



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências
2013

**ELSA CRISTINA
LOPES RODRIGUES
RAMALHO**

**SONDAGENS MECÂNICAS E PROSPECÇÃO
GEOFÍSICA NA CARACTERIZAÇÃO DE FLUIDOS**



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências
2013

**ELSA CRISTINA
LOPES RODRIGUES
RAMALHO**

**SONDAGENS MECÂNICAS E PROSPECÇÃO
GEOFÍSICA NA CARACTERIZAÇÃO DE FLUIDOS**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutoramento em Geociências, realizada sob a orientação científica do Doutor Manuel João Senos Matias, Professor Catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho ao meu filho Alexandre, pelas muitas lições de vida que me tem dado ao longo dos seus 12 anos e por me ensinar a cada momento o que é realmente importante, proporcionando-me em contínuo as melhores vivências que uma mãe pode experimentar.

o júri

presidente

Doutor João Manuel Nunes Torrão
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Manuel João Senos Matias
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Doutora Maria Teresa Condesso de Melo
Investigadora Auxiliar do Instituto Superior Técnico de Lisboa

Doutor João Paulo Gameira Carvalho
Técnico Superior Principal do Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Lisboa

agradecimentos

Seria impossível levar a cabo um trabalho com estas características e nestas circunstâncias sem a colaboração de um conjunto de colegas, amigos e entidades, cuja participação variada e em diversas áreas enriqueceu substancialmente a sua qualidade.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Manuel João Senos Matias, por todo o apoio incansável sempre demonstrado ao longo da execução deste trabalho, a nível científico, técnico e moral.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia, em especial à Prof^a Doutora Teresa Ponce Leão, Prof. Doutor Mário Rui Machado Leite, Doutor Tomás Oliveira e Doutor Daniel de Oliveira, por me terem proporcionado as condições necessárias ao longo de toda a execução e, muito especialmente, à sua conclusão.

A todos os que de alguma forma me ajudaram e aos co-autores dos trabalhos e exemplos aqui apresentados, nomeadamente Prof. Doutor Fernando Monteiro Santos, Doutor Augusto Costa, Dr^a Judite Fernandes, Doutor Eduardo Paralta, Doutora Isabel Ribeiro, Prof. Doutor João Pais, Doutor Mohamed Khalil, Prof. Doutor Manuel Marques da Silva, Prof. Doutor António Correia, Prof. Doutor Júlio Carneiro, Dr^a Carla Midões, Dr^a Carla Lourenço, Eng^o Pedro Ferreira, Prof^a Doutora Edite Martinho, Prof^a Doutora Amélia Dill, Dr. Rui Rocha, Prof. Doutor Rui Gonçalves, Eng^a Sofia Barbosa, Doutor João Carvalho, Doutora Helena Amaral, Dr^a Maria João Moinante, Eng^o Pedro Sousa, Eng^o Carlos Silva Lopes, Eng^o Helder Hermozilha, Eng^o Francisco Sobral e Leonor Freitas, um agradecimento pela colaboração sem os quais teria sido impossível a sua realização. Um agradecimento muito especial ao meu colega e amigo Dr. Alain Francès, por toda a colaboração, encorajamento e boa disposição dados na fase final deste trabalho.

Aos colegas Jaime Leote, Joaquim Gomes, Manuel Silva e José Marquilhas, cuja colaboração e excelente companhia no trabalho de campo ao longo de duas décadas tem sido inestimável. Um agradecimento especial, a título póstumo, ao colega Pedro Falé por toda a colaboração ao longo dos anos na área das diagrfias. Aos meus amigos e restantes colegas do LNEG por todo o apoio que me deram, em especial na fase final da dissertação.

Às empresas Resioeste, Empresa de Desenvolvimento Mineiro, Câmara Municipal de Monção, Instituto para o Apoio e Desenvolvimento, Direcção Nacional de Geologia de Moçambique e restantes entidades pela autorização de publicação dos dados apresentados. À empresa Geosurveys pela colaboração. Parte deste trabalho foi financiado pelo Fundo Social Europeu (FSE) no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projecto CRUDE (PTDC/CTE-GEX/72959/2006).

Ao meu filho, Alexandre, à minha mãe, Odete pelo apoio que nunca cessaram de me dar, mesmo nos momentos mais difíceis.

palavras-chave

Sondagens mecânicas, diagrfias, prospecção geofísica de superfície, caracterização de fluidos, Hidrogeologia, Geotermia, Ambiente.

resumo

Esta dissertação aborda a utilização de métodos geofísicos de superfície e de profundidade na caracterização de fluidos, compreendendo várias abordagens distintas, consoante o tipo de temática em análise. Assim, o assunto proposto para a presente dissertação relaciona-se com a utilização conjunta de sondagens mecânicas e prospecção geofísica na caracterização de fluidos através da exploração de três temáticas distintas, designadamente a Hidrogeologia, a Geotermia e o Ambiente.

O presente trabalho de dissertação baseado na experiência profissional da autora, é feito de acordo com o estabelecimento de uma linha condutora, fundamentada e estruturada, para uma visão global do modo como a interpretação integrada das sondagens mecânicas e dos métodos geofísicos dá um forte contributo para a melhoria do conhecimento de uma região, seja ele geológico, hidrogeológico ou ambiental.

Os temas a abordar foram seleccionados não só pela sua indiscutível importância, devido ao interesse estratégico que actualmente suscitam, como também pelos diferentes modos de processar e interpretar a informação geofísica adquirida consoante os objectivos da mesma, de forma a salientar particularidades na respectiva interpretação e integração de dados.

keywords

Boreholes, geophysical logging, geophysical prospecting, fluid characterization, Hydrogeology, Geothermics, Environment.

abstract

This work discusses the use of geophysical methods in the characterization of fluids. It comprises several different approaches, depending on the type of the analyzed thematic. Thus, the issue proposed for this thesis is related with the combined use of geophysical surveys and boreholes to characterize fluids, through the approach of three distinct subjects, namely Hydrogeology, Geothermics and Environment.

This dissertation is based on the professional experience of the author and follows a structured conductive line for an overview of how the integrated interpretation of borehole and geophysical methods information gives a strong contribution to improve the geological, hydrogeological or environmental knowledge of a region.

The subjects for discussion were selected not only for their unquestionable importance, due to the strategic interest that they currently generate, but also because of the different ways of processing and interpreting geophysical data acquired according to the same objectives, in order to highlight peculiarities in their interpretation and data integration.

Índice geral

	Pág.
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	xiii
Lista de simbologia, acrónimos e unidades comuns	xvii
1. Introdução	1
2. Utilização de diagrfias em sondagens mecânicas com fins hidrogeológicos	7
2.1. Objectivos do capítulo	7
2.2. Introdução	8
2.3. Critérios de escolha das diagrfias a realizar	9
2.4. Controlo na aquisição de dados	12
2.5. Processamento dos dados de diagrfias	14
2.6. Interpretação de diagrfias.....	16
2.6.1. Identificações litológicas e correlações estratigráficas	21
2.6.2. Identificação das zonas de alteração e fracturação	27
2.6.3. Identificação de camadas aquíferas.....	28
2.6.4. Detecção de fracturas	31
2.6.5. Estimativa da qualidade química da água nativa	35
2.6.5.1. Aplicação da diagrfia da Condutividade do Fluido	37
2.6.5.2. Aplicação da diagrfia do Potencial Espontâneo (SP).....	39
2.6.5.3. Aplicação de diagrfias de Resistividade Normal e Lateral	42
2.6.6. Estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos	45
2.6.6.1. Aplicação de diagrfias de Fluxo	46
2.6.6.2. Aplicação da Lei de Archie	48
2.6.6.3. Aplicação de diagrfias nucleares	55
2.7. Aplicação conjunta de diagrfias e de métodos geofísicos de superfície para a caracterização dos fluidos	58
2.7.1. Aplicação de diagrfias eléctricas e nucleares, SEVs e FDEM em formações compactas	59
2.7.2. Aplicação de diagrfias eléctricas e nucleares, SEVs e GPR em aquíferos multicamada	62
2.8. Breve análise custos-benefícios da utilização de diagrfias em Hidrogeologia	64
2.9. Artigos do SCI – justificação da sua inclusão e participação da autora	66
2.9.1. Khalil, M., Ramalho, E. C. e Monteiro Santos (2011) – Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of Nubian Sandstone aquifer in southern Egypt. Near Surface Geophysics, v. 9, n. 4, pp.349-355	66
2.9.2. Khalil, M. A., Hafez, M. A, Monteiro Santos, F., Ramalho, E. C., Mesbah, H. S. e El-Gady, G. M. (2010) – An approach to estimate porosity and groundwater salinity of shallow aquifers by combined application of GPR and VES: a case study in the Nubian sandstone aquifer. Journal of Near Surface Geophysics, v.8, n. 3, pp.223-233	67
2.10. Considerações finais	67
3. Utilização de diagrfias na componente cartográfica da Geotermia	71
3.1. Objectivos do capítulo	71
3.2. Introdução	72

