factores como, por exemplo, a erosão de áreas elevadas, a deposição de sedimentos em bacia sedimentares, a glaciação, a concentração local de elementos radioactivos que, por decaimento radioactivo, originam geração de calor na crosta, a presença ou ausência de aquíferos; o valor da densidade do fluxo de calor nos continentes é também influenciado pelo fluxo de calor proveniente do manto quer por condução quer por convecção.

Na Fig. 4 apresenta-se a variação da DFC em função da idade da crosta Continental.

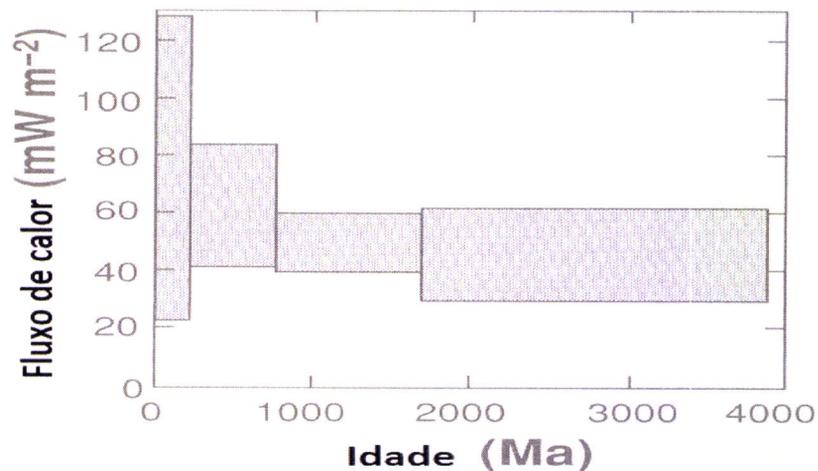


Figura 4: Valores da DFC obtidos em continentes num intervalo de tempo relativamente extenso. No gráfico observa-se uma sobreposição do fluxo de calor em função da idade do último acontecimento tectónico (adaptado de Fowler, (2005)).

Na Fig. 4 pode observar-se que os valores entre de 40 e 60 mWm^{-2} aparecem sobrepostos ao longo do tempo. A maior dispersão de valores da DFC verifica-se nas regiões onde a crosta continental é mais jovem. O valor médio da DFC varia entre 70 e 80 mWm^{-2} nas regiões onde a crosta continental é mais jovem e diminui para valores entre 40 e 50 mWm^{-2} nas regiões onde a crosta continental é mais antiga. Estes valores indicam que a litosfera continental arrefece aumentando a sua espessura ao longo do tempo. Esta diminuição da DFC pode ter como origem a remoção de elementos radioactivos devido a fenómenos de erosão e lixiviação.

Na Fig. 5 pode observar-se um histograma da distribuição da DFC nos continentes e nos oceanos. Os valores mais elevados encontram-se nos oceanos.

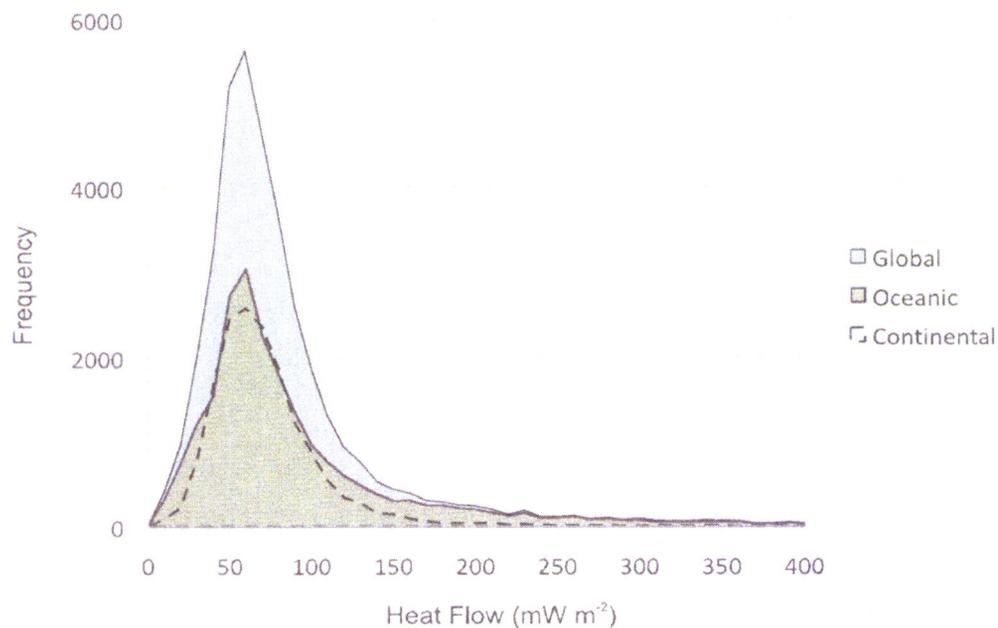


Figura 5: Densidade de fluxo de calor global nos oceanos e nos continentes (adaptado de Davies e Davies (2010)).

1.3 Fontes de calor da Terra

Há mais de 4600 Ma a formação da Terra começou com a agregação de material proveniente da condensação da chamada nublosa solar primitiva (NSP), cujos fragmentos maiores deveriam ter alguns quilómetros de diâmetro. Os processos de aumento do volume da Terra (acrecção), provavelmente, ocorreram de maneira rápida quando a Terra aumentou o seu campo gravitacional (Brown et al, 1981(a)).

Quando os fragmentos resultantes da condensação da nublosa solar primitiva começaram a colidir com a Terra primitiva, por acção gravítica, a sua energia cinética foi transformada em calor causando, assim, um aumento da temperatura. Durante os primeiros estágios de acreção, quando a massa da Terra ainda era relativamente pequena, o aumento da temperatura foi também pequeno.

Contudo, à medida que a massa da Terra foi aumentando, os materiais voláteis ficaram aprisionados no seu interior e a transferência da energia térmica para o exterior passou a ser mais lenta dando origem a um aumento progressivo da temperatura ao mesmo tempo que se dava uma diferenciação gravítica dos materiais acumulados ao longo dos milhões de anos da sua formação. A estrutura térmica actual da Terra está, portanto, relacionada com a sua formação e composição.

De maneira geral pode então dizer-se que a actual estrutura térmica da Terra é o resultado, em primeiro lugar, da energia térmica acumulada durante o período inicial da sua formação. Mais tarde, a essa energia somou-se a energia térmica resultante de fenómenos de natureza geoquímica (diferenciação química que deu origem a elementos radioactivos que, por decaimento, geraram calor), a fenómenos de natureza gravítica (diferenciação de elementos mais densos e menos densos), os quais deram origem à crosta, ao manto e ao núcleo terrestres, e a fenómenos de natureza tectónica. Hoje acredita-se que a Terra está a diminuir a sua temperatura no seu interior.

Um aspecto importante resultante do actual regime térmico da Terra é a transferência de calor por convecção no manto. Na verdade, à medida que o calor é transportado do manto para a crosta terrestre, há um aumento da densidade dos materiais mantélicos que, por acção gravítica, se afundam à medida que materiais menos densos avançam para a superfície; este movimento dá então origem a correntes de convecção no manto que, em termos de transferência de energia, são mais eficientes que a transferência de calor apenas por condução. Há assim uma transformação de energia potencial gravítica em energia térmica.

Uma das fontes de calor da Terra tem origem no decaimento de elementos radioactivos de vida longa, como sejam o ^{238}U , o ^{235}U , o ^{232}Th e o ^{40}K . Na Tabela 3 são apresentadas as taxas de produção de calor por decaimento radioactivo associadas aqueles elementos radioactivos, bem assim como as meias vidas de cada um deles. As taxas de produção de calor para o urânio natural (U) e potássio natural (K) são também apresentados na Tabela 3.

O urânio existente na Terra é composto por 99,28% de ^{238}U e 0,71% de ^{235}U . O Tório natural é 100 % de ^{232}Th e o potássio natural é composto por 0.0119 % de ^{40}K (Turcotte e Schubert, 2004).

Tabela 3: Taxas de produção de calor (A), meias vidas e concentrações de isótopos radioactivos existentes no interior da Terra (adaptado de Turcotte e Schubert (2004)).

Isótopos	Produção de calor	Meias vidas	Concentração
	A	Meia vida	Concentração
	(W kg ⁻¹)	(Anos)	(kg kg ⁻¹)
²³⁸ U	9,46x10 ⁻⁵	4,47x10 ⁹	30,8x10 ⁻⁹
²³⁵ U	5,69x10 ⁻⁴	7,04x10 ⁸	0,22x10 ⁻⁹
U	9,81x10 ⁻⁵		31,0x10 ⁻⁹
²³² Th	2,64x10 ⁻⁵	1,40x10 ¹⁰	124x10 ⁻⁹
⁴⁰ K	2,92x10 ⁻⁵	1,25 x10 ⁹	36,9x10 ⁻⁹
K	3,48x10 ⁻⁹		31,0x10 ⁻⁵

A taxa de produção de calor A de uma dada rocha a partir das concentrações de elementos radioactivos pode obter-se utilizando a Eq. 1.5.

1.4 Processos de transferência de calor

O calor (ou a energia térmica) pode ser transferido por três processos: condução, convecção e radiação. Na condução e convecção é necessário a presença do material para que isso aconteça; no caso da radiação a energia pode também efectuar-se através do vácuo ou espaço. A condução é o processo de transferência de energia térmica mais importante em materiais sólidos; assim, este é o processo mais importante na transferência de calor na crosta e na litosfera. Quando associada à transferência de energia térmica está também associada uma transferência de massa diz-se que há convecção. A convecção é um processo de transferência de energia térmica mais eficiente do que a condução. No manto terrestre a transferência de calor faz-se por condução mas também por convecção; aí, contudo, a convecção é muito lenta apesar de muito eficiente já que estão envolvidas grandes massas de materiais rochosos. Contudo, é importante reconhecer que o manto se comporta como um fluido viscoso para fenómenos de grande escala temporal (convecção que está associada ao movimento das placas litosféricas) e como um sólido para fenómenos de pequena escala temporal como a propagação de ondas sísmicas.

A convecção é também muito importante na transferência de calor no núcleo externo, onde se pensa serem geradas as correntes de convecção que dão origem ao campo magnético terrestre. O núcleo interno comporta-se como um meio sólido.

A radiação é um processo em que a transferência de energia se faz por intermédio de radiação electromagnética e, daí, não haver necessidade de um meio para ela se realizar. No interior da Terra a radiação só é importante para fenómenos que ocorrem a temperaturas da ordem do milhar de graus Celsius, ou seja, para regiões do núcleo terrestre.

1.4.1 Transferência por condução

O fenómeno de transferência de calor por condução faz-se por transferência de energia cinética entre os átomos e as moléculas que formam um dado material.

Em termos macroscópicos a transferência de calor entre dois corpos a temperatura diferente realiza-se do que está a maior temperatura para o que está a menor temperatura. A taxa de transferência de calor é directamente proporcional ao gradiente de temperatura (variação da temperatura em função do comprimento).

Na condução a taxa de transferência da energia térmica é tanto maior quanto maior for o gradiente de temperatura. Para uma placa infinitamente longa com uma espessura d , com uma das faces à temperatura T_1 e a outra face à temperatura T_2 (com $T_2 > T_1$), a quantidade de calor que é transferida por condução por unidade de área e por unidade de tempo é proporcional a

$$\frac{T_2 - T_1}{d} . \quad \text{Eq .1.1}$$

Assim, a densidade de fluxo de calor Q através da placa é dado por:

$$Q = k \frac{T_2 - T_1}{d} \quad \text{Eq .1.2}$$

onde k é uma constante de proporcionalidade chamada condutividade térmica.

Esta é uma propriedade física dos materiais que traduz a maior ou menor facilidade com que a transferência de energia térmica por condução se realiza através deles; depende do tipo de rocha ou material, da estrutura cristalina, da temperatura, da pressão, da mineralogia e da orientação dos cristais nas rochas e da textura das rochas. A unidade da condutividade térmica é W/mK.

A densidade de fluxo e calor tem por unidade watt por metro quadrado (Wm^{-2}). A condutividade térmica para as rochas varia entre 1,7 e cerca de $7,0 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

1.4.2 Transferência por convecção

O fenómeno de transferência de calor por convecção ocorre sempre que a massa de um dado fluido, a maior temperatura, é transportada para uma região em que a temperatura é inferior; estes movimentos de massa ocorrem de maneira natural como uma consequência de uma diferença de densidades.

Dado que a transferência de calor por convecção se dá apenas em fluidos e as placas tectónicas ou placas litosféricas se movimentam à superfície do globo terrestre é de admitir que elas como que são arrastadas por movimentos de material que se comporta como um fluido; esse material constitui a astenosfera que se encontra no manto superior; contudo, o tipo de acoplamento entre a placas tectónicas e a astenosfera ainda não é completamente conhecido. Admite-se, porém que tanto na astenosfera como em todo o manto há correntes de convecção que transferem a energia térmica do núcleo terrestre para a litosfera.

Em rochas porosas e permeáveis ocorre também um fenómeno de convecção a que é hábito chamar de convecção hidrotermal; neste caso, e de maneira geral, o fluido é o magma ou fluidos com altas temperaturas provenientes de camadas mais profundas da crosta ou do manto superior.

A convecção é favorecida pela baixa viscosidade dos fluidos que se encontram a maior temperatura e pelo aumento do gradiente de temperatura.

A condição para a ocorrência da convecção de maneira natural é expressa através do chamado número de Rayleigh

$$R_a = \frac{g \cdot \alpha \Delta T}{\nu \cdot \lambda} d^3 \quad \text{Eq .1.3}$$

onde g é a aceleração de gravidade em m/s^2 , α o coeficiente de expansão térmica em K^{-1} , d é uma distância associada à superfície que está a temperatura mais elevada em m , ν é a viscosidade cinemática em m^2/s , λ é a difusividade térmica em m^2/s e ΔT é a diferença de temperatura em K . O número de Rayleigh não tem dimensões e constitui um critério para determinar as condições de início de convecção.

1.4.3 Transferência por radiação

Os átomos podem existir em distintos estados de energia. O mais estável é o estado fundamental em que a energia é menor. Quando um átomo passa de um estado mais excitado para um estado de menor energia diz-se que se efectuou uma transição com libertação de energia pelo átomo sob a forma de energia electromagnética (ou radiação electromagnética). A física quântica mostra que essa quantidade de energia que é emitida é em quantidades discretas a que se dá o nome de *quanta*, sendo um *quantum* a unidade fundamental de energia radiante. O comprimento de onda da radiação electromagnética associada a essas transições é proporcional à diferença de energia entre os dois estados (o mais excitado e o menos excitado).

A perda de energia térmica sob a forma de calor por radiação de um objecto a uma dada temperatura, R , é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta:

$$R = \sigma \cdot T^4 \quad \text{Eq .1.4}$$

onde R é a quantidade de energia emitida por um corpo (à temperatura absoluta T) por segundo e por unidade de área do corpo em Wm^{-2} , σ é conhecida por constante de Stefan e tem o valor $5,6704 \times 10^8 Wm^{-2}K^{-4}$ e T é a temperatura absoluta em K (Lowrie, 2007).

A quantidade de calor transferido por radiação é significativa apenas nos casos em que os corpos radiantes estão a temperaturas relativamente elevadas (da ordem de $10^3 K$).

Dois objectos que estejam a temperaturas diferentes, mesmo não estando em contacto, trocarão energia sob a forma de energia radiante até se atingir o equilíbrio térmico entre eles.

1.5 Fenómenos de produção de calor na Terra

Na litosfera a transferência de calor faz-se, essencialmente, por condução. Por outro lado, os fenómenos de convecção térmica realizam-se no manto e no núcleo externo.

As fontes de calor não estão distribuídas uniformemente no globo, o que quer dizer que o calor gerado no interior da crosta não é uniforme. No século XIX pensava-se que as fontes internas de calor no interior da Terra tinham como origem reacções químicas ou a conversão de energia potencial gravítica em calor. Outros processos, como a interacção do neutrino cósmico com a Terra (Hamza e Beck, 1972) e a deformação na Terra por forças gravíticas, resultantes das acções da Lua e do Sol, têm sido sugeridos como fontes internas de calor; contudo, a magnitude dessas fontes são consideradas muito pequenas para serem significativas. No início do século XX os geólogos deram-se conta que os elementos radioactivos urânio, tório e potássio que, de maneira geral, se encontram mais concentrados em rochas graníticas, eram uma fonte de calor importante na Terra, em particular, na sua região mais superficial, a crosta.

O calor nas rochas é gerado a partir do decaimento radioactivo de isótopos instáveis que libertam energia sob a forma de partículas alfa (α), partículas beta (β) e radiação gama (γ). A taxa de calor gerado dentro das rochas está relacionada com a quantidade de elementos radioactivos, com a taxa de decaimento e a energia das partículas. A energia e a taxa de decaimento dependem apenas das espécies de isótopos radioactivos. Assim a abundância absoluta de isótopos radioactivos numa dada rocha determina a taxa de produção de calor.

Cerca de 99% de calor radiogénico gerado no interior da Terra resulta do decaimento dos isótopos de urânio (^{235}U , ^{238}U), tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K).

Em termos comparativos, a energia proveniente do decaimento do urânio é relativamente grande em comparação com a do tório, que, por sua vez, é maior que a do potássio.