3.3. O estudo da densidade de fluxo de calor (DFC) à superfície em Portugal.....	73
3.4. Estimativa do gradiente geotérmico	77
3.4.1. Em sondagens mineiras, de água, termométricas e geotérmicas...	78
3.4.2. Em sondagens de pesquisa de petróleo	81
3.5. Condutividade Térmica	82
3.6. Estimativa da Densidade de Fluxo de Calor à Superfície (DFC)	85
3.6.1. Em sondagens mineiras, de água, termométricas e geotérmicas ..	86
3.6.2. Através da utilização de geotermómetros	90
3.6.3. Em sondagens de pesquisa de petróleo	98
3.6.4. Cartografia da DFC	99
3.7. Produção de calor em rochas	103
3.8. Estimativa de temperaturas a diferentes profundidades	105
3.9. Artigos do SCI – justificação da sua inclusão e participação da autora	114
3.9.1. Fernández, M., Marzan, I., Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – Heat flow and lithospheric regime in the Iberian Peninsula. Tectonophysics, nº 291, pp.29-53	115
3.9.2. Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – New heat flow density determinations in Southern Portugal: a geothermal anomaly revisited. Tectonophysics, nº 291, pp.55-62	116
3.10. Considerações finais	116
4. Utilização de métodos geofísicos em problemas ambientais	119
4.1. Objectivos do capítulo	120
4.2. Introdução	120
4.3. Utilização de métodos geofísicos em estudos ambientais	122
4.4. Casos de estudo de aplicação de métodos geofísicos de superfície a problemas ambientais	127
4.4.1. Caracterização de plumas de contaminação em lixeiras a céu aberto	132
4.4.2. Caracterização de lixiviados em lixeiras seladas	138
4.4.3. Dispersão de contaminantes em antigas áreas mineiras	143
4.4.4. Identificação de fracturas eventualmente produtivas em rochas cristalinas para caracterização da envolvente de antigas minas de urânio	150
4.4.5. Utilização de métodos geofísicos para a preservação de aquíferos fissurados na marcação de sondagens mecânicas	156
4.5. Breve análise custos-benefícios da prospecção geofísica em estudos ambientais.....	159
4.6. Artigos do SCI – justificação da sua inclusão e participação da autora	161
4.6.1. Senos Matias, M. J., Marques da Silva, M. A., Ferreira P. L. e Ramalho E. C. (1994) – A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill. Journal of Applied Geophysics, nº32, pp.155-162	161
4.6.2. Ramalho, E. C., Carvalho Dill, A. e Rocha, R. (2012a) – Assessment of the leachate movement in a sealed landfill using geophysical methods. Environmental and Earth Science. DOI 10.1007/s12665-012-1742-8	162
4.6.3. Ramalho, E. C., Midões, C., Lourenço, M. C., Costa, A. e Monteiro Santos, F. A. (2012b) – Environmental assessment of an uranium experimental rock blasting in Portugal, using geophysical and hydrogeological methods. Journal of Geophysics and Engineering, nº9, pp.433-446	163
4.6.4. Ramalho, E. C., Carvalho, J. P., Gonçalves, R. e Monteiro Santos, F. A. (2012c) – Understanding the 3D structure of a thermal water fissured granite aquifer with geophysical studies. Pure and Applied Geophysics, n. 169, pp2031-2046	164
4.6.5. Ramalho, E., Carvalho, J., Barbosa, S. e Monteiro	

Santos, F. A. (2009) – Using geophysical methods to characterize an abandoned uranium mining site, Portugal. Journal of Applied Geophysics, nº67, pp.14-33	165
4.7. Considerações finais	166
5. Conclusões	169
5.1. Generalidades	167
5.2. Problemas e desafios	171
5.3. Linhas metodológicas a promover	173
5.4. Reflexões finais	175
6. Referências bibliográficas	177

Índice de figuras

	Pág.
Capítulo 2	
Fig. 2.1 – Objectivos e benefícios da utilização de diagrfias em Hidrogeologia (Ramalho et al., 2009). Destacam-se a identificação de fracturas e as estimativas da qualidade da água nativa e de parâmetros hidráulicos como factores principais da caracterização de fluidos, embora as propriedades físicas das formações atravessadas e identificações e correlações litológicas tenham grande importância para o efeito, em especial quando as formações geológicas constituem aquíferos contendo água com características típicas	10
Fig. 2.2 – Fluxograma relativo à possível ordem de realização das diagrfias convencionais mais utilizadas em Hidrogeologia referidas na Tabela 2.1	14
Fig. 2.3 – Dois modos distintos de apresentação de diagrfias num mesmo troço de uma sondagem localizada no Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do Chão. (Acima) <i>Software LOGSHELL</i> , utilizado na aquisição de dados em trabalho de campo. (Abaixo) <i>Software VIEWLOG</i> , utilizado no processamento de dados em gabinete (Ramalho, 2000a)	15
Fig. 2.4 – Factores que afectam as medidas e correcções de diagrfias (adaptado de Bayó Dalmau, 1988, in Ramalho et al., 2009)	17
Fig. 2.5 – Fig. 2.5 – Esquema das várias zonas de invasão da lama numa formação aquífera (adaptado de Chappelier, 1992). R_m – resistividade eléctrica da lama de perfuração (ohm.m); R_{mf} – resistividade eléctrica do filtrado da lama (ohm.m); R_{mc} – resistividade eléctrica do <i>cake</i> (ohm.m); R_{xo} – resistividade eléctrica da zona invadida (ohm.m); R_t – resistividade eléctrica da formação não perturbada (ohm.m); R_w – resistividade eléctrica da água subterrânea (ohm.m)	18
Fig. 2.6 – Diagrfias de Radiação Gama Natural e do SPR realizadas em duas sondagens mecânicas do Sistema Aquífero de Visos-Querida (Ramalho, 2003). Estas duas diagrfias serviram para identificar as principais litologias (areias e argilas) em cada sondagem, definir a coluna definitiva da captação e correlacionar estratigraficamente as duas sondagens	22
Fig. 2.7 – Correlações litológicas efectuadas entre 3 sondagens mecânicas num perfil NW-SE a partir das diagrfias de SPR e Radiação Gama Natural (Ramalho et al., 2009) de captações do Sistema Aquífero do Cretácico de Aveiro, com consequências na qualidade química da água captada	23
Fig. 2.8 – Diagrfias efectuadas na sondagem de Belverde. (a1 e a2) registo dos dados não processados da sonda SAA-1000 pelo método da área variável. Diagrfias de Neutrões, Acústica, do SPR e Radiação Gama Natural. Correspondente troço da litologia (Ribeiro et al., 2003)	25
Fig. 2.9 – Diagrfias efectuadas na sondagem de Belverde. (A e a) registo dos dados não processados da sonda Mountsopris, Inc. SAA-1000, apresentados de dois modos diferentes, referentes à chegada das ondas P nos dois receptores Rx1 (A1 e a1) e RX2 (A2 e a2). Diagrfia Acústica, do SPR e Radiação Gama Natural. Neste troço, não existe diagrfia de Neutrões para correlação. Correspondente troço da litologia (Ribeiro et al., 2003)	26
Fig. 2.9 – Escalas relativas nas diagrfias de Neutrões das sondas de neutrões utilizadas em Hidrogeologia (adaptado de Chappelier, 1992, in Ramalho et al., 2009)	27
Fig. 2.10 – Diagrfia do SPR e diagrfias nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da coluna de fluido (Fluxo e Gradiente Geotérmico), com referência para as zonas alterada e fracturada numa sondagem realizada no sistema aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 2000b; Ramalho et al., 2009)	29
Fig. 2.11 – Diagrfias do SP, SPR e Radiação Gama Natural numa sondagem localizada no	

Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro. A interpretação conjunta destas diagrfias em zonas bem conhecidas de aquíferos multicamada permite localizar camadas aquíferas, com baixo conteúdo em argilas e camadas argilosas, identificadas pelos picos de radiação gama natural e escolher para a colocação de tubos-ralos nas zonas que se afigurem mais promissoras a nível de espessura e características químicas da água, valorizando a qualidade final da captação	30
Fig. 2.12 – Exemplo de um conjunto de diagrfias em formações compactas: diagrfias nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e diagrfias da coluna de fluido (Fluxo com o sistema de impulso de calor, Condutividade do Fluido, Temperatura e Gradiente Geotérmico) efectuadas numa sondagem mecânica localizada no Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do-Chão (Ramalho, 2000c)	33
Fig. 2.13 – Identificação de fracturas com o recurso a diagrfias (Ramalho, 2000d; Ramalho et al., 2009) numa sondagem localizada no Sistema Aquífero do Anticlinal de Estremoz. Diagrfias eléctricas (SPR e RN64”), nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da coluna de fluido (Temperatura e Gradiente Geotérmico)	35
Fig. 2.14 – Ábaco que relaciona a resistividade eléctrica (ohm.m) e/ou a condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$ e $^{\circ}\text{F}$) e a concentração equivalente em NaCl (mg/l) (adaptado de Keys, 1990)	37
Fig. 2.15 – Diagrfias eléctricas (RN 16”), nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da coluna de fluido (Fluxo, Condutividade do Fluido e Gradiente Geotérmico) numa sondagem localizada no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 2000e)	38
Fig. 2.16 – Coluna litológica, diagrfias de Radiação Gama Natural, SP e SPR de uma sondagem mecânica localizada no sector Murtosa-Torreira do Sistema Aquífero Cretácico de Aveiro, correlacionando a forma das curvas e os valores de SP com as características da água nativa (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	41
Fig. 2.17 – Variação da resistividade eléctrica com a distância ao eixo da sondagem: a) Na zona invadida próxima à sondagem, a água de formação é substituída pelo filtrado do fluido de perfuração (as partes sólidas da lama formam o <i>cake</i>). O filtrado diminui progressivamente até que a resistividade se estabiliza na zona não invadida. b) Perfil de resistividade esquemático das condições presentes em a) (adaptado de Beck, 1981, in Ramalho et al., 2009)	43
Fig. 2.18 – Diagrfias eléctricas (SP, SPR, RN 16” e RN 64”) e nucleares (Radiação Gama Natural), utilizadas na estimativa da qualidade da água nativa dos troços permeáveis numa sondagem localizada na Gafanha da Nazaré, no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro (adaptado de Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	44
Fig. 2.19 – Registos de salinometria e das diagrfias de fluxo em repouso (a) e em bombagem (b) (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009) realizados numa sondagem localizada no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro	47
Fig. 2.20 – Diagrfias de SP, Radiação Gama Natural, RN16” e RN64” de uma sondagem no Vale do Ludo localizada no Sistema Aquífero da Campina de Faro. Salientam-se as zonas amarelas, que correspondem aos troços permeáveis (zonas simultaneamente com baixa radiação gama natural, indicadores da baixa presença de argilas e resistividade eléctrica elevada, indicadores da presença de zonas arenosas) e onde foram colocados tubos-ralo, aquando do entubamento da sondagem	50
Fig. 2.21 – Diagrfias de SP, Radiação Gama Natural, RN16” e RN64” de uma sondagem realizada nas Dunas Douradas-Almansil, localizada no Sistema Aquífero da Campina de Faro. Salientam-se as zonas amarelas, que correspondem aos troços permeáveis (zonas simultaneamente com baixa radiação gama natural, indicadores da baixa presença de argilas e resistividade eléctrica elevada, indicadores da presença de zonas arenosas) e onde foram colocados tubos-ralo, aquando do entubamento da sondagem	52
Fig. 2.22 – Análise dos 3 troços de tubo-ralo da Fig. 2.21 e Tabela 2.11 que revelaram a presença de argilas com a metodologia de Khalil et al. (2011). (Acima) Gráfico correspondente de $F_a \times R_t$. (Abaixo) Tabela correspondendo às estimativas de ϕ recorrendo à	

eq. (2.2)	54
Fig. 2.23 – Perfil de alteração típico de uma rocha gabro-diorítica e respectivas características hidráulicas (adaptado de Paralta, 2001). Está igualmente representada a zona fracturada mais profunda (zona d) sob a rocha não alterada	56
Fig. 2.24 – Diagrafias de Neutrões, de Fluxo, de Resistividade Normal 8" e 16" (Ramalho, 1998), de Porosidade Archie (determinada através da aplicação da Lei de Archie) e de Porosidade Neutrões (determinada através da aplicação da fórmula empírica de Baron e Chappelier (1998) da eq. (2.14) e Permeabilidade de Darcy estimada a partir da eq. (2.15) com a Porosidade de Archie e com a Porosidade de Neutrões numa sondagem localizada no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 1998; Ramalho et al., 2000; Ramalho et al., 2009)	57
Fig. 2.25 – (Esquerda) Resultados da inversão 1D da SEV1 com o dispositivo de Schlumberger e $AB/2_{máx.} = 250$ m, cujo centro geométrico se localiza na sondagem da Fig. 2.24 – modelo de 5 camadas. (Direita) Resultados da inversão 1D da SEV6 com o dispositivo de Schlumberger e $AB/2_{máx.} = 250$ m, a 75 m do perfil da Fig. 2.26	59
Fig. 2.26 – Modelos inversos de condutividade e resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade com os parâmetros referidos na Tabela 2.13 (Ramalho, 2007)	61
Fig. 2.27 – Diagrafias de Radiação Gama Natural, do SPR e de Resistividade Normal 16" e 64 efectuadas numa sondagem mecânica do aquífero arenoso multicamada da Núbia, Egipto. Diagrafias estimadas de Condutividade da Água, Porosidade e TSD a partir da aplicação das eq. 2.1 e 2.8. As áreas amarelas representam zonas argilosas interpretadas a partir das diagrafias do SPR e da Radiação Gama Natural (adaptado de Khalil et al., 2010) ..	63
Fig. 2.28 – (Em cima) Perfil de GPR. Linhas brancas: Reflector 1 $\cong 20$ ns – superfície do terreno; Reflector 2 $\cong 180$ ns – topo da camada silto-argilosa; Reflector 3 $\cong 280-300$ ns – NHE. (Em baixo) Modelo final da resistividade a partir da interpretação da SEV realizada com o dispositivo de Schlumberger com $AB/2$ a variar de 1 a 400 m nas proximidades da sondagem mecânica da Fig. 2.24. A tabela ao lado corresponde aos parâmetros do modelo (Khalil et al., 2010)	64
Capítulo 3	
Fig. 3.1 – Localização dos 209 pontos onde foram efectuadas medidas para estimativas de DFC em Portugal Continental, respectiva proveniência e distribuição geográfica nas unidades tectono-estratigráficas	74
Fig. 3.2 – Excerto da base de dados de sondagens geotérmicas que pretende incluir toda a informação recolhida em Portugal Continental desde 1982, que actualmente contém 209 entradas	76
Fig. 3.3 – Campos da base de dados de Geotermia (Ramalho, 1999)	77
Fig. 3.4 – Diagrafias de Temperatura e do Gradiente Geotérmico numa sondagem mecânica localizada no sistema aquífero da Campina de Faro (Ramalho et al., 2009). Até aos 70 m encontra-se a zona dominada por arenitos, com um gradiente geotérmico médio de cerca de 22 °C/km, estimado entre os 30 e os 70 m. A zona entre os 70 e 150 m apresenta circulação interna de água, motivo pelo qual o gradiente geotérmico desce para valores que, no troço entre os 125 e os 135 m, atingem próximo dos 0 °C/km, característico de zonas com intensa circulação de água, designadamente zonas cársicas, aumentando ligeiramente entre os 135 e os 150 m. Abaixo desta profundidade, está-se perante a coexistência de dois fenómenos. Por um lado, alterações na litologia fazem variar o declive da recta da temperatura em profundidade. Por outro lado, o facto de se estar próximo ao fundo da sondagem faz com que ocorram alterações na temperatura da coluna de fluido, resultantes de circunstâncias como, por exemplo, a existência de correntes de convecção térmica devidas à sua própria variação do diâmetro da sondagem	80
Fig. 3.5 – Diagrafias ideais de temperatura em sondagens mecânicas em equilíbrio térmico (adaptado de Conaway, 1987). Curva a – Distribuição de temperatura com a profundidade, sem qualquer tipo de perturbação. Neste caso, o gradiente geotérmico depende apenas da	

condutividade térmica da rocha. Curva b – Sondagem mecânica que atravessa 3 formações diferentes com condutividades térmicas distintas. Curva c – Efeito de uma fonte de calor superficial numa diagrafia de Temperatura. Curva d – Reacção exotérmica causada por cimentação do entubamento da sondagem	81
Fig. 3.6 – Diagrafias ideais de temperatura em sondagens mecânicas que não se encontram em equilíbrio térmico (adaptado de Conaway, 1987). Curva a – Zona permeável numa sondagem mecânica após um período de circulação de fluido a menor temperatura do que a água de formação. Curva b – Efeito da entrada de líquido da formação numa sondagem, com circulação em sentido ascendente. Curva c – Efeito da entrada de líquido da formação numa sondagem, com circulação em sentido descendente. Curva d – Situação análoga à diagrafia b, mas com o líquido da formação a fluir de maneira mais intensa	81
Fig. 3.7 – Distribuição das origens dos 131 pontos utilizados para estimativa de DFC	86
Fig. 3.8 – Localização dos 131 pontos de estimativa de DFC e respectiva proveniência	87
Fig. 3.9 – (a) Coluna litológica simplificada da sondagem mecânica SDFA-1 (modificado de Direcção Geral de Geologia e Minas, 1982). (b) Diagrafia de Temperatura da sondagem SDFA-1 (campanha de 25 de Outubro de 1996). (c) Diagrafia de Temperatura da sondagem SDFA-1 (campanha de 22 de Novembro de 1996). O gradiente geotérmico médio calculado em todas as 3 campanhas termométricas realizadas (a 3ª campanha teve lugar em Março de 1997) foi de 27 °C/km, A condutividade térmica efectiva utilizada para o cálculo da DFC foi calculada com medidas de condutividade térmica realizadas em testemunhos de sondagem do furo SDFA-1 por Duque (1991) e o valor obtido para esta última foi de 2,44 Wm ⁻¹ K ⁻¹ . Com estas novas determinações de temperatura na sondagem SDFA-1, a sua DFC é de 66 mW/m ²	88
Fig. 3.10 – Esquema dos critérios utilizados critérios utilizados para a aceitação ou rejeição de dados na estimativa da DFC para os vários tipos de sondagens mecânicas com diagrafias de Temperatura designadamente de água, mineiras, termométricas ou geotérmicas (Ramalho e Correia, 2006). sd – desvio padrão	89
Fig. 3.11 – Mapa com a classificação da qualidade dos dados de DFC em Portugal Continental, baseada nos critérios mostrados na Fig. 3.10 e na Tabela 3.3. Devido à impossibilidade de estimar o gradiente geotérmico com a aplicação simples de geotermómetros, os pontos correspondentes às ocorrências termais encontram-se sem classificação	91
Fig. 3.12 – Ocorrências de água mineral natural e sondagens mecânicas com estimativas de DFC na parte norte do Maciço Hercínico	92
Fig. 3.13 – Temperatura do reservatório (°C) obtida através da aplicação directa do geotermómetro da sílica (Truesdell, 1976) às ocorrências de água mineral seleccionadas	94
Fig. 3.14 – Medidas precisas de temperatura em profundidade (Almeida, 1992; Duque et al., 1998) na zona N do Maciço Hercínico a partir das sondagens representadas na Fig. 3.10 ...	96
Fig. 3.15 – Temperatura da sílica (°C) em ocorrências de água mineral natural em função de estimativas da DFC (mW/m ²) (q) das sondagens seleccionadas da Fig. 3.12	96
Fig. 3.16 – Diagrafia de Temperatura na sondagem SDV-2, na zona do Vau de S. Pedro do Sul (Almeida, 1992). Campanha efectuada em Junho de 1991, com temperatura superficial de 19 °C (Almeida, 1992)	98
Fig. 3.17 – Distribuição global da DFC na crosta terrestre com base em mais de 24000 medidas de campo <i>on-shore</i> e <i>off-shore</i> , complementada por estimativas de DFC em regiões sem medidas, baseadas em valores empíricos característicos de DFC em vários ambientes tectónicos e geológicos. São mostrados no mapa os limites das placas tectónicas principais e o contorno dos continentes (IHFD Commission, 2012)	100
Fig. 3.18 – Mapa da distribuição da DFC à superfície na Europa (Hurter e Haenel, 2002)	101