As concentrações em urânio, tório e potássio de uma rocha podem ser determinadas por espectroscopia de radiação gama ou por análise química elementar, e a produção de calor por unidade de volume pode ser calculada a partir da expressão (Rybach e Buntebarth, 1982)

$$A = \rho \cdot (9,52 \cdot C_U + 2,56 \cdot C_{Th} + 3,48 \cdot C_K) \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq .1.5}$$

onde A é a produção de calor em $\mu\text{W}/\text{m}^3$, ρ é a massa volúmica em kg/m^3 , C_U e C_{Th} são as concentrações em urânio e tório em ppm e C_K é a concentração em potássio em %.

A produção de calor na crosta média e superior pode ainda ser estimada usando a expressão empírica proposta por Rybach e Buntebarth (1982, 1984) que relaciona a produção de calor produzida por elementos radioactivos e a propagação da velocidade das ondas sísmicas P numa determinada região

$$\ln A = 12,6 - 2,17 \cdot V_p \quad \text{Eq .1.6}$$

onde \ln é o logaritmo natural, A é a produção de calor em $\mu\text{W}/\text{m}^3$ e V_p é a velocidade de propagação das ondas sísmicas P em m/s . Uma região da Terra em que se verifica uma variação linear de fluxo de calor com o calor gerado por decaimento de elementos radioactivos designa-se por província geotérmica.

CAPÍTULO II

DETERMINAÇÕES DA DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR NA REGIÃO SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL

2.1 Introdução

Os dados de temperatura obtidos em furos de água, de prospecção mineira e de prospecção de petróleo constituem um dos parâmetros mais importantes no estudo do regime térmico da crosta; permitem determinar o gradiente geotérmico e a densidade de fluxo de calor numa determinada região, desde que se conheçam ou sejam estimadas as condutividades térmicas das formações rochosas atravessadas pelos furos. Os estudos geotérmicos relacionados com a estimativa da densidade de fluxo de calor tiveram início na primeira metade do século XX com Bullard (1939) e com Birch e Clark (1940). Por motivos que se prendem, essencialmente, com o aumento dos preços dos combustíveis de origem fóssil, nas décadas de 80 e 90 do século passado assistiu-se a um aumento substancial dos estudos ligados à energia geotérmica tanto na Europa como em outros continentes. Foram, assim, disponibilizadas pelos diferentes estados verbas para o estudo e avaliação dos recursos geotérmicos dentro dos territórios dos seus países. Foi, por isso, possível obter uma grande quantidade de informação geotérmica quer de baixa quer de alta entalpia que, depois de devidamente tratada e processada, deu origem a vários atlas onde essa informação geotérmica foi publicada. Dessa informação fazem parte temperaturas e gradientes geotérmicos em furos e em fontes termais, valores da condutividade térmica e da difusividade térmica e da produção de calor para várias formações rochosas e valores da densidade de fluxo de calor calculadas para várias partes do globo terrestre.

Das publicações feitas para os países europeus destaca-se o “Atlas of the Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland” (Haenel e Staroste, 1988(a)).

Para além desta publicação, onde compilações para vários países europeus são apresentadas, muitas outras foram escritas descrevendo os vários estudos geotérmicos realizados em cada um dos países europeus; em particular, para Portugal Continental, vários trabalhos foram realizados e publicados por diferentes autores (Correia et al., 2002). Alguns dos dados neles publicados serão referidos e utilizados neste trabalho.

De maneira geral, todos os dados de temperatura que são descritos neste trabalho foram obtidos em furos com profundidades que variam entre oitenta e algumas centenas de metros e a partir dos quais são calculados os gradientes de temperatura ou gradientes geotérmicos. Os valores de condutividades térmicas usados foram determinados laboratorialmente ou assumidos de acordo com valores tabelados para rochas de tipo semelhante às atravessadas pelos furos. A densidade de fluxo de calor para cada furo é calculada combinando os gradientes de temperatura com as condutividades térmicas obtidas, estimadas ou assumidas para esses furos através da expressão

$$q = k. (\text{gradT}) \quad \text{Eq .2.1}$$

em que q é a densidade de fluxo de calor em Wm^{-2} , k é a condutividade térmica das formações rochosas atravessadas pelo furo em $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ e gradT é o gradiente geotérmico em K/m .

Deve referir-se que os dados geotérmicos que são descritos e apresentados, para além de poderem ser utilizados para determinar a densidade de fluxo de calor, podem, também, ser utilizados para estudar o clima no passado dando origem a uma disciplina da Climatologia a que é hábito chamar de “Paleoclimatologia geotérmica”; contudo, esta está fora do âmbito deste trabalho e não será novamente referida.

2.2 Esboço geológico e tectónico da região sul de Portugal Continental

Na Fig. 6 apresenta-se um mapa geológico simplificado de Portugal Continental; maior detalhe acerca das formações geológicas que afloram na região sul de Portugal Continental pode ser obtido no Mapa Geológico de Portugal Continental à escala 1:200.000 (Serviços Geológicos de Portugal, 1984, 1992).

De um ponto de vista tectónico existem duas grandes unidades geotectónicas na região sul de Portugal Continental: a Zona Ossa-Morena (ZOM) e a Zona Sul Portuguesa (ZSP) (Fig. 7). A diversidade geológica da região, que é rica em minérios metálicos, como o cobre e o zinco, pode influenciar o valor do gradiente térmico local.

A Zona Ossa-Morena apresenta formações rochosas do Pré-Câmbrico e do Paleozóico Inferior com deformação intensa causada por diferentes fases de deformação; apresenta ainda magmatismo e vulcanismo sin-orogénico. Na Zona Ossa-Morena, de nordeste para sudoeste, há uma zona de transição onde as rochas granitóides dão lugar a intrusões básicas com um carácter dominante calco-alcalino. Na Zona Sul-Portuguesa as formações geológicas mais antigas são do Paleozóico Superior, nomeadamente do Devónico Superior. O vulcanismo apresenta um carácter mais ácido do que na ZOM, e o plutonismo é quase inexistente; o metamorfismo é de baixo grau. De maneira geral pode dizer-se que entre a ZOM e a ZSP há uma estrutura tectónica diferente bem assim como uma evidente polaridade paleogeográfica.

As condições hidrogeológicas variam muito em função das estruturas locais (Serviços Geológicos de Portugal, 1989). As diferentes rochas apresentam permeabilidades muito variáveis; na parte norte da ZOM as formações paleozóicas têm baixa permeabilidade.

A intensa actividade tectónica que existe nas ZOM e ZSP pode ter influenciado o regime térmico local; na verdade, de acordo com Vitorello e Pollack (1980), cerca de 30% do calor residual em zonas cenozóicas e tectonicamente activas está associado à tectogénese e diminui em zonas pré-câmbricas.

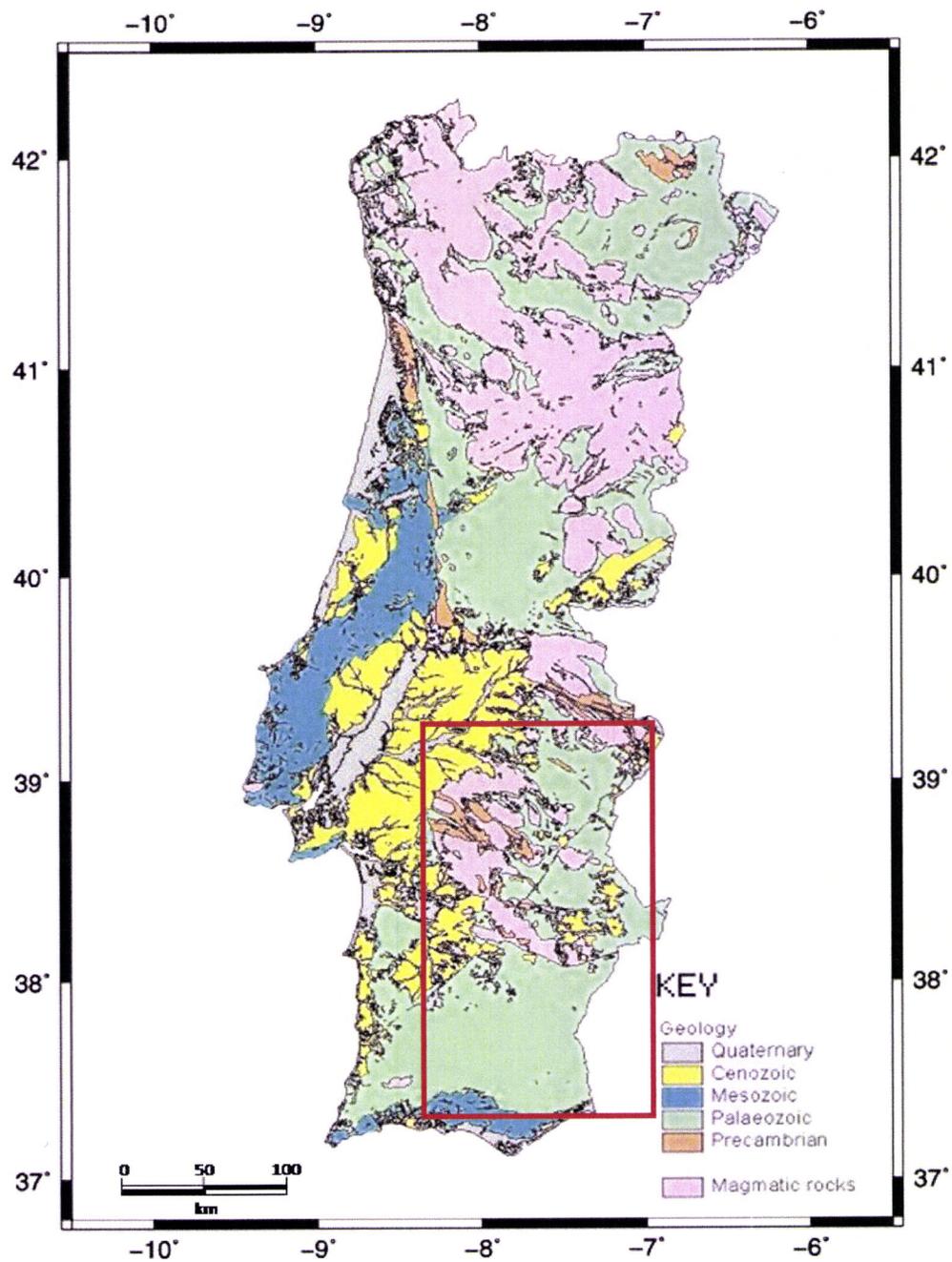


Figura 6: Mapa geológico simplificado de Portugal Continental. O rectângulo a vermelho representa a área de estudo apresentada nos Capítulos III e IV (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).

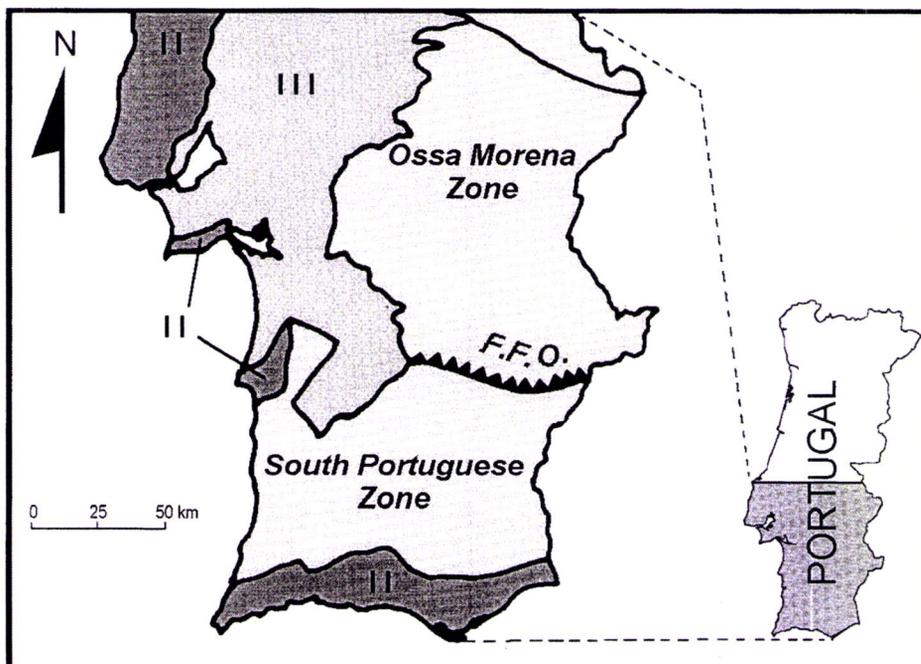


Figura 7: Esboço geotectónico da região sul de Portugal Continental. II – Bacias Meso-Cenozóicas Ocidental e Meridional; III – Bacias Terciárias do Tejo e Sado; F.F.O.=Cavalgamento Ferreira- Ficalho (adaptado de Correia e Ramalho (1999)).

2.3 Breve resumo dos trabalhos já realizados.

Os primeiros trabalhos geotérmicos em Portugal Continental, em particular na região sul, foram realizados por Correia et al. em 1982. Nesse trabalho foram apresentadas as primeiras medições de temperatura em furos de prospecção de água e/ou mineira para profundidades diferentes. Com os valores das condutividades térmicas das formações rochosas atravessadas pelos furos (medidas ou assumidas) foi possível calcular a densidade de fluxo de calor (DFC) e, assim, dar origem ao primeiro esboço de um futuro mapa de densidade de fluxo de calor para Portugal Continental. Dados geotérmicos publicados em Haenel e Staroste (1988(a)) deram origem ao primeiro mapa de DFC para a região do Alentejo. Os valores obtidos foram relativamente elevados e pareciam indicar a existência de uma anomalia geotérmica com valores de cerca de 160 mWm^{-2} .

Esta anomalia localizava-se perto da Vila de Ferreira do Alentejo e foi conhecida por anomalia geotérmica do Alentejo. As temperaturas em profundidade foram obtidas com termístores calibrados e resistências de platina.

Os dados geotérmicos recolhidos por Almeida (1991) em furos de prospecção mineira e de água, foram reprocessados e analisados por Ramalho e Correia (2006). Todos os dados geotérmicos até agora recolhidos encontram-se arquivados numa base de dados do antigo Instituto Geológico Mineiro, actual Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). A base de dados está em actualização permanente, o que permite preencher as lacunas de informação referentes aos furos existentes e adicionar informação de novos furos que, entretanto, for sendo recolhida; para além disso está disponível para todos que necessitam utilizá-la para fins científicos.

A base de dados tem um formato descrito por Ramalho (1999) e cumpre os padrões preconizados pela "International Heat Flow Commission" da "International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior". A densidade de fluxo de calor à superfície foi calculada apenas para os furos que apresentavam equilíbrio térmico e nenhuma evidência de circulação de água. Todos os furos com profundidades inferiores a 100 m foram rejeitados e considerados como inadequados para determinar a DFC. Todos os furos com um desvio padrão no gradiente térmico superior a 45% foram também considerados inválidos de acordo com Ramalho e Correia (2006). Por outro lado, os furos que, num dado troço da distribuição da temperatura em profundidade, tinham um mínimo de 6 valores medidos e um desvio padrão inferior a 45% ao longo de pelo menos 100 m foram usados para determinar a DFC através da Eq. 2.1. Foi, assim, possível elaborar um mapa da DFC para Portugal Continental (Fig. 8). Na Fig. 9 apresenta-se o mapa de gradiente geotérmico para cada um dos furos utilizados para determinar a DFC.

Conhecidos os valores da DFC, a condutividade térmica das formações rochosas e a produção de calor por unidade de volume foi possível calcular ou estimar a temperatura para diferentes profundidades por intermédio da expressão

$$T(z) = T_0 + \frac{qz}{k} - \frac{Az^2}{2k} \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde $T(z)$ é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$ para a profundidade z , em m, T_0 é a temperatura à superfície, em $^{\circ}\text{C}$, e A é a produção de calor em W/m^3 .