Fig. 3.19 – Dados de DFC <i>off-shore</i> e <i>on-shore</i> tendo em conta 1) sondagens mecânicas mineiras e de água, 2) sondagens mecânicas dos petróleos, 3) sondagens mecânicas termométricas e 4) geotermómetros aplicados a águas de circulação profunda	102
Fig. 3.20 – Mapa-síntese do zonamento de DFC para Portugal Continental baseado em valores de DFC e características geológicas e estruturais (Correia e Ramalho, 2005)	103
Fig. 3. 21 – Levantamento espectrométrico de radiação gama natural nos canais do U, Th e K na zona do Granito Radioactivo de S. Pedro do Sul (Saraiva et al., 1997)	105
Fig. 3. 22 – Mapa da distribuição da temperatura a 500 m de profundidade em Portugal Continental	107
Fig. 3. 23 – Mapa da distribuição da temperatura a 1.000 m de profundidade na Europa (Hurter e Haenel, 2002)	108
Fig. 3. 24 – Mapa da distribuição da temperatura a 1.000 m de profundidade em Portugal Continental	109
Fig. 3. 25 – Mapa da distribuição da temperatura a 2.000 m de profundidade na Europa (Hurter e Haenel, 2002)	110
Fig. 3. 26 – Mapa da distribuição da temperatura a 2.000 m de profundidade em Portugal Continental	111

Capítulo 4

Fig. 4.1 – Objectivos e utilização de métodos geofísicos de superfície com fins ambientais...	123
Fig. 4.2 – Excerto da Carta Geoambiental da região da Grande Beira, Moçambique, à escala original 1:50.000 (Quental et al., 2011)	129
Fig. 4.3 – Variação em profundidade de alguns parâmetros laboratoriais determinados nas sondagens Sd1 e Sd2 e respectiva projecção no perfil geoelectrico dipolo-dipolo que atravessa ambas as sondagens até ao nível freático, nomeadamente resistividade eléctrica (ohm.m), P-NACs ($\mu\text{g}/\text{kg}$), condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), porosidade (%) e NT, DNT e TNT ($\mu\text{g}/\text{kg}$) (cortesia de Amaral, H. e Khalil, M., a partir dos dados de Gonçalves, 2011)	131
Fig. 4.4 – (Esquerda) Deposição de RSU na lixeira de Maceda (1991), situação que ocorreu durante cerca de 20 anos. (Direita) Vista aérea do processo de selagem da lixeira (arquivo da Câmara Municipal de Ovar, 1999)	132
Fig. 4.5 – Pluma de contaminação da Lixeira de Ovar em 1991 com o sentido aproximado E-W, evidenciada pelo aumento de condutividade eléctrica aparente do solo (unidade mS/m) através da utilização de métodos electromagnéticos de prospecção (EM34), com cabo de 20 m e dipolo vertical. Interpretação das zonas mais críticas dos perfis de resistividade eléctrica A-A', B-B' e C-C' (unidade ohm.m) realizados na envolvente da lixeira (Ramalho et al., 1998)	133
Fig. 4.6 – Rede de fluxo da zona em estudo traçada a partir da carta de isopiezas (m) elaborada com base nos níveis dos 11 piezómetros instalados no âmbito deste trabalho e igualmente localizados na figura, cujos principais <i>logs</i> se encontram representados (Ramalho et al., 1998)	134
Fig. 4.7 – Diagrama de Schoeller relativo às análises físico-químicas resumidas efectuadas amostras de água realizadas em 1991 dos 11 piezómetros efectuados. Os piezómetros localizados a E da lixeira, justificaram a sua escolha como piezómetros de controlo (Ramalho et al., 1998). Foi no Piezómetro nº8, localizado imediatamente a W da lixeira que se registou a maior contaminação, tanto em 1991 como em 1999	134
Fig. 4.8 – Comparação dos mapas de condutividade eléctrica aparente de 1991 e 1999 (Senos Matias et al., 1999) à pseudo-profundidade de 15 m. Unidades mS/m.....	135

Fig. 4.9 – (Em cima) Pseudo-secções de resistividade (a) e de cargabilidade (b) do perfil 1 de Ovar obtidas a partir da inversão 2-D dos dados das sondagens eléctricas de resistividade e IP (Martinho, 2003), correspondendo ao perfil C-C' da Fig. 4.5. (Em baixo) Pseudo-secções de resistividade (a) e de cargabilidade (b) do perfil 2 de Ovar obtidas a partir da inversão 2-D dos dados das sondagens eléctricas de resistividade e IP (Martinho, 2003), correspondendo ao perfil B-B' da Fig. 4.5	137
Fig. 4.10 – Levantamentos geofísicos realizados em redor e sobre o aterro da lixeira selada das Gaeiras e levantamento hidrogeológico da área (Costa et al., 2002). Perfis electromagnéticos de RF-EM localizados em redor e sobre o aterro e localização dos 81 pontos de EM34, SP e de prospecção magnética efectuados sobre o aterro. A localização das SEVs 1, 2 e 3 está indicada, bem como a sua direcção. Inventário hidrogeológico (SL1, SL2, SL3 e P1 são os piezómetros de monitorização perfurados após a selagem da lixeira; o TRP2 é um furo de monitorização que não foi amostrado). A cota da boca dos piezómetros encontra-se representada (m). É referenciada a localização dos perfis Pf1, Pf2, Pf3 e Pf4 (adaptado de Ramalho et al., 2012). BW# corresponde à localização dos tubos de biogás utilizados neste trabalho referidos na Tabela 4.3	139
Fig. 4.11 – Corte N-S esquemático da lixeira sem escala horizontal, evidenciando a profundidade do soco argiloso a partir dos resultados da inversão das sondagens eléctricas verticais SEV 1, SEV 2 e SEV 3	140
Fig. 4.12 – Modelação inversa 2D da condutividade eléctrica (mS/m) obtida por FDEM através do Geonics EM34 utilizando o <i>software</i> EM34-2D desenvolvido por Monteiro Santos (2004).....	141
Fig. 4.13 – Mapa de SP (mV) realizado na zona da lixeira com a configuração <i>dipolo</i> . Os resultados obtidos no mapa de SP mostram que os valores mais elevados de SP – anomalias positivas – serão devidos a zonas de escoamento preferencial de lixiviados com condutividade muito elevadas. Estas zonas de escoamento preferencial estão materializadas na linha vermelha	142
Fig. 4.14 – Modelo esquemático de uma secção N-S mostrando as características principais e a pluma de contaminação da área da Lixeira das Gaeiras (adaptado de Ramalho et al., 2012a)	143
Fig. 4.15 – (Esquerda) Desmonte experimental do depósito de urânio de Maria Dias, em Nisa. (Direita) Descarga da linha de água na albufeira do Monte Branco	144
Fig. 4.16 – Mapa geológico dos maciços graníticos do NE do Alentejo (Solá, 2007) com localização da área de estudo	145
Fig. 4.17 – Bacia hidrográfica do desmonte experimental do depósito de urânio de Maria Dias. Localização dos pontos de medida dos levantamentos de espectrometria de radiação gama e de FDEM. As linhas cinzentas correspondem à localização das fatias verticais obtidas por modelação 3D (Ramalho et al., 2012b)	146
Fig. 4.18 – Projecção das camadas nas 6 fatias horizontais em diferentes profundidades e geograficamente orientadas dos modelos 3D de condutividade (esquerda) e resistividade eléctricas (direita) sob o mapa de Taxa de Exposição Natural (TEN) ($\mu\text{R/h}$) (esquerda) e da concentração em U (ppm) (direita) na zona do desmonte experimental de Nisa (adaptado de Ramalho et al., 2012b)	147
Fig. 4.19 – Resultados da modelação 3D de resistividade eléctrica (ohm.m), baseados na interpretação dos dados provenientes dos furos estudados pelo Departamento de Geociências (1991). (Esquerda) Fatias verticais na direcção W-E (Ramalho et al., 2012b) ...	148
Fig. 4.20 – Mapa de condutividade hidráulica (m/dia) (Ramalho et al., 2012b)	149
Fig. 4.21 – Piezometria (m), vectores de fluxo do aquífero livre simulado com o <i>Modflow</i> (a preto) e linhas de fluxo das partículas com origem no desmonte experimental de Nisa em direcção à barragem de Monte Branco (a vermelho) (Ramalho et al., 2012b)	150
Fig. 4.22 – (Esquerda) Antiga Mina da Quinta do Bispo. Bacia de decantação. Vista E.	

(Direita) Escombreira. Vista NW	151
Fig. 4.23 – Mapa geológico da Mina da Quinta do Bispo, com localização dos 4 perfis onde foram adquiridos os dados de geofísica com os vários métodos, SEVs (verde) e localização das sondagens mecânicas realizadas (F#). Os números dos quatro perfis correspondem às localizações dos pontos de EM, usadas como referencial comum a todos os levantamentos geofísicos (Ramalho et al., 2009b)	150
Fig. 4.24 – Perfil 1 – (Em cima, à direita): Secção de resistividade do modelo inverso 2D de EM34 mostrando a localização da sondagem F12 e a localização da SEV P1; (Esquerda): Log da sondagem F12 (Ao meio, à direita): Interpretação da refração sísmica deste perfil, com indicação da localização da sondagem F12. São mostradas as velocidades médias das ondas P para o único <i>spread</i> utilizado neste perfil. As letras representam a posição dos <i>shotpoints</i> utilizados na interpretação da refração. (Esquerda, em baixo): Secção de reflexão sísmica convertida em profundidade dos pontos EM11 a 17, com sobreposição da interpretação das falhas. As linhas vermelhas correspondem a falhas interpretadas. Imagens seleccionadas de Ramalho et al. (2009b). As secções 2D encontram-se dispostas de uma forma alinhada no espaço para melhorar a visualização da escala horizontal	153
Fig. 4.25 – Modelos esquemáticos conceptuais sintéticos para cada linha estudada, após a interpretação conjunta de todos os dados de geofísica superficial. Linhas pretas ponteadas – possíveis falhas não inferidas claramente em todos os métodos geofísicos. Linhas pretas a cheio – Falhas interpretadas em todos os métodos geofísicos. Os números do modelo correspondem a zonas de alteração: 1 – Formações muito alteradas/fracturadas; 2 – Formações alteradas; 3 – Formações pouco alteradas ou não fracturadas. As falhas mais profundas correspondem à interpretação da reflexão sísmica. Os pontos vermelhos no Perfil 4 indicam a área coberta apenas por métodos sísmicos (Ramalho et al., 2009b)	155
Fig. 4.26 – (Esquerda) Estabelecimento termal das Caldas de Monção. (Direita) Parque das Termas	156
Fig. 4.27 – Localização dos levantamentos geofísicos levados a cabo na zona das Caldas de Monção, com base em Carta Militar (Ramalho et al., 2012c)	157
Fig. 4.28 – Modelo esquemático bidimensional (ao meio) baseado no perfil sísmico PS1 (em baixo), no perfil eléctrico P2 (em cima). Os pontos A# da Fig. 4.26 encontram-se sobrepostos, para uma melhor visualização da escala horizontal (Ramalho et al., 2012c) ...	158
Fig. 4.29 – Curva de comparação de custos, furos-sistemas integrados, para a investigação de um local de resíduos perigosos (adaptado de Benson et al., 1982, in Martinho, 2003).....	161

Índice de tabelas

	Pág.
Capítulo 2	
Tabela 2.1 – Diagramas mais frequentemente utilizadas, a sua aplicação potencial e as condições da sondagem mecânica requeridas para a realização dessas mesmas medições (modificado de Keys, 1990 e Chappelier, 1992)	12
Tabela 2.2 – Capacidade de Troca Catiónica (CTC) de alguns minerais de argila, em meq/100g (Costa, 1985)	20
Tabela 2.3 – Classificação das principais rochas-reservatório de acordo com o seu grau de radioactividade (adaptado de Chappelier, 1992, in Ramalho et al., 2009)	21
Tabela 2.4 – Factores de Dunlap para vários aniões e catiões (Chappelier, 1992)	36
Tabela 2.5 – Determinação do NaCl equivalente dos 3 troços permeáveis individualizados do Sistema Aquífero multicamada do Cretácico de Aveiro com o recurso à eq. (2.10) e ao ábaco da Fig. 2.14 (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	42
Tabela 2.6 – Análise química da água proveniente do 1º troço permeável da zona dos tubos-ralos recolhida numa sondagem situada nas proximidades da sondagem da Fig. 2.16, factores de Dunlap e NaCl equivalente (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	42
Tabela 2.7 – Estimativa de NaCl equivalente para uma lama bentonítica de temperatura de 28 °C, utilizando valores obtidos em 4 profundidades distintas nas diagramas de RN16” e RN64” (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	45
Tabela 2.8 – Valores obtidos para a velocidade da água e respectivos caudais em cada troço de tubo-ralo, com a sondagem em repouso (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	48
Tabela 2.9 – Valores obtidos para a velocidade da água e respectivos caudais em cada troço de tubo-ralo, com a sondagem em bombagem com Q=1,3 l/s (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009)	48
Tabela 2.10 – Parâmetros estimados pela aplicação directa da Lei de Archie para as zonas permeáveis com tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.20 com o recurso às eqs. (2.1) e ao ábaco da Fig. 2.14 Mineralização total da água captada = 445,2 mg/l Condutividade eléctrica a 25 °C da água captada = 545 µS/cm Cl ⁻ filtrado da lama = 150mg/l ⇒ 247 mg/l NaCl equivalente ⇔ R _{mf} inicial = 20 ohm.m	51
Tabela 2.11 – Parâmetros estimados pela aplicação directa da Lei de Archie para as zonas permeáveis com tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.21 com o recurso à eq. (2.1) e ao ábaco da Fig. 2.14. A vermelho encontram-se os troços de tubo-ralo cujos valores obtidos revelam a presença de argilas e, como tal levaram à não aplicabilidade da Lei de Archie e à adopção da metodologia de Khalil et al. (2011). Mineralização total da água captada = 205 mg/l TDS = 165 mg/l Cl ⁻ = 80mg/l ⇒ 132 mg/l NaCl equivalente ⇔ R _{mf} inicial = 37 ohm.m	53
Tabela 2.12 – Modelo criado a partir dos dados de resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade da modelação da SEV1 e de diagramas efectuadas e estimadas na Fig. 2.24, relacionados com os dados de Rocha et al. (2003)	59
Tabela 2.13 – Relação entre as zonas de alteração referidas na Fig. 2.24 com limites de resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade de Darcy baseados nos dados das diagramas de Ramalho (1998) e SEVs de Gonçalves (1999) e Rocha (2001)	60

Tabela 2.14 – Parâmetros estimados, Factor de Formação (F), Resistividade da Água (R_w), Condutividade da Água σ_w , Porosidade total média (ϕ) e TSD para os três tubos-ralos da sondagem mecânica da Fig. 2.24 (Khalil et al., 2010)	63
--	----

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Condutividades térmicas médias e gamas de variação de algumas rochas mais comuns (adaptado de Cermak e Rybach, 1982, in Ramalho <i>et al.</i> , 2009). Unidades em $Wm^{-1}K^{-1}$	84
---	----

Tabela 3.2 – Condutividades térmicas em algumas amostras de rocha portuguesas (Almeida, 1993), cujos valores foram usados nas estimativas de DFC. Foram calculadas através de medidas laboratoriais da condutividade térmica de testemunhos de sondagem obtidos das sondagens OT1, AL1, FS25, FS26, S32 (respectivamente os números 113, 111, 119, 120 e 101 da Fig. 3.8) e ainda SDV-2, localizada em S. Pedro do Sul, cuja diagrafia de Temperatura não tornou possível a estimativa do gradiente geotérmico (ver Fig. 3.16). O valor médio corresponde à média aritmética dos valores obtidos em cada sondagem para a mesma formação (Ramalho e Correia, 2006).....	85
--	----

Tabela 3.3 – Classificações parcelares da qualidade dos dados de DFC estimados, em que a classificação final pode assumir valores entre 0 (mínimo, implicando a impossibilidade de estimar a DFC, face à fraca qualidade dos parâmetros envolvidos na sua estimativa) e 4 (máximo) baseada no tipo e qualidade de cada um dos parâmetros envolvidos. sd é o desvio-padrão.....	90
--	----

Tabela 3.4 – Emergências termais de água mineral natural localizadas no Maciço Hercínico e respectiva temperatura de emergência, características químicas, concentração em SiO_2 e temperatura obtida aplicando o geotermómetro da SiO_2 da eq. (3.5). A localização dos números atribuídos às emergências corresponde à da Fig. 3.12.....	93
--	----

Tabela 3.5 - Resumo da informação descrita neste capítulo, nomeadamente no que diz respeito à caracterização da fonte dos dados, a DFC estimada e à temperatura a 500, 1000 e 2000 m de profundidade para os 131 pontos da Fig. 3.8. Não foram estimadas as temperaturas a 500, 1000 e 2000 m de profundidade nas ocorrências termais. Para tal, é necessário um estudo mais detalhado das características das captações de cada ocorrência, o que terá que ser feito em colaboração com a DGEG.....	112
--	-----

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Utilização dos métodos geofísicos aplicados em Ambiente (modificado de Senos Matias, 2001; Martinho, 2003)	126
---	-----

Tabela 4.2 – Comparação de alguns parâmetros das análises físico-químicas de 1991 e 1999 da água dos piezómetros localizados na Fig. 4.4 (Senos Matias et al., 1999). A vermelho encontram-se os parâmetros do piezómetro mais contaminado em 1991 e 1999, localizado imediatamente a W da lixeira	135
--	-----