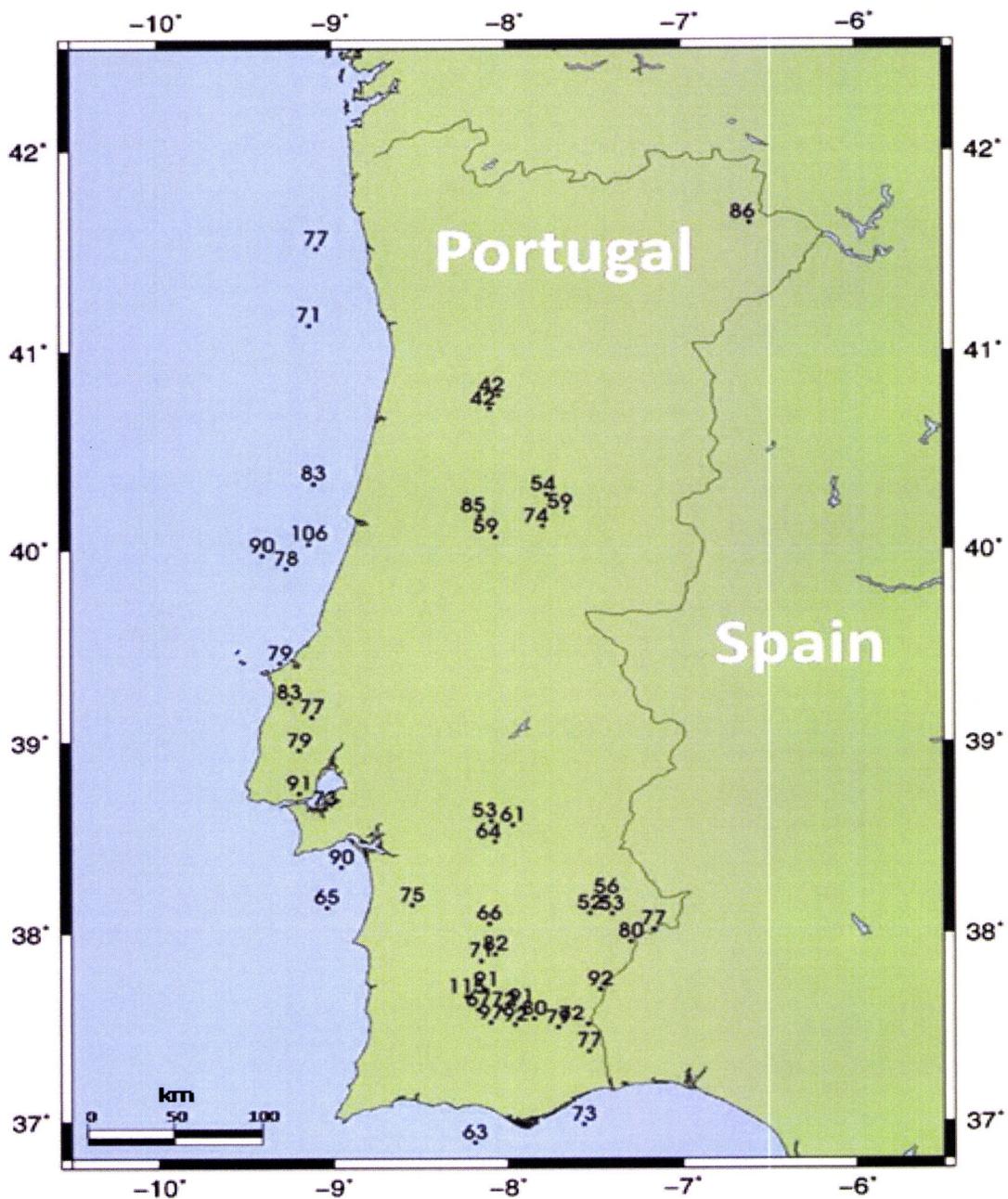


Figura 8: Mapa de DFC para Portugal Continental. Valores em mW/m^2 (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).

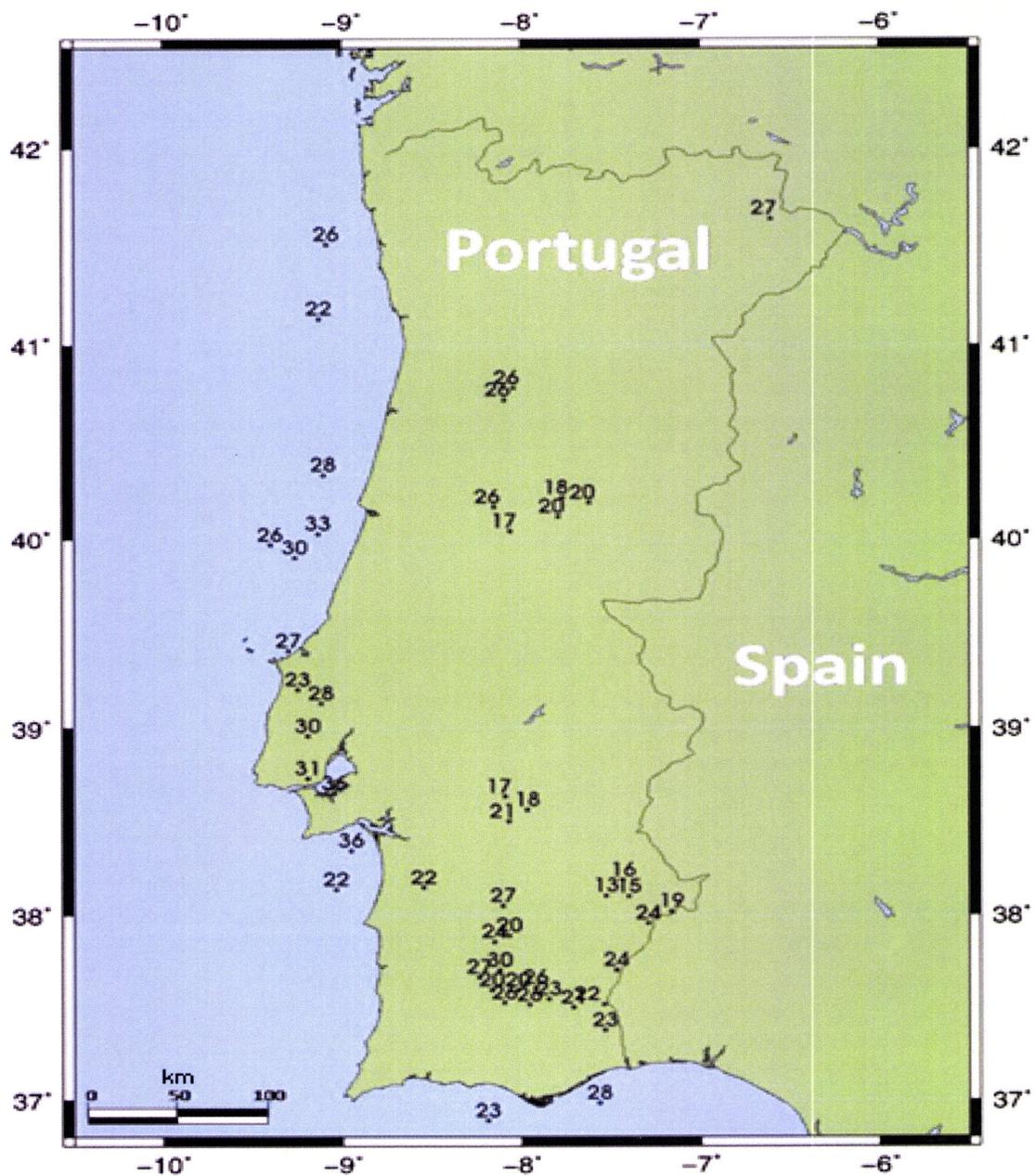


Figura 9: Mapa de gradiente geotérmico para Portugal Continental em K/m (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).

Na Fig. 10 e 11 apresentam-se os mapas de temperatura para Portugal Continental às profundidades de 500 e 1000 m, respectivamente.

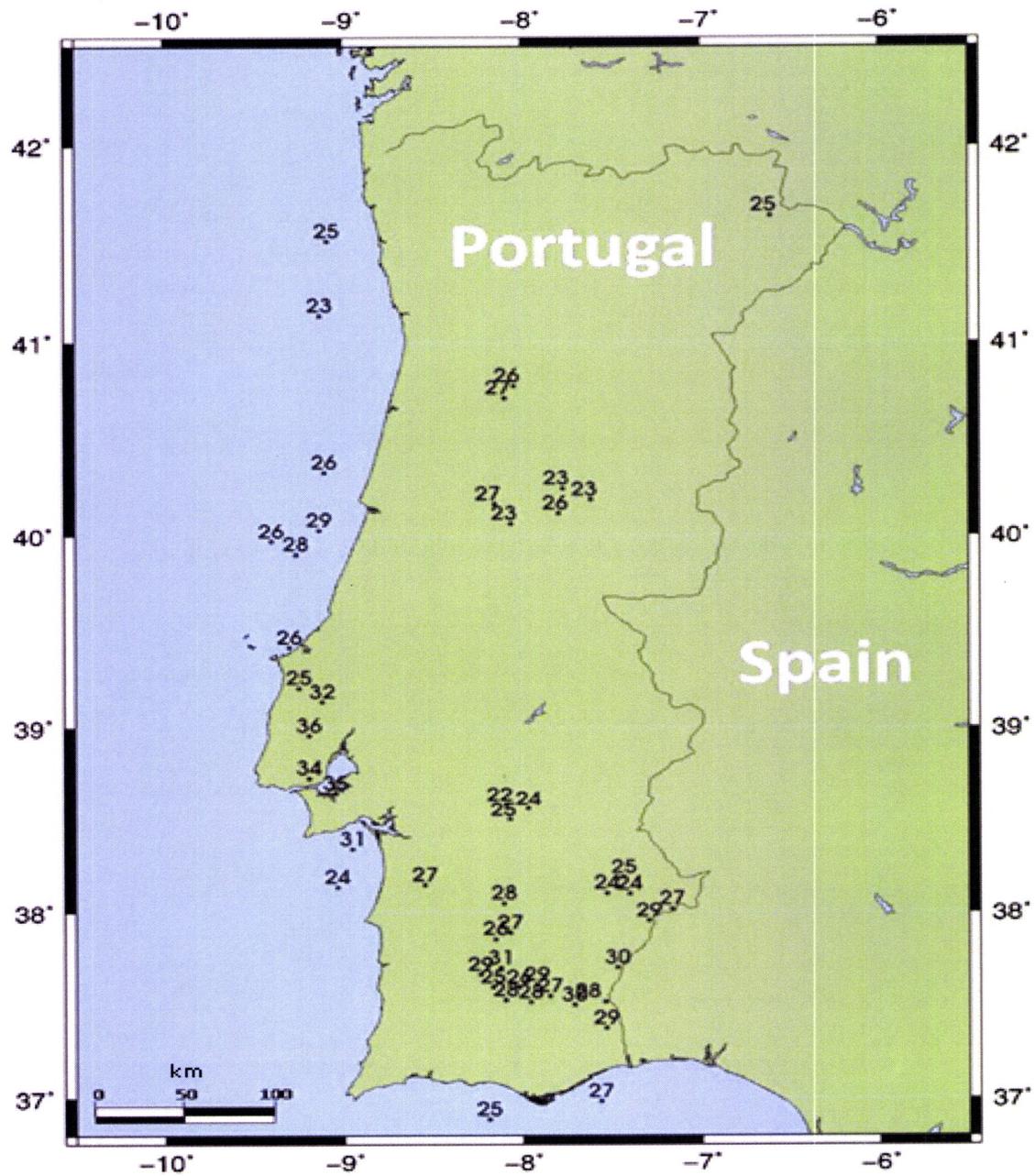


Figura 10: Mapa de temperatura a 500 m de profundidade em Portugal sul Continental em °C (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).

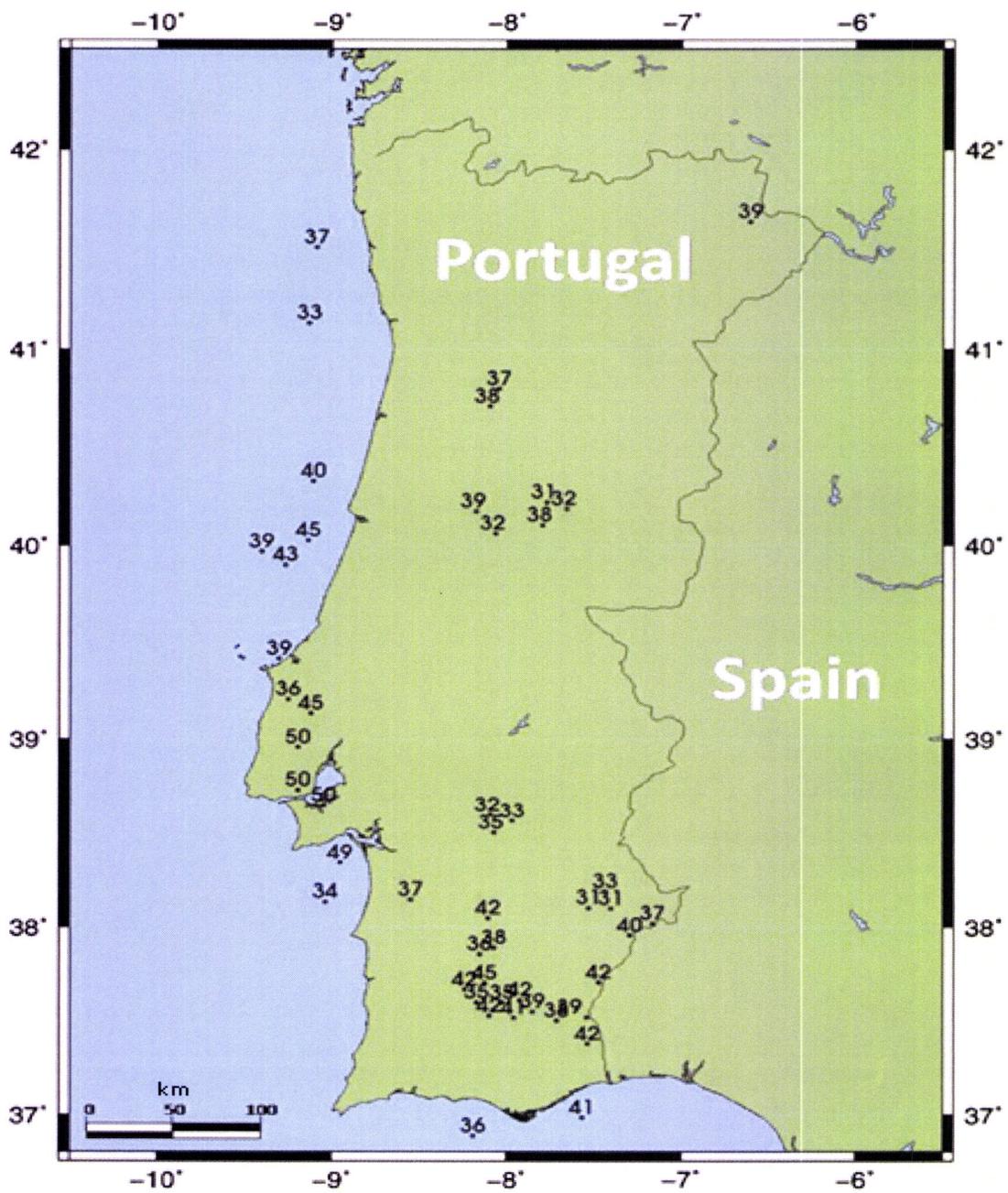


Figura 11: Mapa de temperatura a 1000 m de profundidade em Portugal Continental em °C (adaptado de Correia e Ramalho (2010)).

Com o valor da produção de calor (A) é ainda possível calcular a temperatura para profundidades da ordem da crosta média e da crosta inferior. Contudo, para isso, é necessário construir modelos geotérmicos a uma, duas ou mesmo três dimensões. Correia e Ramalho (1999) e Correia e Safanda (2002) apresentam modelos a uma e a duas dimensões, respectivamente. Na Fig. 12 é apresentado o modelo a duas dimensões e na Fig. 13 é apresentada a distribuição da temperatura em profundidade calculada para o modelo da Fig. 10(b).

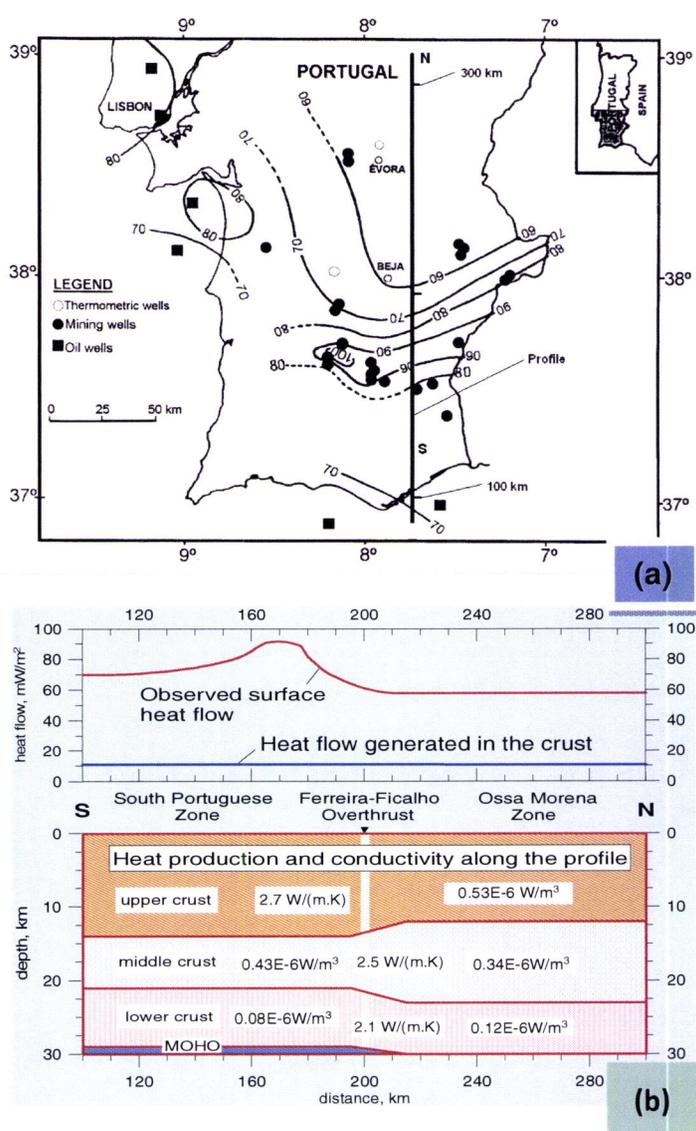


Figura 12: (a) Mapa da densidade de fluxo de calor para a região sul de Portugal Continental. Círculos e quadrados indicam a localização dos furos onde foi calculada a DFC. As linhas de igual DFC estão em mW/m^2 . (b) Modelo geotérmico construído ao longo do perfil NS do mapa de densidade de fluxo de calor apresentado em (a). Detalhes quanto à construção do modelo geotérmico podem ser consultados em Correia e Safanda (2002).

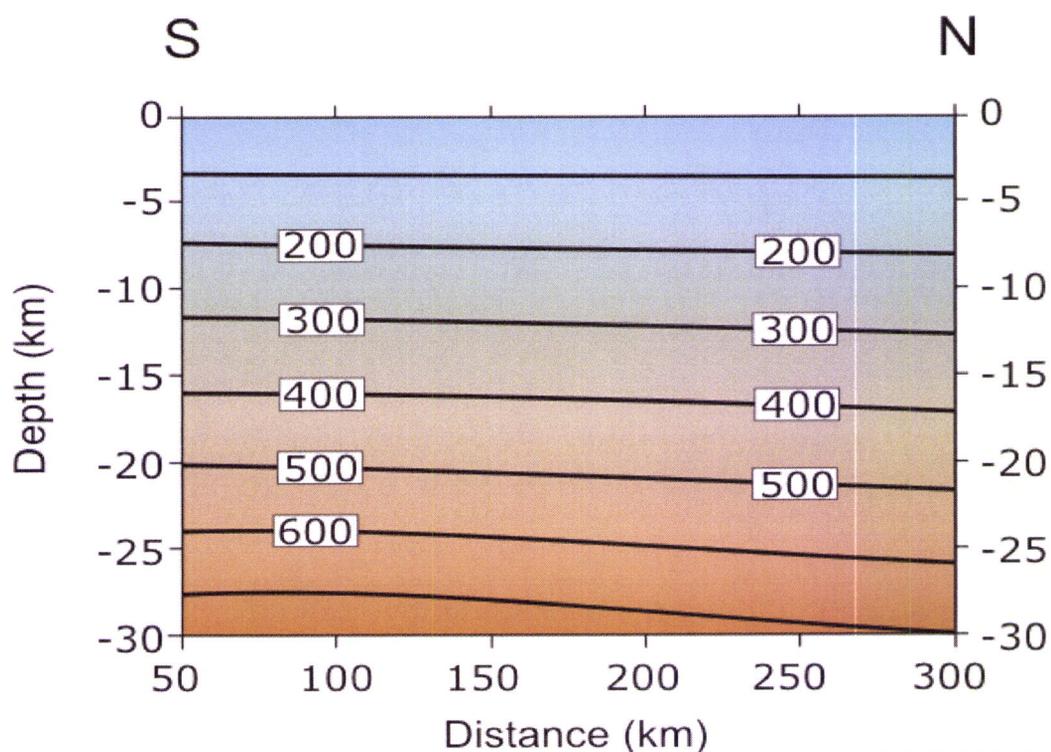


Figura 13: Distribuição da temperatura ao longo do perfil NS da Fig. 12(a). Valores em °C (adaptado de Correia e Safanda (2002)).

2.4 Determinações de temperatura e gradiente geotérmico em furos.

Os dados de temperatura apresentados neste capítulo foram compilados e arquivados numa base de dados do Instituto Nacional de Energia, Tecnologia e Inovação (INETI), actual LNEG. No presente capítulo são apresentados dados de 19 furos de prospecção mineira da região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) com objectivo de contribuir para o estudo do regime térmico do território Português.

A região em estudo está situada entre as latitudes $38^{\circ} 52''$ N e $37^{\circ} 52'$ N, e entre as longitudes $7^{\circ} 34'$ W e $8^{\circ} 11'$ W. Na Fig. 14 mostra – se a localização dos 19 furos de prospecção mineira onde foram feitas as medições de temperatura. As diagrfias de temperatura de cada um dos furos estão apresentadas no Anexo 1, excepto as diagrfias de temperatura dos furos 9 (CV), 12 (NG1) e 16 (CVH1).

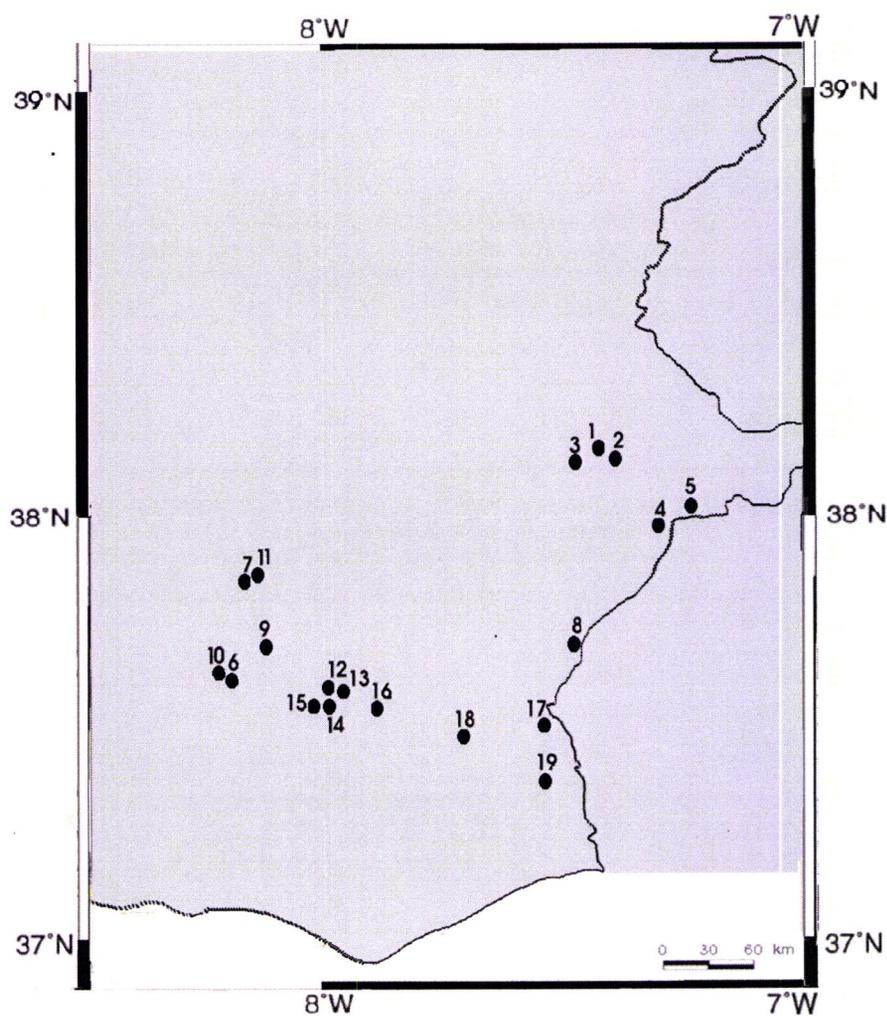


Figura 14: Localização dos 19 furos seleccionados a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP). Os números dos furos são os mesmos da Tabela 4.

As medições de temperatura foram realizadas utilizando termístores ou resistências de platina. Na Tabela 4 apresenta-se um resumo das características de cada um dos 19 furos estudados e na Tabela 6.

2.5 Determinação da condutividade térmica em amostras rochosas

Para determinar a densidade de fluxo de calor, para além do gradiente geotérmico calculado para um dado furo, é também necessário conhecer ou ter uma estimativa da condutividade térmica das formações por ele atravessadas.

Não sendo possível obter testemunhos nos furos, as condutividades térmicas das formações geológicas podem ser determinadas laboratorialmente em amostras de rochas colhidas perto do furo e representativas das formações por ele atravessadas ou estimadas através de tabelas de valores de condutividades térmicas típicas.

A condutividade térmica depende de diversos factores como a mineralogia, a porosidade, a massa volúmica, o grau de fracturação, a estrutura da rocha e o tipo de fluido presente nos poros das rochas.

Tabela 4: Referência e coordenadas dos 19 furos de prospecção mineira. Prof. é a profundidade de cada furo, n é o número de leituras de temperatura efectuadas e Gr o gradiente geotérmico, respectivamente, calculados a partir das temperaturas obtidas ao longo de um troço seleccionado.

Nº	REF.	lon. (W)	lat. (N)	Prof. (m)	n	Gr (°C/km)
1	SDM10	07°26'03"	38°07'42"	385	37	15,6
2	SDM5	07°25'56"	38°07'31"	295	24	14,2
3	SDM8	07°25'47"	38°07'26"	155	13	13,7
4	SDSA2	07°09'45"	37°59'10"	180	16	23,6
5	SDSA3	07°09'53"	37°59'09"	290	20	20,2
6	FS26	08°11'56"	37°37'49"	265	22	19,5
7	FS25	08°09'13"	37°51'25"	205	16	21,2
8	CH1	07°27'05"	37°42'24"	285	26	24,3
9	CV	08°07'30"	37°42'18"	?	7	30,4
10	OT1	08°11'55"	37°38'21"	345	33	26,9
11	AL1	08°08'27"	37°52'15"	155	9	22,5
12	NG1	07°58'36"	37°36'47"	170	15	26,1
13	NE26	07°57'48"	37°35'00"	125	11	19,5
14	NE6	07°58'26"	37°34'48"	295	24	26,2
15	NE4	07°58'30"	37°34'47"	145	10	25,5
16	CVH1	07°53'24"	37°33'08"	360	24	23,0
17	VC1	07°31'22"	37°31'22"	385	36	21,7
18	PN2	07°42'41"	37°30'18"	485	42	21,3
19	CST1	07°32'02"	37°22'47"	185	15	22,5

Havendo testemunhos, estes devem ser limpos e posteriormente organizados em diversas caixas construídas para o efeito, conforme se mostra, como exemplo, na Fig. 15. Os testemunhos devem ser seleccionados por intervalos regulares de profundidade e numerados.

Para a determinação da condutividade térmica em laboratório os testemunhos devem ser cortados ao longo do eixo longitudinal e as superfícies planas assim obtidas devem ser polidas de maneira a que o contacto entre a sonda para determinar a condutividade térmica e a amostra rochosa seja o mais eficiente possível (Fig. 16). Na Fig. 16 apresenta-se uma figura esquemática onde se vê a sonda (a preto) sobre um testemunho cilíndrico (a cinzento).

Na Fig. 17C mostra-se o equipamento ISOMET 2104 utilizado para medir a condutividade térmica em algumas amostras rochosas e testemunhos de furos.



Figura 15: Exemplo de armazenamento de testemunhos de um furo (Amaral (2011)).

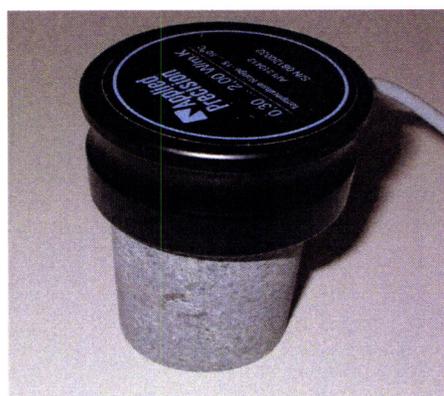


Figura 16: Fotografia da sonda sobre testemunho para efeito de determinação da condutividade térmica.

O aparelho ISOMET 2104 é um equipamento portátil que efectua leituras directas de propriedades termofísicas como a condutividade térmica, a difusividade térmica e a capacidade térmica mássica em diversos materiais.

O equipamento leva cerca de 10 minutos para efectuar cada determinação, permite uma recalibração em caso de necessidade usando amostras padrão e todas as medições são armazenadas numa memória interna podendo ser transferidas para um computador (Fig. 18A).

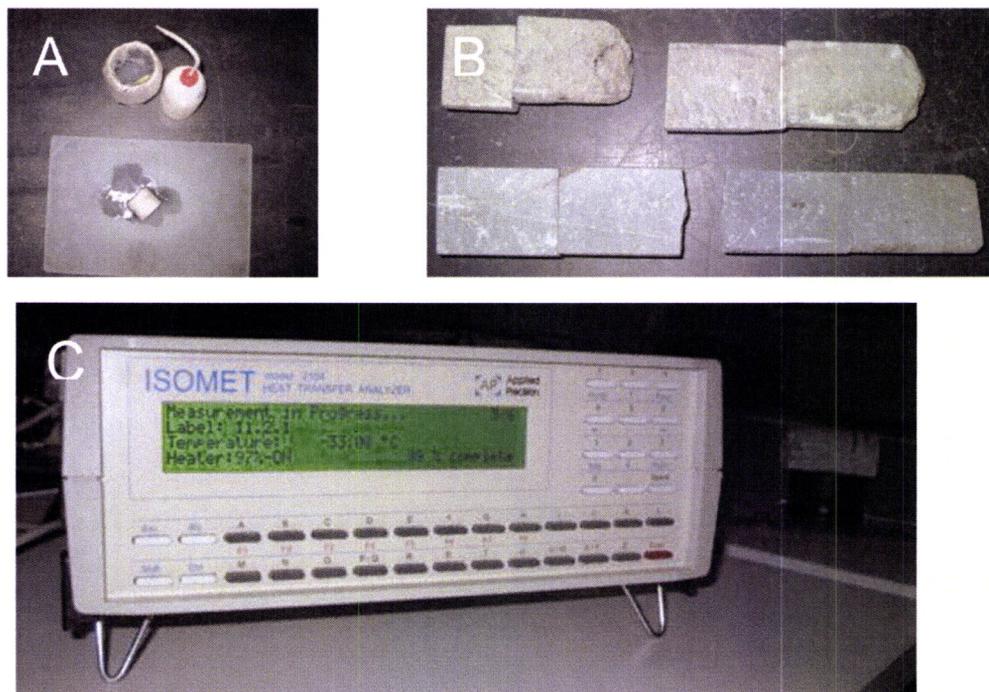


Figura 17: **A** - Preparação dos testemunhos para determinação laboratorial da condutividade térmica; **B** - Aspecto das superfícies polidas; **C** - Aparelho ISOMET 2104 (adaptado de Amaral (2011)).

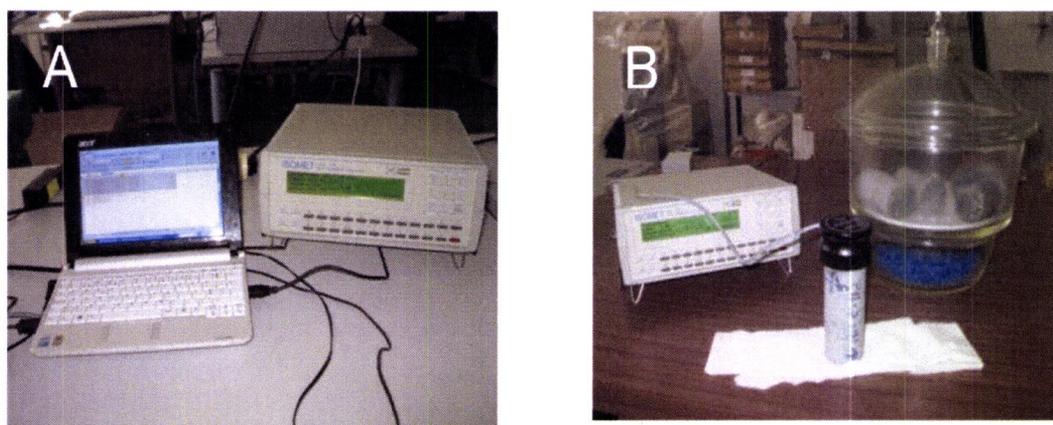


Figura 18: **A** - Equipamento ISOMET 2104 a efectuar leituras de condutividade térmica; **B** - Sonda plana cilíndrica sobre testemunho cilíndrico (adaptado de Amaral (2011)).

Na Tabela 5 são apresentados alguns valores de condutividades térmicas de rochas para as quais não há determinações laboratoriais de condutividades térmicas para furos da região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP); por este motivo, esses valores foram usados para estimar uma condutividade térmica efectiva, a qual é utilizada, em seguida, para calcular a densidade de fluxo de calor.

A expressão da condutividade térmica efectiva (k_{ef}) é

$$k_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{k_i}} \quad \text{Eq .2.3}$$

onde o índice i corresponde aos diferentes materiais rochosos que o furo atravessa, z_i (m) é espessura da camada i , e k_i (W/mK) é condutividade térmica do material dessa camada.

As condutividades térmicas da Tabela 5 são, assim, assumidas como representativas das formações geológicas portuguesas para as quais ainda não há determinações laboratoriais de condutividade térmica. Para os furos cujas colunas litológicas não se encontrem disponíveis consideraram-se as condutividades térmicas assumidas utilizadas por Fernandèz et al., (1998).

Tabela 5: Condutividades térmicas médias assumidas para alguns materiais rochosos atravessados por furos de Portugal Continental (adaptado de Cermak e Rybach (1982)).

Material	Condutividade térmica (W/m.K)
Siltitos	2,38
Arenitos	2,30
Diabases	2,45
Talco e serpentinitos	3,17
Argilas	1,72
Areias	1,57
Xistos argilosos	2,59
Xistos dolomíticos	4,06

2.6 Cálculo da densidade de fluxo de calor

Na determinação da DFC em furos admite – se que as formações por eles atravessadas são lateralmente homogéneas, isotrópicas e com uma condutividade térmica independente da temperatura, o que equivale a dizer que a transferência de calor é feita por condução e em regime estacionário.

Os valores da condutividade térmica efectiva ou assumida nos furos seleccionados são apresentados na Tabela 7, bem como os valores de temperatura aos 500 m de profundidade.

Os valores de produção de calor por unidade de volume (A) utilizados no cálculo da temperatura a 500 m de profundidade apresentados na Tabela 7 referem-se a valores médios obtidos através da determinação laboratorial em amostras rochosas recolhidas em formações rochosas do território de Portugal Continental (Correia et al., 1993; Correia e Jones, 1995; Correia e Jones, 1997) e apresentadas na Tabela 8 e em tabelas de propriedades físicas de rochas apresentadas na Tabela 9 (Cermak e Rybach, 1982). Na Tabela 6 apresentam –se ainda o tipo de furo, a litologia genérica atravessada, a sua profundidade e o gradiente geotérmico, assumido um regime condutivo. A Fig. 19 é um mapa de valores de gradiente geotérmico apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo relativo a algumas características dos furos e propriedades determinadas (número, referência, observações, litologia geral, profundidade, gradiente geotérmico).