Tabela 4.3 – Parâmetros físico-químicos <i>in-situ</i> dos lixiviados determinados através dos tubos de biogás e sondagens mecânicas do inventário hidrogeológico (Costa et al., 2002) ...	141
--	-----

Tabela 4.4 – Limites e cores das camadas de resistividade eléctrica correspondendo às zonas principais com propriedades geoelectricas bem definidas (adaptado de Ramalho et al., 2012b)	148
---	-----

Tabela 4.5 – Piezometria média, condutividade eléctrica, temperatura e pH da água na altura do ano em que os levantamentos geofísicos foram efectuados (Maio), medidos em sondagens mecânicas localizadas próximo das linhas seleccionadas (Ramalho et al., 2009b)	153
--	-----

Tabela 4.6 – Propriedades físicas atribuídas aos materiais dos modelos esquemáticos dos Perfis 1, 2, 3 e 4. Valores médios. Vp: velocidade sísmica das ondas longitudinais (Ramalho et al., 2009b)	154
--	-----

Tabela 4.7 – Características físicas atribuídas aos materiais do modelo conceptual do Perfil PS1. As grandes variações na velocidade das ondas P do material 2 são atribuídas ao grau de fracturação	158
Tabela 4.8 – Valores indicativos de custos para cada método geofísico, incluindo o processamento da informação (Unidade de Recursos Minerais e Geofísica, 2009 e cortesia da Geosurveys, 2012). Poderão variar em função da localização do levantamento, condições do terreno, espaçamento das estações e volume de trabalho. Os valores finais são sempre estimados em orçamento específico para o trabalho a efectuar.....	160
 Capítulo 5	
Tabela 5.1 – Análise SWOT para a utilização de métodos geofísicos em trabalho de investigação de Hidrogeologia, Geotermia e Ambiente	173

Lista de simbologia, acrónimos e unidades comuns

Capítulo 1

EGS – Sistemas Geotérmicos Estimulados
 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia
 UA – Universidade de Aveiro
 UE – Universidade de Évora
 SCI – *Science Citation Index*

Capítulo 2

UA – Universidade de Aveiro
 UE – Universidade de Évora
 SEV – Sondagem Eléctrica Vertical
 GPR – *Ground Penetrating Radar*
 NHE – Nível Hidroestático (m)
 SP – Potencial Espontâneo (mV)
 SPR – Single Point Resistance, Resistência monoelectródica (ohm)
 RN – Resistividade Normal (ohm.m)
 RN8" – Resistividade Normal 8" (ohm.m)
 RN16" – Resistividade Normal 16" – Resistividade Normal curta (ohm.m)
 RN32" – Resistividade Normal 32" (ohm.m)
 RN64" – Resistividade Normal 64" – Resistividade Normal comprida (ohm.m)
 RL – Resistividade Lateral (ohm.m)
 RL6' – Resistividade Lateral 6' (ohm.m)
 DT – Tempo de trânsito da onda acústica entre o receptor RX1 e RX2 ($\mu\text{s/m}$)
 LBA – Linha de Base das Argilas
 TSD – Total de Sólidos Dissolvidos (mg/l)
 K – Constante electroquímica
 k – Condutividade hidráulica (m/d)
 Q – Caudal, fluxo (m^3/hora ; cm^3/min ; l/s; l/m)
 φ – Porosidade (%)
 σ_w – Condutividade eléctrica da água ou do fluido ($\mu\text{S/cm}$)
 cps – contagens por segundo
 V – Velocidade do fluxo (m/s)
 R – Raio da sondagem (m)
 S – Secção da sondagem (m^2)
 R_m – Resistividade eléctrica da lama de perfuração (ohm.m)
 R_{mf} – Resistividade eléctrica do filtrado da lama (ohm.m)
 R_{mc} – Resistividade eléctrica do *cake* (ohm.m)
 R_{xo} – Resistividade eléctrica da zona invadida (ohm.m)
 R_t – Resistividade eléctrica da formação não perturbada (ohm.m)
 R_w – Resistividade eléctrica da água subterrânea (ohm.m)
 F – Factor de Formação (adimensional)
 a – Factor da equação de Archie que depende da litologia (adimensional)
 m – Factor da equação de Archie que depende da cimentação (adimensional)
 F_i – Factor de Formação Intrínseco (adimensional)
 F^* – Factor de Formação Areno-xistosa (adimensional)
 Q_v – Capacidade de Troca Catiónica (meq/l)
 B – Mobilidade média dos catiões próximos da superfície dos grãos
 F_a – Factor de Formação Aparente (adimensional)
 NaCl equivalente – mg/l; ppm
 d – diâmetro do grão (cm)
 δ_w – Densidade do fluido (g/cm^3)
 μ – Viscosidade dinâmica (g/cm/s)
 g – Aceleração da gravidade (m/s^2)
 FDEM – Prospecção electromagnética no domínio frequência
 AB – Distância entre eléctrodos de corrente

SCI – *Science Citation Index*

Capítulo 3

DFC – Densidade de fluxo de calor à superfície (mWm^{-2})
q – Densidade de fluxo de calor à superfície (mWm^{-2})
k – Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
grad T – Gradiente geotérmico ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$; K/m)
 k_{efectiva} – Condutividade térmica efectiva ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 T_{SiO_2} – Temperatura de equilíbrio estimada pelo geotermómetro da sílica ($^{\circ}\text{C}$)
A – Produção de calor em rochas por unidade de volume ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
 C_{U} – Concentração em urânio (ppm)
 C_{Th} – Concentração em tório (ppm)
 C_{K} – Concentração em potássio (%)
 ρ – Densidade (kg/m^3)
z – Profundidade (m, km)
 T_z – Temperatura à profundidade z ($^{\circ}\text{C}$)
 T_0 – Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$)
i – Materiais rochosos que a sondagem mecânica atravessa
 Δz_i – Espessura da camada i (m)
 k_i – Condutividade térmica do material da camada geológica i ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 T_f – temperatura na zona não perturbada ($^{\circ}\text{C}$)
 t_c – Tempo de circulação (h)
 t_e – Tempo após paragem da circulação (h)
 A^* – constante (adimensional)
 R^2 – Coeficiente de determinação
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
IHFDC Commission – *International Heat Flow Density Commission*
BHT – *Bottom Hole Temperature*
FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
UE – Universidade de Évora
DGE – Direcção Geral de Energia e Geologia
INMG – Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
SFM – Serviço de Fomento Mineiro
IGM – Instituto Geológico e Mineiro
SCI – *Science Citation Index*

Capítulo 4

FDEM – Prospecção electromagnética no domínio frequência
EM – prospecção electromagnética
SEV – Sondagem Eléctrica Vertical
IP – Polarização Induzida
RF-EM – *Radio-frequency electromagnetics*
SP – Potencial espontâneo (mV)
RSU – Resíduos sólidos urbanos
PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos
EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro
GPR – *Ground Penetrating Radar*
NHE – Nível Hidroestático (m)
CRUDE – Desenvolvimento de novas estratégias de amostragem, análise e modelação para caracterização da contaminação dos solos e águas subterrâneas por contaminantes orgânicos
SPEL – Sociedade Portuguesa de Explosivos
NT – nitrotolueno ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
TNT – trinitrotolueno ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
DNT – dinitrotolueno ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
P-NAC – Compostos poli-nitroaromáticos ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

TDEM – Prospecção electromagnética no domínio tempo
AB – distância entre eléctrodos de corrente (m)
Cargabilidade – (mV/V)
Izopieza – (m)
Piezometria – (m)
TSD – Total de Sólidos Dissolvidos (mg/l; g/l)
TEM – Taxa de Exposição Natural ($\mu\text{R/h}$)
K – Condutividade hidráulica (m/d)
Transmissividade – (m^2/d)
Vp – Velocidade das ondas P (m/s)
 ρ – Resistividade eléctrica (ohm.m)
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
SCI – *Science Citation Index*

1. Introdução

O assunto proposto para a presente dissertação relaciona-se com a utilização conjunta de sondagens mecânicas e prospecção geofísica na caracterização de fluidos e com o modo como a interpretação integrada de ambos dá um contributo significativo para a melhoria do conhecimento de uma região, a nível hidrogeológico, geotérmico e ambiental. A dissertação é estruturada através de uma linha condutora, que reflecte a experiência profissional da autora nestes domínios, explorando situações em que o seu diagnóstico e resolução se relaciona com os temas abordados. Este trabalho salienta os diversos aspectos da aplicação de métodos geofísicos e da utilização de sondagens mecânicas no que diz respeito à caracterização de fluidos, sejam eles água, fluidos geotérmicos ou lixiviados provenientes de lixeiras ou outras infraestruturas de cariz ambiental.