NÚMERO	REFERÊNCIA	OBSERVAÇÕES	LITOLOGIA GERAL	PROFUNDIDADE (m)	GRADIENTE GEOTÉRMICO (°C/km)
1	SDM10	Furo mineiro	calcários dolomíticos	385	16
2	SDM5	Furo mineiro	xistos, calcários e dolomias	295	14
3	SDM8	Furo mineiro	xistos, calcários e dolomias	155	14
4	SDSA2	Furo mineiro	metavulcanitos	180	24
5	SDSA3	Furo mineiro	metavulcanitos	290	20
6	FS26	Furo mineiro	xistos e grauvaques	265	20
7	FS25	Furo mineiro	xistos e grauvaques	205	21
8	CH1	Furo mineiro	xistos, argilas e margas	285	24
9	C.V.	Furo mineiro	xistos e grauvaques	?	30
10	OT1	Furo mineiro	metavulcanitos ácidos	345	27
11	AL1	Furo mineiro	metavulcanitos ácidos	155	23
12	NG1	Furo mineiro	xistos e tufitos	170	26
13	NE26	Furo mineiro	grauvaques e xistos	125	20
14	NE6	Furo mineiro	metavulcanitos	295	26
15	NE4'	Furo mineiro	metavulcanitos	145	26
16	CVH1	Furo mineiro	xistos e grauvaques	360	23
17	VC1	Furo mineiro	turbiditos	385	22
18	PN2	Furo mineiro	turbiditos	485	21
19	CST1	Furo mineiro	metavulcanitos	185	23

Tabela 7: Resumo relativa algumas características dos furos da Tabela 6 (número, referência, condutividade térmica, densidade de fluxo de calor, produção de calor, temperatura a 500 m de profundidade).

NÚMERO	REFERÊNCIA	CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFFECTIVA /ASSUMIDA (W/mK)	DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR (mWm ⁻²)	PRODUÇÃO DE CALOR (μWm ⁻³)	TEMPERATUR A A 500 m de profundidade (°C)
1	SDM10	3,6	56	0,53	25
2	SDM5	3,7	53	0,72	24
3	SDM8	3,8	52	0,72	24
4	SDSA2	3,4	80	1,75	29
5	SDSA3	3,8	77	1,75	27
6	FS26	3,46	67	2,07	25
7	FS25	3,36	71	2,07	26
8	CH1	3,8	92	1,30	30
9	C.V.	3,03	91	2,07	31
10	OT1	4,27	115	2,07	29
11	AL1	3,64	82	2,07	27
12	NG1	3,5	91	1,00	29
13	NE26	3,7	72	2,07	26
14	NE6	3,7	97	1,75	28
15	NE4'	3,6	92	1,75	28
16	CVH1	3,5	80	2,07	27
17	VC1	3,3	72	1,00	28
18	PN2	3,7	79	1,00	30
19	CST1	3,4	77	1,75	29

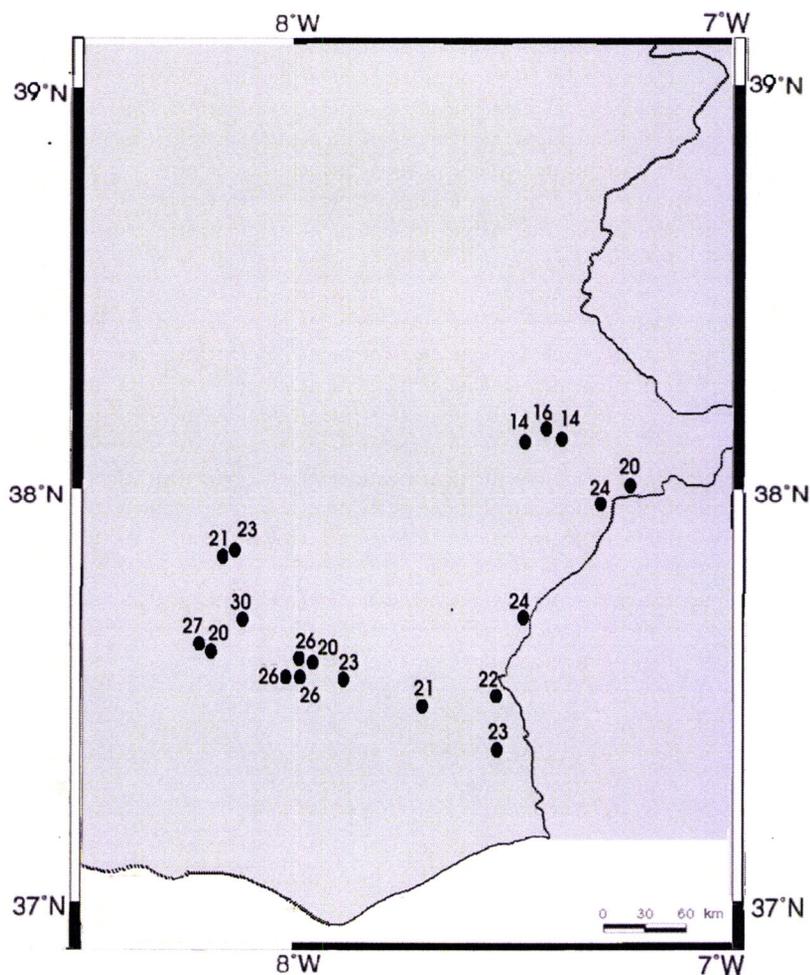


Figura 19: Valores de gradiente geotérmico para a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) em °C/km.

Tabela 8: Valores da produção de calor média por unidade de volume medidos laboratorialmente para diferentes materiais rochosos do território de Portugal Continental (segundo Correia et al., 1993; Correia e Jones, 1995; Correia e Jones, 1997) e utilizados para calcular a temperatura a 500 m de profundidade (apresentam – se os desvios padrão dos das determinações da produção de calor).

Tipos de rochas	Produção de calor
	($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
Granito	3,36 (0,05)
Granito	2,04 (0,04)
Granito	3,20 (0,05)
Granito	2,58 (0,58)
Microgranito	2,75 (0,25)
Diorito	0,56 (0,02)
Diorito	0,98 (0,02)
Diorito	1,60 (0,14)
Diorito	1,53 (0,13)
Microdiorito	0,83 (0,07)
Microdiorito	0,76 (0,02)
Gabro	0,27(0,02)
Gabro	0,11(0,02)

Tabela 9: Valores assumidos de produção de calor média por unidade de volume (A) para diferentes materiais rochosos (segundo Cermak and Rybach, 1982) e utilizados para calcular a temperatura a 500 m de profundidade.

Tipos de rochas	Material	Produção de calor ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
Ígneas	Granito/ Riolito	2,45
	Granodiorito/Dacito	1,48
	Diorito/Quartzodiorito/Andesito	1,08
	Gabro/Basalto	0,309
Sedimentares	Calcário	0,62
	Dolomito	0,36
	Sal	0,012
	Anidrite	0,090
	Argilas e siltes	1,8
	Argilas orgânicas	5,5
	Arenitos	1,12
	Margas	0,93
	Tufitos	0,73
	Arcoses	0,84
	Grauvaques	0,99
Metamórficas	Quartzitos	0,32
	Xistos cloríticos	3,15
	Xistos anfibolíticos	1,18
	Xistos granulíticos	0,45

A DFC só deve ser calculada para furos em equilíbrio térmico e sem circulação de água. Nos furos de prospecção mineira a DFC foi calculada através da Eq. 2.1. Na Fig. 20 estão representados os valores da DFC.

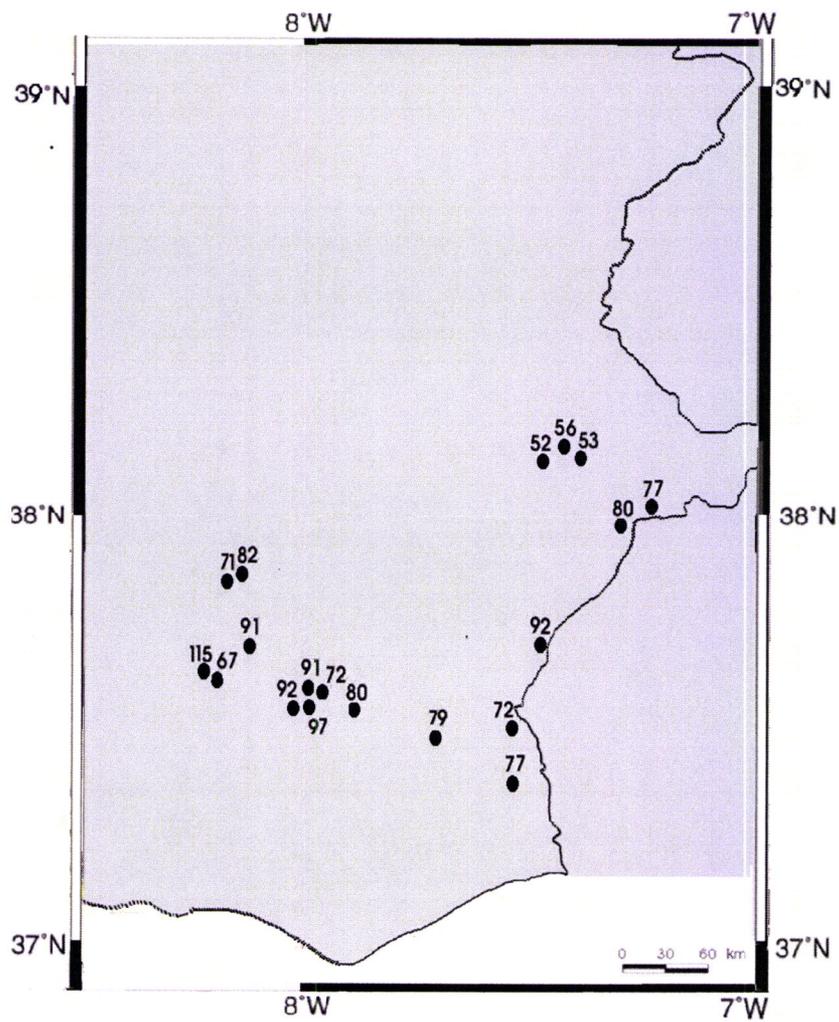


Figura 20: Valores da DFC na região sul de Portugal Continental em mWm^{-2} .

2.7 Cálculo da temperatura a diferentes profundidades

A determinação da temperatura a diferentes profundidades foi feita tendo em atenção valores da DFC obtidos à superfície. Assim se se conhece a litologia aproximada da região onde o furo se encontra, e se se puder estimar a condutividade térmica média e a produção de calor média para essa litologia, é possível estimar o valor da temperatura para qualquer profundidade a partir da Eq. 2.2 (Haenel et al., 1980(b)). Na Fig. 21 são apresentados os valores da temperatura aos 500 m de profundidade para a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP).

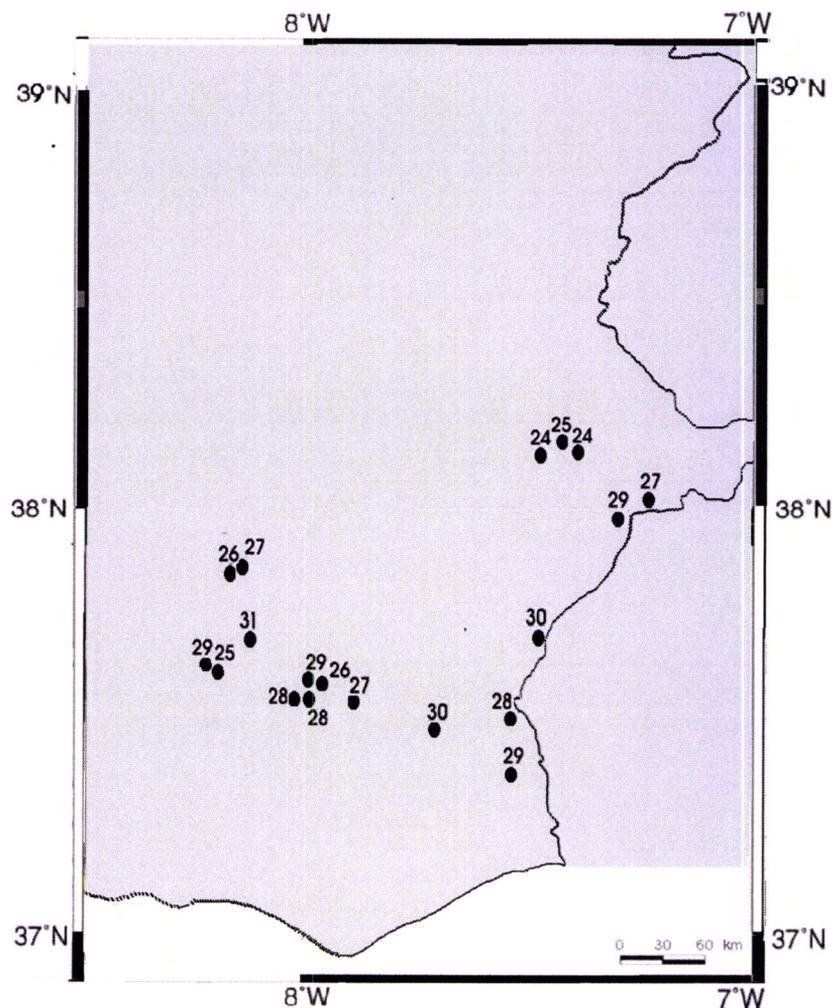


Figura 21: Temperatura a 500 m de profundidade na região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) em °C.

CAPÍTULO III

NOVAS DETERMINAÇÕES DA DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR NA REGIÃO SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo são feitas novas determinações da densidade de fluxo de calor (DFC) a partir de dados do projecto "Investigación de los recursos geotérmicos de Extremadura (España), Alentejo y Región Centro (Portugal) en el marco del proyecto PROMOEENER A4E". O referido projecto teve como objectivo investigar e caracterizar os recursos energéticos (recursos geotérmicos) de áreas seleccionadas de Espanha (região de Extremadura) e Portugal (Alentejo, Beira Interior Sul e Cova de Beira).

Os objectivos gerais do projecto foram:

Impulsionar as soluções de fornecimento de energia em edifícios públicos bem como a sua climatização e diminuir a procura e o consumo de energia através de medidas bioclimáticas e sistemas de monitorização e controlo de edifícios.

Por outro lado, o projecto tinha os seguintes objectivos específicos:

1. A realização de 150 perfis termométricos em furos com mais de 150 m de profundidade com uma distribuição geográfica o mais homogénea possível.
2. A estimativa da produção radiogénica de calor em rochas graníticas através da determinação dos teores em urânio (U), tório (Th) e potássio (K) em 25 afloramentos graníticos repartidos pela zona do projecto.

Os trabalhos de campo decorreram de 12 de Março a 25 de Junho de 2013 e consistiram em caracterizar e recolher amostras em vários locais, com e sem manifestações geotérmicas e hidrominerais, do território descrito com o objectivo de determinar gradientes de temperatura em furos e produções de calor em rochas.

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos para parte da região portuguesa do estudo e são calculadas as densidades de fluxo de calor para 9 furos seleccionados.

Nas Figs. 22 e 23 apresentam-se fotografias das cabeças dos furos 117, 118, 119 e 120, e 123, 125, 129, 132 e 133, respectivamente, onde foram realizadas as medições de temperaturas.

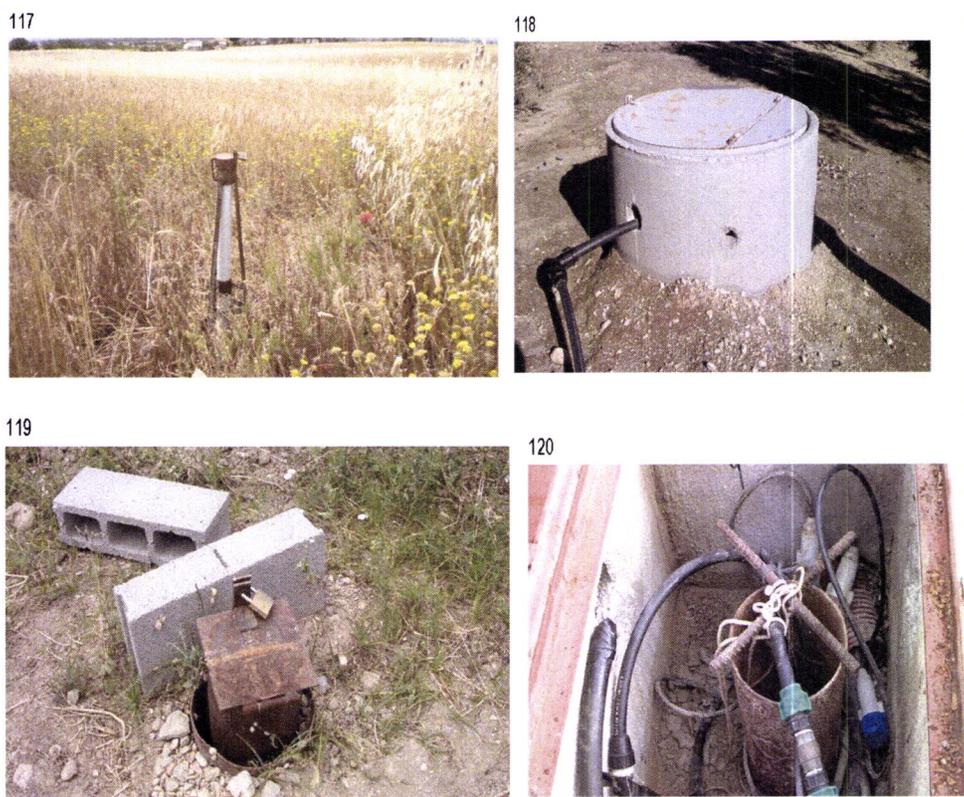


Figura 22: Fotografias das cabeças dos furos 117, 118, 119 e 120.

123

125



129

132



133



Figura 23: Fotografia das cabeças dos furos 123, 125 129, 132 e 133.

Na Fig. 24 apresenta-se o mapa geológico da região sudeste de Portugal Continental onde estão localizados os 9 furos onde foram realizadas as medições de temperatura (diagrfias de temperatura). Na Tabela 10 podem ler-se as coordenadas dos referidos furos bem assim como as suas profundidades e os gradientes geotérmicos calculados a partir das diagrfias de temperatura. As diagrfias de temperatura obtidas nos vários furos são apresentadas no Anexo 2.

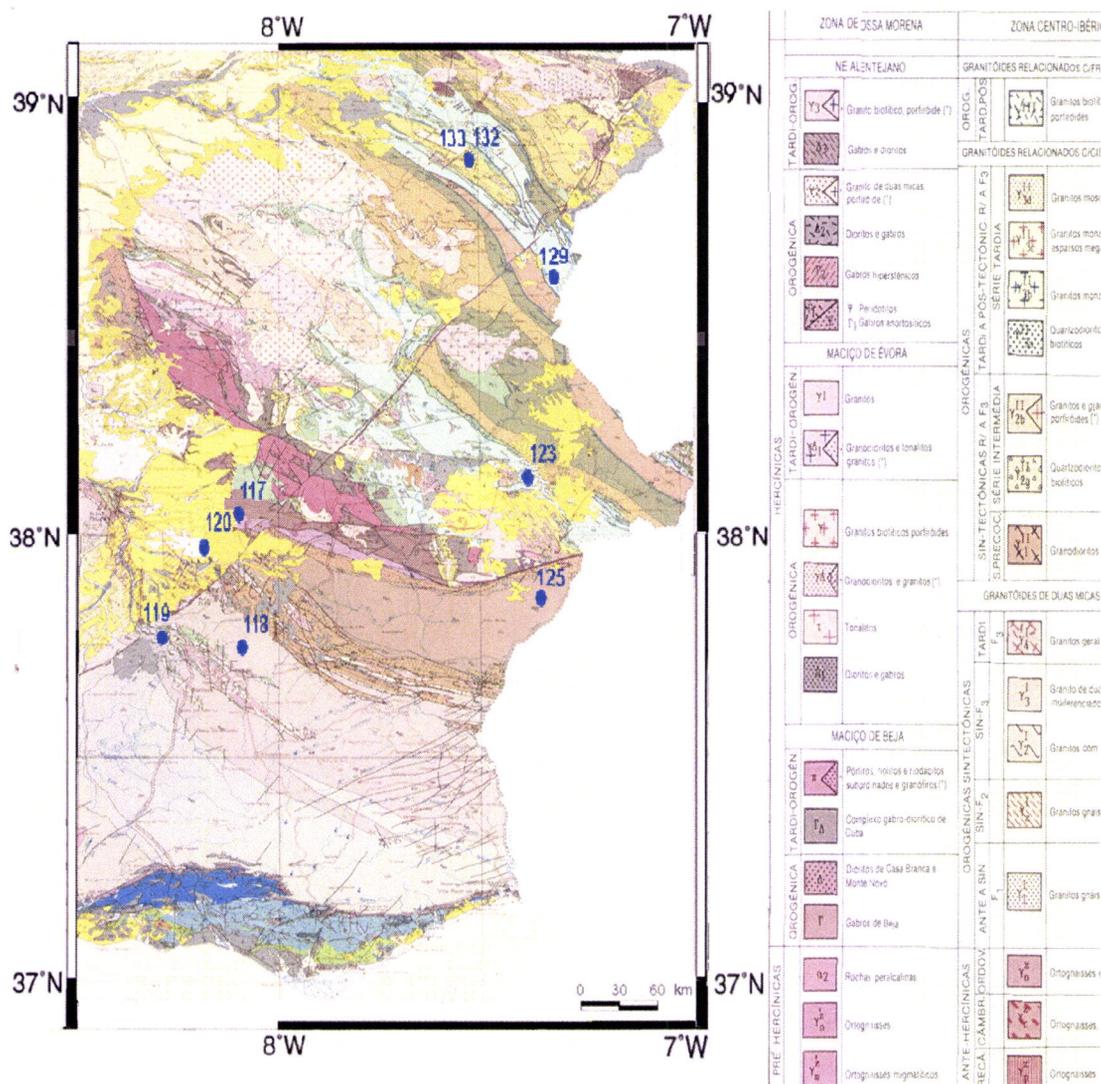


Figura 24: Mapa geológico da região sudeste de Portugal Continental (adaptado de Serviços geológicos de Portugal (1992)) com a localização dos 9 furos seleccionados (círculos a azul) e apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Referência e coordenadas dos 9 furos onde foi calculada a densidade de fluxo de calor. Prof. - profundidade do furo. n - número de leituras utilizadas para calcular o gradiente de temperatura. Gr - gradiente de temperatura.

Nº	long. (W)	lat. (N)	Prof. (m)	n	Gr (°C/km)
117	8W 06' 23"	38N 02' 54"	300	?	?
118	8W 06' 42"	37N 42' 06"	160	10	4
119	8W 11' 32"	37N 43' 40"	200	10	9
120	8W 11' 22"	37N 58' 49"	120	9	5
123	7W 25' 07"	38N 05' 57"	200	6	19
125	7W 23' 46"	37N 52' 31"	130	6	16
129	7W 22' 54"	38N 34' 06"	140	7	24
132	7W 34' 40"	38N 49' 08"	120	5	17
133	7W 34' 23"	38N 49' 13"	130	5	17

3.2 Cálculo da densidade de fluxo de calor com novos dados

No âmbito do projecto "Investigación de los recursos geotérmicos de Extremadura (España), Alentejo y Región Centro (Portugal) en el marco del proyecto PROMOEENER A4E" não foi possível recolher amostras de rochas para determinação laboratorial da condutividade térmica. Assim, para efeitos de cálculo da densidade de fluxo de calor utilizaram-se os valores da condutividade térmica da Tabela 7 de amostras semelhantes. É de referir que o furo 117, apesar de ter uma profundidade superior a 100 m, foi rejeitado e considerado como inadequado para determinar a DFC dado que apresenta evidência clara de circulação de água e, portanto, não deverá estar em equilíbrio térmico com as formações rochosas que atravessa (ver Anexo 2, diagrafia 117).

Na Fig. 25 e na Tabela 11 apresentam-se os valores dos gradientes de temperatura para cada um dos 9 furos referidos anteriormente.

Os valores da condutividade térmica utilizados para calcular a densidade de fluxo de calor foram estimados a partir de tabelas de valores publicadas por Cermak e Rybach (1982) e são apresentados na Tabela 12. O furo número 120 não tem um valor de condutividade térmica efectiva já que não foi possível obter informação quanto a geologia local. Com os valores da condutividade térmica e do gradiente geotérmico foi calculada a densidade de fluxo de calor através da Eq. 2.1 para cada um dos 7 furos dos 9 furos considerados; esses valores estão apresentados na Fig. 26 e na Tabela 12.

Finalmente, conhecendo os valores da densidade de fluxo de calor para cada furo, as condutividades térmicas médias e a produções de calor médias para cada furo é possível estimar a temperatura a várias profundidades através da Eq. 2.2. Na Fig. 27 e na Tabela 12 são apresentados os valores da temperatura para a profundidade de 500 m. Os valores médios da produção de calor por unidade de volume para algumas das formações geológicas atravessadas pelos furos foram os valores determinados laboratorialmente publicados por Correia et al. (1993), Correia e Jones (1995), e Correia e Jones (1997). Para formações rochosas sem valores determinados experimentalmente optou-se por considerar valores da produção de calor por unidade de volume publicados por Rybach e Cermak (1982).

Tabela 11: Resumo das características e litologia simplificada dos 9 furos utilizados, excepto para os furos 117 e 112. O número/referência é o considerado no projecto "Investigação dos recursos geotérmicos da Extremadura (Espanha), Alentejo e Região Centro (Portugal) PROMOEENER A4E".

NÚMERO/REFERÊNCIA	OBSERVAÇÕES	LITOLOGIA GERAL	PROFUNDIDADE (m)	GRADIENTE GEOTÉRMICO (°C/km)
117	Furo água	?	300	?
118	Furo água	turbiditos	160	4
119	Furo água	turbiditos	200	9
120	Furo água	?	120	5
123	Furo água	calcários e dolomíticos	200	19
125	Furo água	Quartzitos	130	16
129	Furo água	xistos	140	24
132	Furo água	calcários dolomíticos	120	17
133	Furo água	calcários dolomíticos	130	17

Na Tabela 12 apresenta-se um resumo das características térmicas para 7 furos dos 9 furos considerados bem assim como a temperatura estimada para os 500 m de profundidade.

Tabela 12: Resumo das características térmicas de 7 dos 9 furos e temperatura a 500 m de profundidade.

NÚMERO/REFERÊNCIA	CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFECTIVA/ASSUMIDA (W/mK)	DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR DE CALOR (mWm ⁻³)	PRODUÇÃO DE CALOR (μWm ⁻³)	TEMPERATURA A 500 m de profundidade (°C)
117	?	?	?	?
118	3,7	15	1,00	21
119	3,7	33	1,00	23
120	?	?	?	?
123	3,8	72	0,53	28
125	5	80	0,32	26
129	3,8	91	2,07	31
132	3,6	61	0,72	25
133	3,6	61	0,72	25

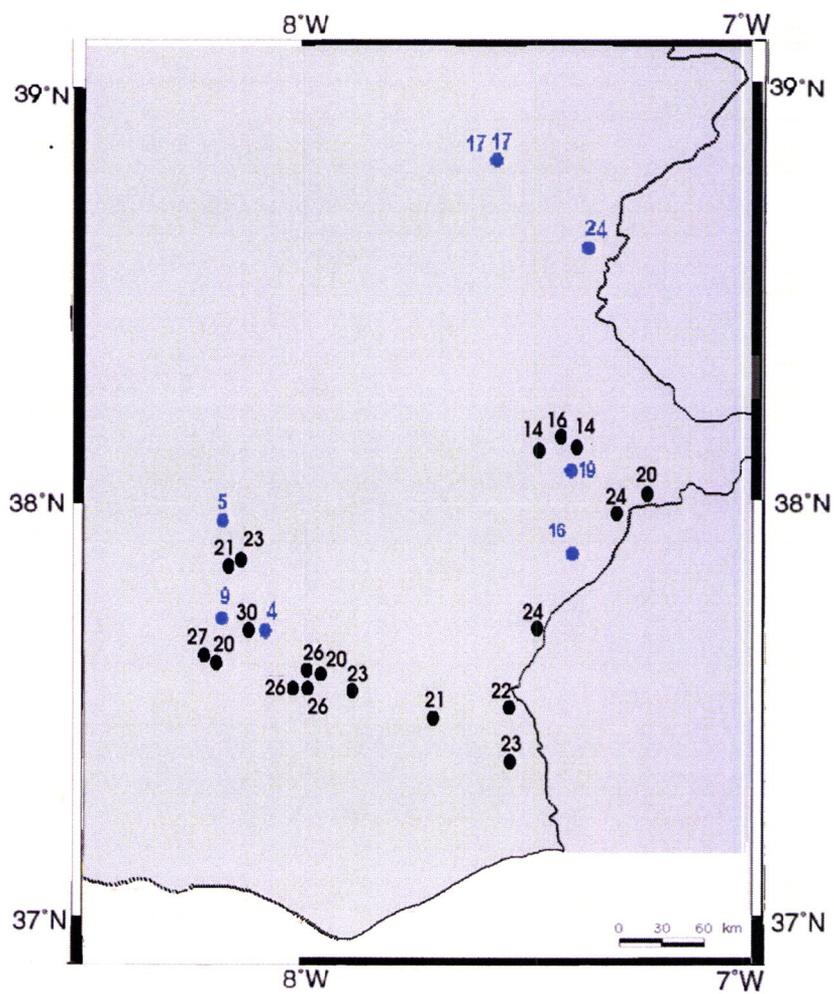


Figura 25: Valores de gradiente geotérmico para a região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) em °C/km para 7 dos 9 novos furos considerados (números e círculos azuis) e para os 19 furos considerados no Capítulo II (números e círculos pretos).

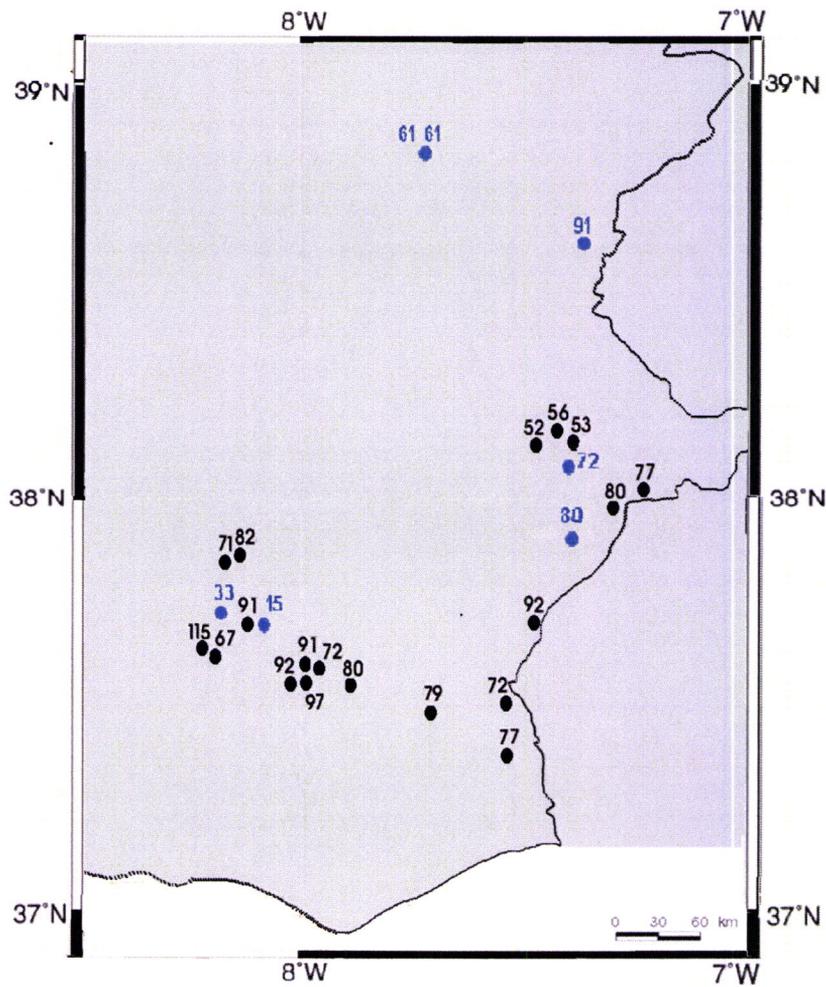


Figura 26: Valores da DFC na região sul de Portugal Continental em mWm^{-2} . Os números e círculos a preto representam os valores da DFC calculados e publicados antes do trabalho descrito nesta dissertação. Os círculos e números azuis representam a novas 7 determinações, para a região sul de Portugal Continental.

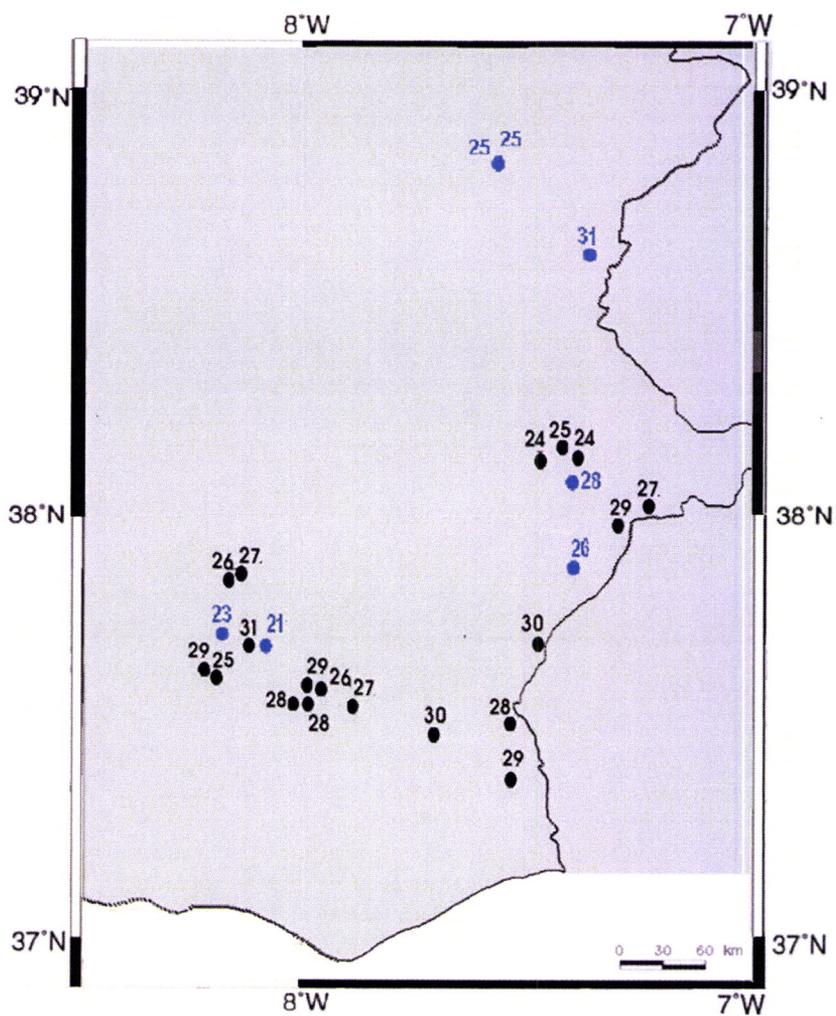


Figura 27: Valores da temperatura aos 500 m de profundidade para 7 dos novos 9 furos considerados (números e círculos azuis) e para os 19 furos considerados no Capítulo II (números e círculos pretos).

CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS VALORES DA DFC OBTIDOS

4.1 Discussão e interpretação dos valores da DFC obtidos

De acordo com trabalhos publicados por vários autores anteriores à realização do estudo apresentado nesta dissertação de mestrado, os valores da densidade de fluxo de calor em Portugal Continental variavam entre 42 e 115 mWm^{-2} ; na região sul de Portugal Continental variavam entre 56 e 115 mWm^{-2} ; nas grandes bacias sedimentares (Orlas Meso-Cenozoicas Ocidental e Meridional e Bacias dos rios Tejo e Sado) variam entre 40 e 90 mWm^{-2} . De maneira geral pode dizer-se que a DFC é mais elevada na zona sul de Portugal Continental do que na zona o norte; contudo, como se pode observar na Fig. 8 a cobertura do território de Portugal Continental por furos é muito escassa na região norte. Por outro lado, na Zona Ossa-Morena a DFC apresentava um valor médio de cerca de 60 mWm^{-2} enquanto na Zona Sul Portuguesa o valor médio da DFC é de 84 mWm^{-2} (Fig. 8).

Os valores da DFC em Portugal Continental apresentados na Fig.8 foram calculados a partir de furos de água ou prospecção mineira e furos de petróleo e têm diferentes graus de precisão; na verdade, os furos com os números 1 a 30 são furos realizados em terra (*on shore*) e são furos de água ou de prospecção mineira.

Fazendo uma análise dos valores da DFC calculados para região sul de Portugal Continental (ZOM e ZSP) pode dizer-se que os valores de DFC são menos elevados na Zona Ossa-Morena do que na Zona Sul Portuguesa; na verdade, na primeira zona variam entre 52 a 80 mWm^{-2} enquanto que na segunda zona variam entre 72 e 115 mWm^{-2} .

Na Fig. 26 apresentam-se os novos valores de DFC para os 7 furos dos 9 seleccionados, os quais variam entre 15 a 91 mWm^{-2} , com os valores mais baixos na Zona Sul Portuguesa e valores mais elevados na Zona Ossa-Morena. Para a Zona Sul Portuguesa os valores variam entre 15 a 80 mWm^{-2} e para a Zona Ossa-Morena variam entre 61 e 91 mWm^{-2} . Fazendo uma análise comparativa entre os valores de DFC anteriores a este trabalho e os agora apresentados verifica-se uma grande dispersão nos valores da DFC na Zona Sul Portuguesa; na verdade estes são, em média, muito baixos em comparação com os valores calculados em trabalhos anteriores (e.g., em Ramalho e Correia, 2006). Este facto pode resultar de uma deficiente estimativa da condutividade térmica já que as litologias atravessadas pelos vários furos e referidas no trabalho "Investigación de los recursos geotérmicos de Extremadura (España), Alentejo y Región Centro (Portugal) en el marco del proyecto PROMOEENER A4E" serem muito incompletas; as descrições das litologias atravessadas pelos vários furos deste estudo apenas referem as unidades litológicas superficiais não indicando (por falta de informação dos sondadores) detalhes acerca de possíveis variações litológicas com a profundidade o que não permite uma estimativa adequada da condutividade térmica efectiva para cada um dos furos.

Por outro lado, não é de excluir possíveis influências climáticas nas várias diagrfias de temperatura realizadas no âmbito desse projecto já que a maioria dos furos tem profundidades relativamente pequenas e, assim, o gradiente geotérmico pode ser inferior (ou superior) ao gradiente geotérmico que existiria sem influência climática. Estudos recentes mostram que a influência climática nas diagrfias de temperatura na região do Alentejo pode atingir profundidades da ordem dos 40 a 60 m (e.g., Correia e Safanda, 1999; Correia e Safanda, 2001; Safanda et al., 2007).

Finalmente, é de referir que na Fig. 24 há três furos na ZSP que apresentam gradientes geotérmicos muito inferiores aos calculados em trabalhos anteriores, i.e., 4, 5 e 9 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (furos 118, 120 e 119, respectivamente, da Tabela 11); não havendo informação quanto à utilização daqueles furos (sabendo-se, contudo, que são furos de exploração de água subterrânea) é de suspeitar que aqueles gradientes, apesar de constantes, resultarem de um efeito uniformizador da temperatura ao longo dos furos, resultante, por sua vez, de uma possível bombagem da água e não de uma situação de equilíbrio térmico com as formações geológicas por eles atravessadas.

Assim sendo, a estimativa da densidade de fluxo de calor e a temperatura aos 500 m de profundidade para cada um daqueles três furos está, provavelmente, sub-avaliada.

O furo 125 é um exemplo de um deficiente constrangimento no valor da condutividade térmica; na verdade, ele apresenta uma DFC de 80 mWm^{-2} para um valor assumido da condutividade térmica média para todo o furo de $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Hearst et al., 2000).

Na Zona Ossa-Morena os novos valores de DFC variam entre 61 e 91 mWm^{-2} os quais estão mais próximos dos valores publicados antes deste estudo. Porém, há ainda, e também, o mesmo tipo de incerteza quanto às litologias atravessadas pelos vários furos.

Conhecidas a temperatura ao longo de um dado furo, a densidade de fluxo de calor, o valor médio da condutividade térmica (ou assumida) e os valores de produção de calor (medidos laboratorialmente ou assumidos) para diferentes formações que atravessam cada um dos furos foi possível calcular a temperatura aos 500 m de profundidade. Assim, para o conjunto dos novos e dos antigos valores da DFC, os valores da temperatura aos 500 m de profundidade na região em estudo variam entre 21 a $31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ com os valores mais elevados (em média) na Zona Sul Portuguesa (Fig. 27).

Assim, pode dizer-se que, de maneira geral, a temperatura aos 500 m de profundidade apresenta uma tendência de aumento da Zona Ossa-Morena para a Zona Sul Portuguesa. Esta mesma tendência é observada nos modelos geotérmicos a uma dimensão apresentados por Correia e Ramalho (1999) e as duas dimensões apresentados por Correia e Safanda (2002) (Fig. 12).

4.2 Conclusões Gerais

Os furos realizados em Portugal Continental por várias companhias de prospecção mineira, de prospecção de água e de pesquisa de petróleos têm proporcionado a diferentes investigadores de vários centros de investigação e universidades fazer estudos relacionados com a energia geotérmica, com as propriedades térmicas e reológicas da crosta e manto superior, bem como fornecer informações a instituições e empresas interessadas na existência, ou não, de recursos hídricos subterrâneos e recursos mineiros, e sobre processos de maturação e migração de petróleos.

Além destes aspectos os dados adquiridos a partir destes furos tem permitido elaborar mapas de densidade de fluxo de calor e gradiente geotérmico para Portugal Continental.

De maneira geral pode dizer-se que o gradiente geotérmico e a densidade de fluxo de calor apresentam na região sul de Portugal Continental uma tendência de aumento à medida que se avança para o sul e da ZOM para a ZSP; esta observação é confirmada pelos novos dados de temperatura e de DFC descritos e apresentados neste trabalho. Contudo, o grau de incerteza na determinação da DFC é maior nas novas determinações do que nas determinações já publicadas anteriormente; este facto resulta da dificuldade em constranger, de maneira satisfatória, os valores das condutividades térmicas das formações geológicas atravessadas pelos furos por falta de informação geológica.

Convém, contudo, dizer que os valores da densidade de fluxo de calor aqui calculados e apresentados para a crosta na região sul de Portugal Continental são idênticos aos valores calculados para outras regiões Hercínicas da Europa.

REFERÊNCIAS

- Amaral, P. (2011). Contributo para o estudo do fluxo geotérmico na Península de Hurd, Ilha de Livingston, Península Antártida. Tese de mestrado, Universidade de Évora.
- Almeida, L.C., 1991. Prospecção geotérmica - Determinação de gradientes geotérmicos em furos de sonda. Bol. Inf. INMG, Abril, 149 pp.
- Benfield, A. E. (1939). The terrestrial heat flow in Great Britain. Proc. Roy. Soc. London.
- Birch, F. and Clark, H. (1940). The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. American Journal of Science, 238, 529-558.
- Bullard, E.C. (1939). Heat flow in South Africa, Proceedings of the Royal Society of London.
- Brown, G., Drury, S., Fleet, A., Francis, P., Hawkesworth, C., Pearce, J., Smith, S., Thorpe, R and Wright, J. (1981(a)). Block 4, Earth dynamics, plate tectonics, heat flow and mantle convection.
- Brown, G., Drury, S., Fleet, A., Francis, P., Hawkesworth, C., Pearce, J., Smith, S., Thorpe, R and Wright, J. (1981(b)). Block 7, The Earth origin and evolution.
- Cermak, V. (1979). Heat flow map of Europe. In: V, Cermak and L. Rybach (Edit.), Terrestrial Heat Flow in Europe. Springer Verlag, Berlin, 3-40.
- Cermak, V. and Rybach, L. (1982). Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In Landolt-Bornstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. In G. Angenheister (Ed.), New series, Group V (Geophysics and space Research), Volume 1a (Physical Properties of Rocks (pp. 305 – 343; 353 – 371; 433 – 452; 453 – 480). Berlin-Heidelberg: Springer.
- Chapman, D S. and Pollack, H. N. (1975). Global heat flow: a new look. Earth and Planet. Sci. Letters, 28, 23-32.

- Chapman, D. S. and Pollack, H. N. (1980). Global heat flow: spherical harmonic representation. *EOS Trans. Am Geophys. Union*, 61, 383.
- Correia, A., Duque, R., Maciel, C., Camelo, S., Almeida, L.C., Mendes Victor, L.A. (1982). Primeiras determinações do Fluxo de Calor em Portugal, *Bol, Inf, INMG* 56, 3-13.
- Correia, A., Jones, F.W., Dawes, G.K. and Hutton, V.R.S. (1993). A magneto-telluric deep crustal study in south-central Portugal, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 37, 331-344.
- Correia, A. and Jones, F.W., (1995). A magneto - telluric survey in a reported geothermal area in southern Portugal, *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, 2, 927-931.
- Correia, A. and Jones, F.W. (1997). On the existence of a geothermal anomaly in southern Portugal, *Tectonophysics*, 271, 123-134.
- Correia, A. and Ramalho, E.C. (1999). One-dimensional thermal models constrained by seismic velocities and surface radiogenic heat production for two main geotectonic units in Southern Portugal, *Tectonophysics*, 306, 261-268.
- Correia, A. and Safanda, J. (1999). Preliminary ground surface temperature history in mainland Portugal reconstructed from borehole temperature logs. *Tectonophysics*, 306, 269-275.
- Correia, A. and Safanda, J. (2001). Ground surface temperature history at a single site in southern Portugal reconstructed from borehole temperatures. *Global and Planetary Change*, 29, 155-165.
- Correia, A. and Safanda, J. (2002). Geothermal modeling along a two-dimensional crustal profile in Southern Portugal, *Journal of Geodynamics*, 34, 47-61.
- Correia, A., Ramalho, E., Rodrigues da Silva, A. M., Mendes-Victor, L. M., Duque, M. R., Aires-Barros, L., Santos, F. M. and Aumento, F., (2002). "Portugal" - In: *Atlas of Geothermal Resources in Europe* (Eds: Suzanne Hurter and Ralph Haenel), GGA, Hannover, Germany. 92p., pp.47-49.

- Correia, A. and Ramalho, E.C. (2010). Update Heat Flow Density Map for. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010.
- Davies, J. H. and Davies, D. R. (2010). Earth's surface heat flux, *Solid Earth*, 1, 5-24.
- Fernandez, M., Marzan, I., Correia, A. and Ramalho, E. (1998). Heat flow and lithospheric thermal regime in the Iberian Peninsula, *Tectonophysics*, 291, 29-53.
- Fowler, C.M.R. (2005). *The Solid Earth. An introduction to Global Geophysics.* Cambridge University Press.
- Haenel, R. and Staroste, E.(Eds.) (1988(a)). *Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland.* Verlag Th. Schaefer, Hannover, 74 pp., 110 plates.
- Haenel, R., Legrand, R., Balling, N., Saxov, S., Brow, K., Goble, R., Meunier, J. Fanelli, M., Rori, A., Solomone, M., Taffi, L., Prins, S., Berley, A.J., Edmunds, W.M., Oxburgh, E.R., Richardson, S.W. and Wheildon, K.(1980(b)). *Atlas of Subsurface Temperature in the European Community,* Th. Schafer Druckerei GmbH, Hannover, 36 pp, 43 maps.
- Hamza, V.M and Beck, A.E. (1972). Terrestrial heat flow, the neutrino problem and a possible energy source in the core. *Nature*, 240, 343-4.
- Hearst, R.J., Nelson, H.P and Paillett, L. F.(2000). *Well Logging for Physical for Geophysicists, Geologists and Engineers.* Second Edition.
- Kappelmeyer, O. and Haenel, R. (1974). *Geothermics With Special Reference to Application.* Monogr. Ser., 1,4 Stuttgart, 238 p.
- Lee, W. H. K. (1970). On the global variations of terrestrial heat flow. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 2, 332-341. *A Heat Transfer Textbook.* Cambridge, Massachusetts, Phlogiston Press.
- Lister, C. R. B., (1972). On the thermal balance of a midocean ridge. *Geophys . J. Roy. Astr. Soc.*, 26, 515-535.

- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. and Johnson, J. R. (1993). Heat loss from the Earth's interior – analysis of the global data set. *Rev.*, 32, 803-27.
- Ramalho, E.C. e Correia, A. (2006). Contributo para a caracterização da crosta em Portugal Continental, Análise e processamento de dados geotérmicos compilados até 1996, Relatório Interno do INETI, 32 p.
- Ramalho, E.C. (1999). O "Atlas de Recursos Geotérmicos da Europa" como impulso da inventariação da informação geotérmica existente em Portugal Continental, Actas do Encontro sobre Sistemas de Informação Geográfica e Geológica de Base Regional, 23 Setembro 1999, Beja, Painel 1 - Projectos Europeus e Transfronteiriços, p 141-144.
- Revelle, R. and Maxwell, A. E. (1952). Heat flux through the floor of the Eastern North Pacific Ocean. *Nature*, 170, 199-200.
- Rybach, L. and Buntebarth, G. (1982). Relationship between the petrophysical properties density, seismic velocity, heat generation and mineralogical constitution. *Earth Planet. Sci. Lett.* 57, 367-376.
- Rybach, L. and Buntebarth, G. (1984). The variation of heat generation density and seismic velocity with rock type in the continental crust. *Tectonophysics*, 103, 309-344.
- Serviços Geológicos de Portugal, Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 7, Escala 1: 200,000 (1984).
- Serviços Geológicos de Portugal, Carta Hidrogeológica do sul de Portugal, Notícia Explicativa, Escala 1: 200,000 (1989).
- Serviços Geológicos de Portugal, Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 8, Escala 1:200,000 (1992).
- Simmons, G. and Horai, K. (1968). Heat flow data 2. *J. Geophys. Res.*, 73, 20, 6608-6629.

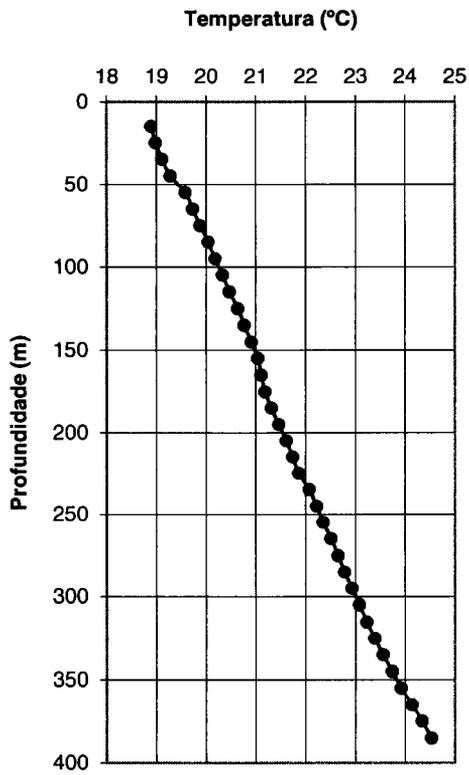
Safanda, J., Rajver, D., Correia, A. and Dedecek, P. (2007). Repeated temperature logs from the sites of the Czech, Slovenian and Portuguese borehole climate observatories. *Climate of the Past*, 3, 453-462.

Turcotte, D. L and Schubert, G. (2004). *Geodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Vitorello, I. and Pollack, H.N. (1980). On the variation of Continental heat flow with age and thermal evolution of the continents, *J, Geophys, Res*, 85 (B2), 983-995.