A importância da utilização dos métodos geofísicos na prospecção e caracterização de fluidos, designadamente água e fluidos geotérmicos é bem conhecida, uma vez que estes investigam o solo em extensão e profundidade de uma forma relativamente económica que, por sua vez, pode ser correlacionada com dados analíticos. Estes factores permitem estender a informação a obter para além da análise das águas provenientes da captação como um todo e das respectivas formações geológicas. No entanto, têm como desvantagem o facto de poderem existir anomalias que sejam passíveis de mais do que uma interpretação. Para ultrapassar possíveis problemas que advenham deste facto, é essencial não só um bom conhecimento geológico de base da zona, como também a utilização conjunta de mais do que um método geofísico, uma vez que cada método responde a propriedades físicas diferentes. Em complemento desta informação, é importante utilizar sempre que seja possível informação proveniente de geofísica de profundidade (Telford et al., 1995), que em geral investiga em simultâneo várias propriedades físicas a profundidades bem

conhecidas. A informação de carácter distinto interpretada em simultâneo torna possível uma visualização global e diversificada de várias características associadas à sondagem mecânica, às formações que ela atravessa, ao fluido que ela contém e ao fluido contido nas formações aquíferas. No entanto, a ambiguidade inerente à modelação e interpretação de dados de prospecção geofísica, quer estes dados sejam de superfície, quer sejam obtidos em sondagens mecânicas, requerem um conhecimento prévio e genérico do modo como estes ocorrem e das suas características.

No caso da Hidrogeologia, a interpretação de dados de Geofísica requer um conhecimento prévio do objecto de estudo, a nível geológico e hidrogeológico para que esta ambiguidade seja reduzida. A utilização de um conjunto de dados provenientes de sondagens mecânicas é, pois, por isso, decisiva na redução destas ambiguidades e na modelação de dados de prospecção geofísica. Tendo como objectivo a melhoria do conhecimento geológico e hidrogeológico e a caracterização de problemas ambientais de uma zona, a dissertação aqui apresentada vai explorar a utilização conjunta de métodos geofísicos de superfície e sondagens mecânicas na caracterização de fluidos, em áreas como Hidrogeologia, Geotermia e Ambiente.

Por um lado, a utilização de dados de sondagens mecânicas em conjunto com métodos geofísicos de superfície constitui uma ferramenta de controlo destes últimos, que em simultâneo complementa e enriquece a informação geológica e hidrogeológica da sondagem mecânica, sustentada na experiência do geólogo e muitas vezes do sondador ou técnico de campo. Serão referidas situações em que a utilização e interpretação de diagrfias convencionais deram um importante contributo positivo no sucesso de uma captação de água subterrânea e serão dadas indicações acerca do modo de processar os dados de forma a atingir os objectivos práticos de cada situação e problema em causa. No entanto, não constitui objectivo deste trabalho a abordagem exhaustiva do modo como interpretá-las, remetendo-se esses aspectos por exemplo para Ramalho et al. (2009). Servirá no entanto de guia sistematizado que irá mostrar o modo de tirar o máximo partido de um conjunto de diagrfias.

Relativamente à Geotermia, o interesse que os Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS) e o armazenamento de CO₂ têm vindo a recentemente a suscitar, levam a que a informação geotérmica de base seja importante em qualquer estudo científico com o objectivo de disseminar a informação para o fomento da promoção de investimentos em projectos que visam a construção de instalações deste tipo Portugal. Como estes estudos se obtêm numa fase inicial a partir de estimativas dos gradientes geotérmicos e das temperaturas em profundidade, é de todo interesse o conhecimento geotérmico do país orientado para esse efeito e de forma a permitir a cobertura mais densa possível do território continental na sua componente cartográfica. É importante, pois que essa informação esteja disponível à comunidade científica, bem como o modo como ela foi obtida e a descrição do modo de avaliação da qualidade dos dados apresentados, pelo que uma parte importante desta dissertação é dedicada a esse objectivo.

No que diz respeito à geofísica de superfície aplicada ao Ambiente, não constitui objectivo desta dissertação a descrição exaustiva dos métodos utilizados em cada um dos temas abordados. Nesse sentido, o leitor poderá consultar bibliografia especializada e/ou outros trabalhos de dissertação onde se faz ampla referência a esses assuntos. O mesmo é aplicável à temática relacionada com hidráulica de captações. A dissertação aborda um conjunto de situações em que a contribuição da geofísica de superfície e da informação proveniente de sondagens mecânicas foi determinante na resolução de problemas específicos relacionados com o modo de ocorrência de fluidos, que pelo seu interesse merecem referência, sempre considerando a experiência profissional da autora.

Nesta perspectiva, o presente trabalho encontra-se dividido em três capítulos principais que abordam diversos modos de caracterização de fluidos com o recurso a geofísica e sondagens mecânicas, dando ênfase à experiência profissional da autora nas áreas das diagrfias, geotermia e ambiente. Esta experiência profissional constituiu tema para vários artigos, relatórios e até um livro técnico, na sua maioria realizados em parceria com outros autores do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, entidades públicas e privadas. Em cada um dos capítulos são apresentados alguns artigos publicados em revistas de circulação internacional com arbitragem científica com factor de impacto definido no Science Citation Index (SCI), dos quais a autora da dissertação partilha a sua co-autoria. Esses trabalhos referidos oportunamente ao longo de cada capítulo são no final descritos, analisados e discutidos sucintamente e é referida a intervenção da autora da dissertação em cada um deles. A numeração das páginas é sequencial sem adicionar as páginas respeitantes a cada artigo. Outros artigos publicados pela autora em revistas sem factor de impacto definido no Science Citation Index ou em congressos de especialidades diversas e relatórios técnicos serão apenas aqui referenciados em bibliografia, encontrando-se o seu enquadramento oportunamente referido no texto. No caso de relatórios internos, os documentos que lhes deram origem encontram-se no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), em Alfragide, sendo passíveis de consulta, tal como o livro *“Diagrfias Aplicadas à Hidrogeologia”*, disponível à venda nas livrarias de qualquer uma das instituições envolvidas na sua preparação, o LNEG, a Universidade de Aveiro (UA) e a Universidade de Évora (UE).

Assim, a dissertação está organizada do seguinte modo:

O capítulo 1 (**Introdução**) dá uma abordagem inicial à problemática discutida ao longo da dissertação, bem como uma descrição muito sucinta dos assuntos abordados nos vários capítulos e a justificação genérica da escolha dos artigos científicos que a acompanham e servem de suporte às temáticas abordadas.

O capítulo 2 (**Utilização de diagrfias em sondagens mecânicas com fins hidrogeológicos**) constitui uma reflexão sistematizada acerca da importância das diagrfias convencionais geralmente realizadas no estudo de uma sondagem mecânica, com fins hidrogeológicos, salientando os vários objectivos que estas podem ter, bem como o modo genérico de as interpretar. Este capítulo direcciona os resultados para a realização de interpretações consistentes e fundamentadas com a

informação das diagrfias efectuadas numa campanha e de acordo com os vários factores que as poderão influenciar, maximizando a informação obtida a partir de um conjunto de diagrfias, por vezes diminuto. Trata-se com especial ênfase o caso dos aquíferos localizados em bacias sedimentares, onde a realização de diagrfias torna ainda possível uma estimativa da qualidade química da água das formações, quer através da realização de diagrfias de condutividade eléctrica do fluido, quer através de outras diagrfias que dão indicações acerca da qualidade química das várias camadas aquíferas que ocorrem em sistemas multicamada. Assim, abordam-se modos de proceder a identificações litológicas numa sondagem e correlações estratigráficas entre várias sondagens, indicações de como proceder à identificação das zonas de alteração e fracturação ou ainda de camadas aquíferas, à detecção de fracturas, à estimativa da qualidade da água nativa através de várias diagrfias, nomeadamente Condutividade do Fluido, Potencial Espontâneo ou diagrfias de Resistividade Normal e Lateral e ainda a estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos através de diagrfias de Fluxo, diagrfias nucleares ou com o recurso à Lei de Archie. Aborda-se igualmente a importância da aplicação conjunta de diagrfias e de vários métodos geofísicos de superfície, relacionados com as características eléctricas da formações para a estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos. Com base em casos-estudo, serão descritas situações envolvendo diagrfias convencionais realizadas não só em sistemas aquíferos localizadas em formações sedimentares como também em formações cristalinas, alguns resumidamente retiradas de Ramalho et al. (2009) e ainda outros provenientes de outros trabalhos realizados pela autora da dissertação ao longo da sua experiência profissional. Pretende-se com este capítulo colmatar a lacuna no conceito e conhecimentos gerais acerca da utilização das diagrfias convencionais que geralmente conduzem à sua subutilização enquanto ferramentas de apoio à Hidrogeologia. Por isso, uma das finalidades deste capítulo é a sua utilização como manual introdutório que oriente o técnico na realização e interpretação de diagrfias convencionais, baseado na análise de diversos casos representativos da aplicação destas técnicas em ambientes geológicos e sob condições físicas da sondagem distintos. É feita igualmente uma breve análise custos-benefícios da aplicação de diagrfias em Hidrogeologia. Os artigos apresentados como suporte a este capítulo (Khalil et al., 2011; Khalil et al., 2010) foram escolhidos por dois motivos diferentes. O trabalho de Khalil et al. (2011), justifica-se pela sua aplicabilidade em situações de aquíferos multicamada contendo argila nos troços de tubo-ralo ou consideradas como permeáveis, pelo que foi aplicado a um caso português por oposição a um outro, no mesmo sistema aquífero, mas não apresentando argila. Relativamente a Khalil et al. (2010), mostra-se a potencialidade da utilização conjunta de diagrfias e de métodos geofísicos de superfície na estimativa de parâmetros hidráulicos dos aquíferos.