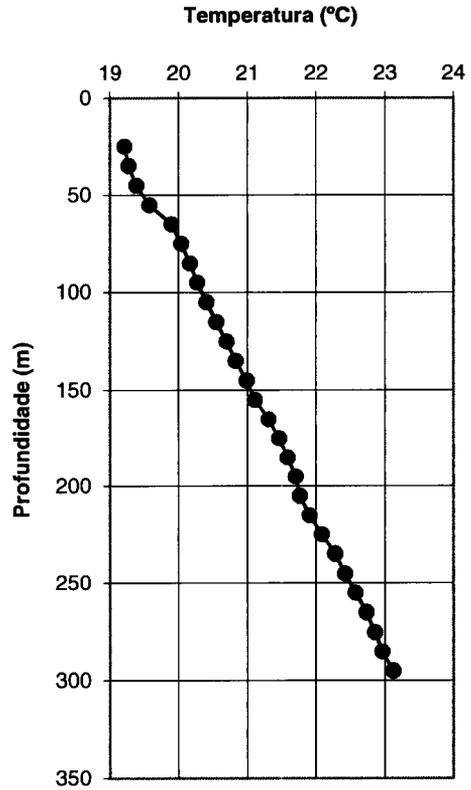
ANEXO 1

SDM-10



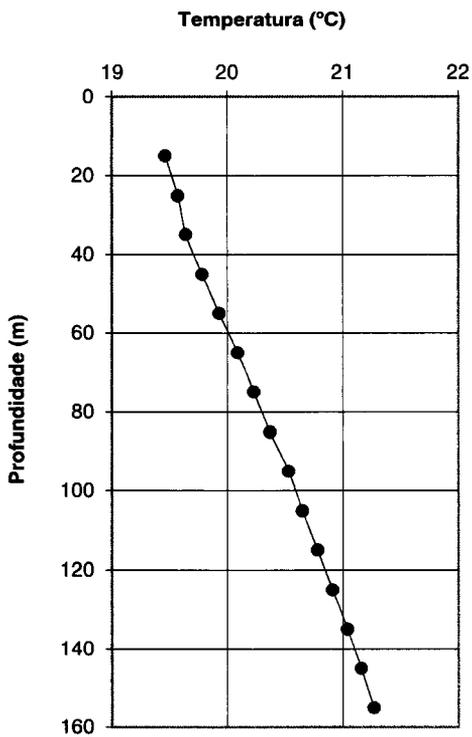
01

SDM5



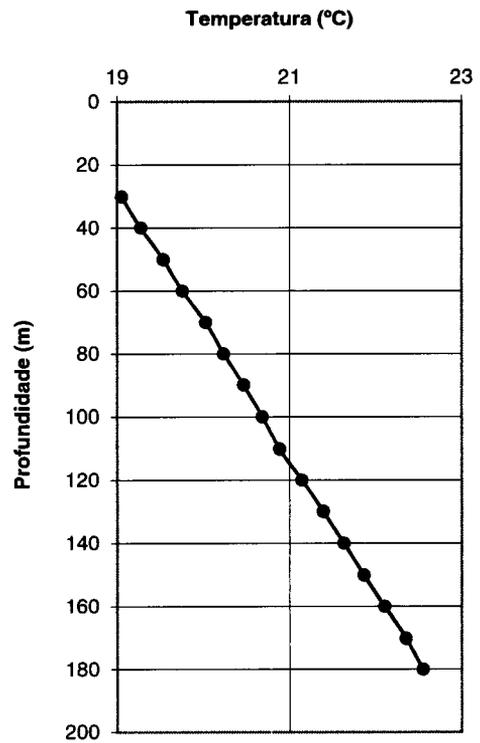
02

SDM8



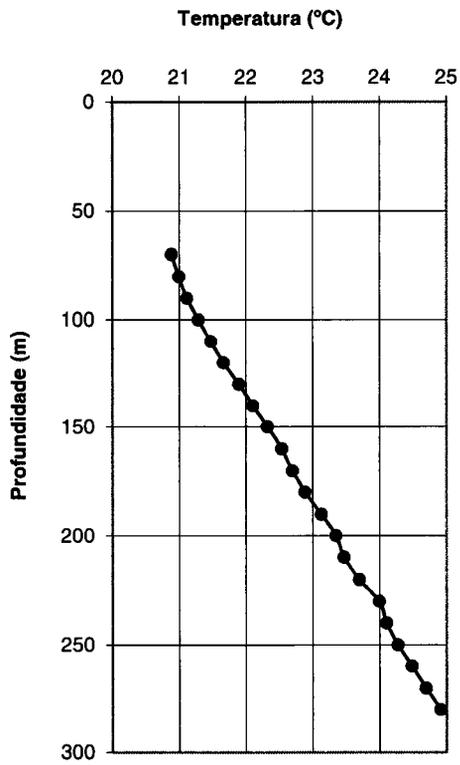
03

SDSA-2



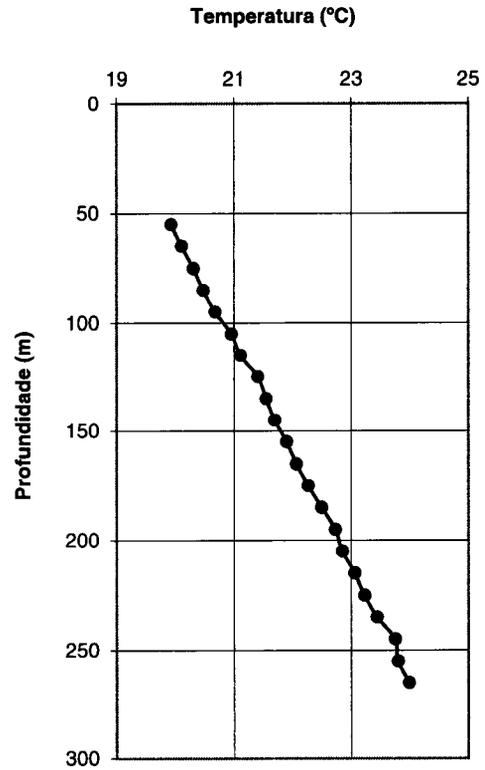
04

SDSA-3



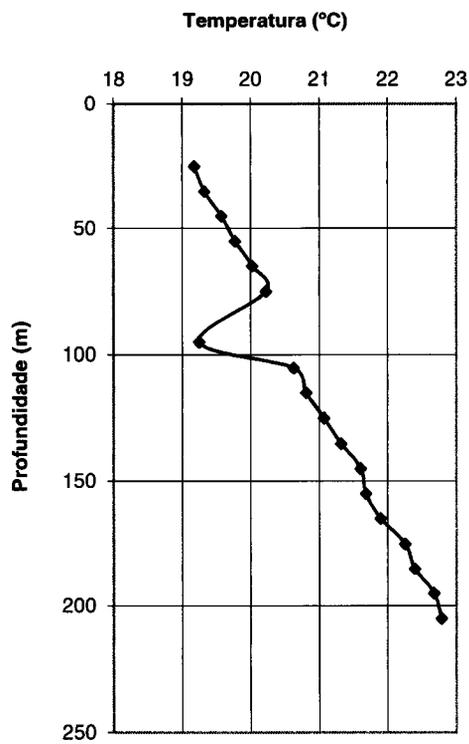
05

FS26



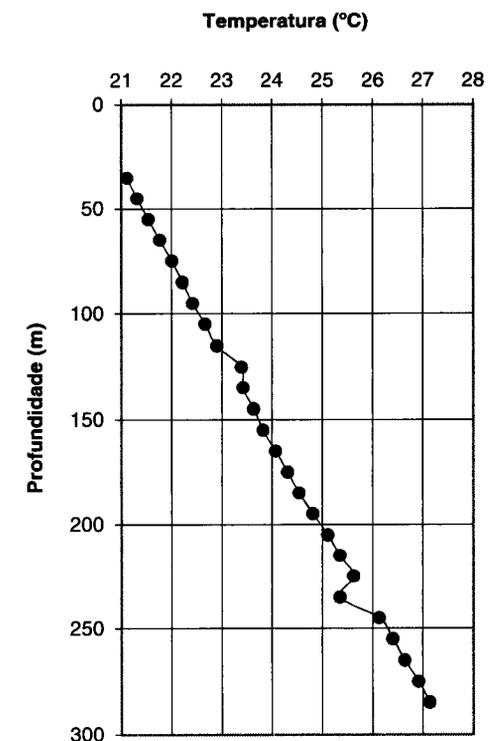
06

FS25



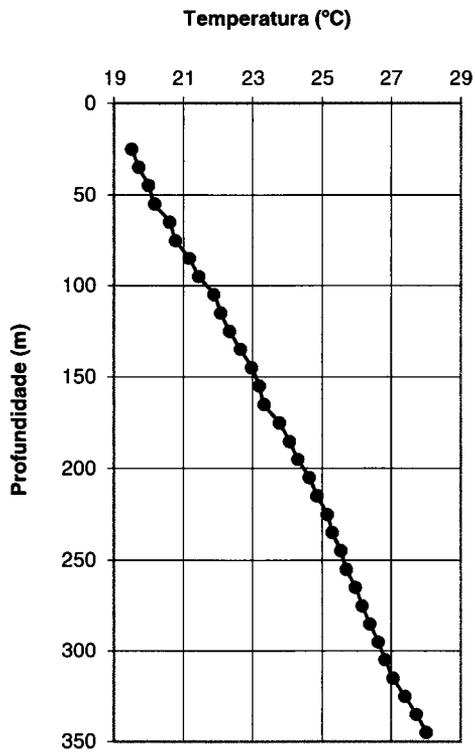
07

CH1



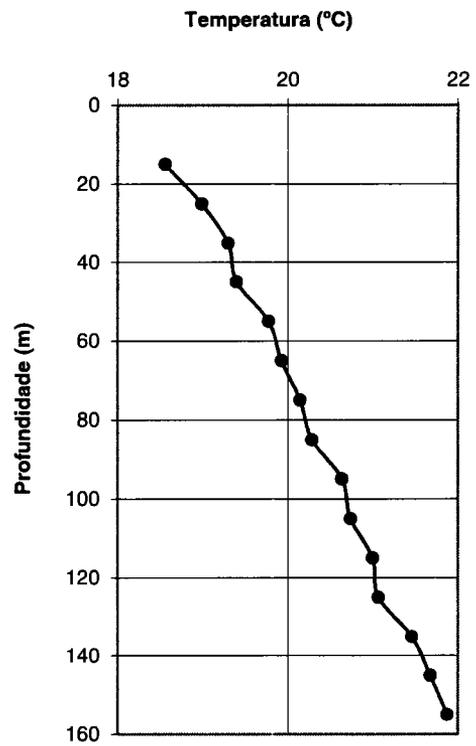
08

OT1



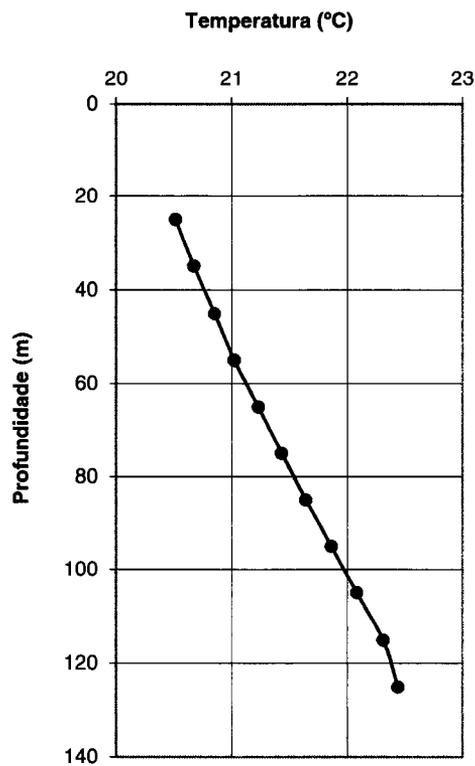
10

AL1



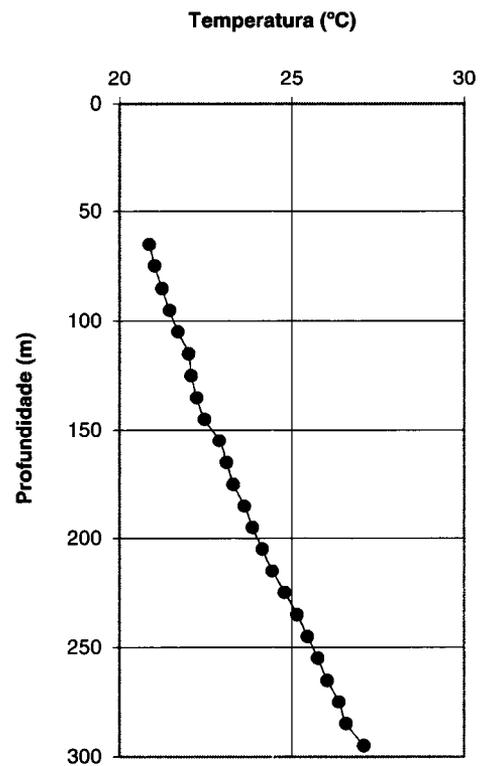
11

NE26



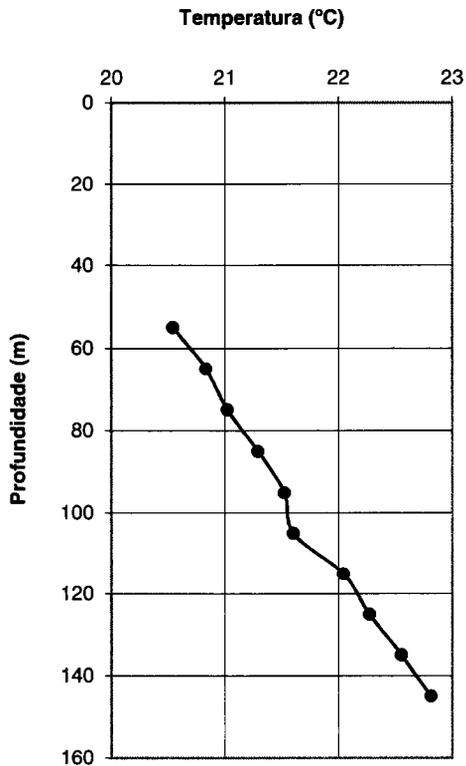
13

NE6



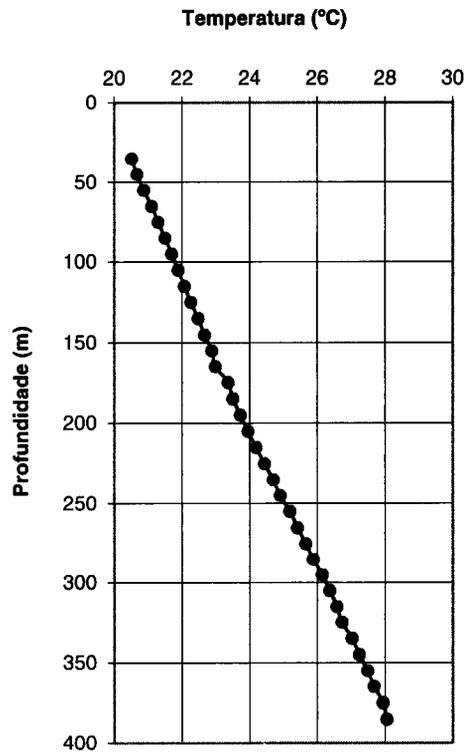
14

NE4



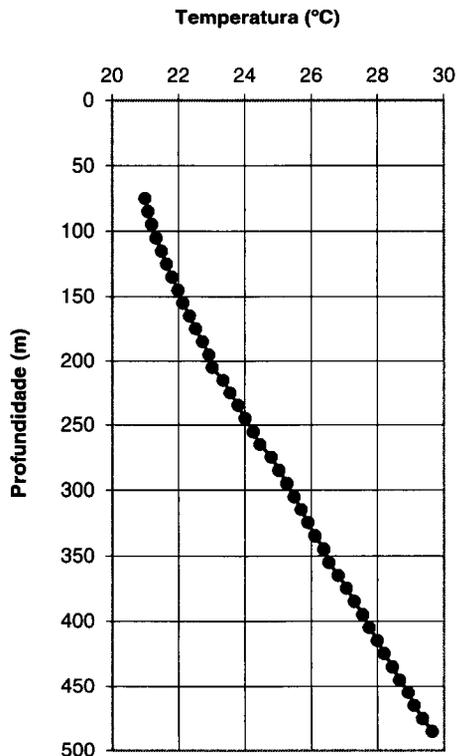
15

VC1



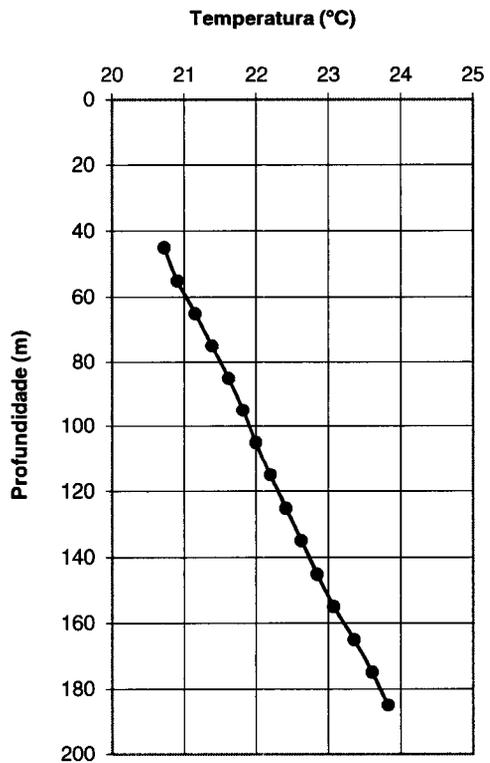
17

PN2



18

CST1



19

ANEXO 2