O capítulo 3 (**Utilização de diagrfias na componente cartográfica da Geotermia**) aborda a importância da utilização de diagrfias de Temperatura em sondagens mecânicas na obtenção de parâmetros geotérmicos relevantes para o conhecimento sistemático da estrutura interna da crosta e fluidos em profundidade, necessários a estudos de modelação geotérmica. Esta, por sua vez, é necessária na realização de projectos de investigação relacionados com EGS que requerem informação

geotérmica a profundidades da ordem de quilómetros, ou ainda em projectos de geotermia clássica, com profundidades de investigação bastante menores, localizados em zonas de anomalias geotérmicas locais, como é o caso de Chaves ou S. Pedro do Sul. Neste capítulo, elabora-se e propõe-se um modo de classificar os dados geotérmicos existentes, de forma que qualquer utilizador da informação geotérmica proveniente de sondagens mecânicas tenha plena noção da qualidade dos dados com que está a lidar, seja qual for o objectivo. Com este trabalho pretende apresentar-se, de uma forma compacta e sistematizada, informação geotérmica que se encontrava dispersa, depois de analisada segundo critérios de qualidade estabelecidos internacionalmente de uma forma genérica. Como tal, os artigos que foram seleccionados para fazer parte desta dissertação (Fernandèz et al., 1998; Correia e Ramalho, 1998), apesar de antigos devem a sua escolha, por um lado à importância que o primeiro mantém actualmente para a geotermia nacional, no sentido de ter sido o motor de arranque para o estabelecimento de critérios comuns no objectivo da realização de uma futura carta geotérmica ibérica. Estes critérios ainda hoje são utilizados na realização dos vários tipos de cartografia geotérmica em Portugal. Por outro lado, a opção de incluir Correia e Ramalho (1998) nesta dissertação por ser um trabalho já com alguma antiguidade tem origem na perplexidade da autora ao verificar que após todos estes anos persiste a apresentação de mapas antigos e não actualizados em congressos da especialidade realizados em Portugal e ver estes dados serem difundidos internacionalmente de uma forma indutora de erro. Esta informação apesar de ter mais de uma década, continua no entanto a constar de trabalhos técnicos e como tal a persistir-se inexplicavelmente na sua divulgação. Como tal, considerou-se adequada e desejável a inclusão deste trabalho na presente dissertação, no sentido de contribuir para a clarificação e disseminação deste assunto, que pelos vistos, ainda é insuficiente após todos estes anos.

O capítulo 4 (**Utilização de métodos geofísicos em problemas ambientais**) diz respeito à aplicação de métodos geofísicos de superfície em problemas diversos de cariz ambiental. São descritas situações em que a utilização de métodos geofísicos de superfície em conjugação com informação de sondagens mecânicas realizadas com vários objectivos, desempenharam um papel importante em processos de diagnóstico e recuperação ambiental. Foi realizada uma selecção de trabalhos que abarca várias temáticas de caracterização e monitorização ambientais, que pela sua importância prática em termos de passado, presente e futuro merecem atenção especial. Assim, o trabalho de Senos Matias et al. (1994), que compreende a caracterização de plumas de contaminação em lixeiras a céu aberto com o auxílio de piezómetros especialmente construídos para o efeito foi seleccionado para apresentação nesta dissertação, pelo seu carácter inovador e de certa forma, único no país pela longevidade e actualidade dos meios criados para a realização de monitorizações ambientais. Por outro lado, foi igualmente abordada a caracterização de lixiviados em lixeiras seladas com a utilização de informação proveniente de tubos de biogás (Ramalho et al., 2012a), a dispersão de contaminantes em antigas áreas mineiras (Ramalho et al., 2012b), a identificação de fracturas eventualmente produtivas em rochas cristalinas para caracterização da envolvente de antigas minas de urânio (Ramalho et al., 2009b) e por último a utilização de métodos geofísicos para marcação de uma sondagem mecânica

no sentido de preservar a integridade de um aquífero termal fissurado (Ramalho et al., 2012c). É feita igualmente uma breve análise custos-benefícios da aplicação de diafrafias em problemas ambientais.

No capítulo 5 (**Conclusões**) são efectuadas as considerações finais, resumindo sucintamente os principais resultados baseados na experiência da autora nestas temáticas através de uma análise crítica global acerca da utilização das várias metodologias referidas. Finalmente são abordados os problemas e desafios que a crise actual nos obriga a enfrentar e são propostas linhas metodológicas a promover que de alguma forma dêem o seu contributo para superar a actual situação.

Por fim, no capítulo 6 (**Referências bibliográficas**) faz-se a listagem de todos os trabalhos citados na dissertação.

Artigos publicados em revistas de circulação internacional com arbitragem científica com factor de impacto definido no SCI incorporados nesta dissertação

Capítulo 2

Khalil, M., Ramalho, E. C. e Monteiro Santos (2011) – Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of Nubian Sandstone aquifer in southern Egypt. *Near Surface Geophysics*, v.9, nº 4, pp.349-355.

Kahlil, M. A., Hafez, M. A, Monteiro Santos, F., Ramalho, E. C., Mesbah, H. S. e El-Gady, G. M. (2010) – An approach to estimate porosity and groundwater salinity of shallow aquifers by combined application of GPR and VES: a case study in the Nubian sandstone aquifer. *Journal of Near Surface Geophysics*, v.8, nº 3, pp.223-233.

Capítulo 3

Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – New heat flow density determinations in Southern Portugal: a geothermal anomaly revisited. *Tectonophysics*, nº 291, pp.55-62.

Fernandéz, M., Marzan, I., Correia, A. and Ramalho, E. C. (1998) – Heat flow and lithospheric regime in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, nº 291, pp.29-53.

Capítulo 4

Senos Matias, M. J., Marques da Silva, M. A., Ferreira P. L. e Ramalho E. C. (1994) – A geophysical and hidrogeological study of aquifers contamination by a landfill. *Journal of Applied Geophysics*, nº 32, pp.155-162.

Ramalho, E. C., Carvalho Dill, A. e Rocha, R. (2012) – Assessment of the leachate movement in a sealed landfill using geophysical methods. *Environmental and Earth Science*. DOI 10.1007/s12665-012-1742-8.

Ramalho, E. C., Midões, C., Lourenço, M. C., Costa, A. e Monteiro Santos, F. A. (2012) – Environmental assessment of an uranium experimental rock blasting in Portugal, using geophysical and hydrogeological methods. *Journal of Geophysics and Engineering*, nº 9, pp.433-446.

Ramalho, E. C., Carvalho, J. P., Gonçalves, R. e Monteiro Santos, F. A. (2012) – Understanding the 3D structure of a thermal water fissured granite aquifer with geophysical studies. *Pure and Applied Geophysics*. nº 69, pp.2031-2046.

Ramalho, E., Carvalho, J., Barbosa, S. e Monteiro Santos, F. A. (2009) – Using geophysical methods to characterize an abandoned uranium mining site, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, nº 67, pp.14-33.

2. Utilização de diagrfias em sondagens mecânicas com fins hidrogeológicos

2.1. Objectivos do capítulo

Este capítulo tem como objectivo principal dar uma perspectiva global das vantagens da utilização de diagrfias convencionais realizadas em sondagens mecânicas em estudos de Hidrogeologia, durante a perfuração de uma captação e após o seu entubamento. Tendo em conta a reduzida dimensão das empresas que prestam estes serviços e os condicionalismos a que por vezes estão sujeitas, é necessário saber tirar o máximo partido da informação adquirida numa campanha de diagrfias. Por vezes, embora o número de parâmetros disponível seja bastante reduzido, é possível a obtenção de informações importantes para o sucesso de uma captação de água ou até um incremento significativo no conhecimento do próprio sistema aquífero. Neste capítulo, faz-se uma abordagem às principais diagrfias convencionais utilizadas em Hidrogeologia para a caracterização dos fluidos que elas contêm e o respectivo modo de ocorrência, quais os critérios para a sua utilização e referem-se alguns aspectos fundamentais a ter em consideração aquando da aquisição e processamento dos dados. Além disso, recorrendo a exemplos da experiência profissional da autora desta dissertação, é explicada sucintamente a utilização de um número restrito de diagrfias convencionais na contribuição para a avaliação e resolução de problemas específicos de Hidrogeologia e feita uma análise crítica dos resultados obtidos.

Um outro objectivo deste capítulo consiste em mostrar a importância das campanhas de diagrfias, que, muitas vezes em conjunto com a geofísica de superfície, contribuem para uma melhoria significativa da qualidade da informação geológica e hidrogeológica disponíveis e para a resolução de alguns problemas específicos.

2.2. Introdução

Tendo em conta a importância que de uma forma geral, a água subterrânea assume em períodos de seca prolongada, é essencial a realização de captações que possam ser uma alternativa de abastecimento viável nestas circunstâncias. Para tal, é necessária a realização de captações produtivas e de qualidade que por sua vez pode ter um maior sucesso com o recurso à utilização de diagrfias. Embora por vezes subvalorizadas por alguns técnicos que trabalham em Hidrogeologia, estas constituem uma importante ferramenta de suporte na elaboração do projecto de uma captação, permitindo que se obtenham maiores rendimentos com menores custos. Desenvolvidas inicialmente pela indústria petrolífera (Schlumberger, 1972; 1982), a utilidade das diagrfias em estudos de Hidrogeologia é hoje mais que reconhecida, pois estas possibilitam a obtenção de um conjunto que pode ser significativo e diversificado de propriedades físicas das formações atravessadas e do fluido que a sondagem contém a profundidades bem determinadas. Tendo em conta que uma diagrfia ou um *log* consiste em qualquer registo contínuo, em função da profundidade, das variações naturais ou induzidas de determinada característica ou de propriedades físico-químicas das formações geológicas atravessadas por uma sondagem mecânica ou do fluido que ela contém (Ramalho et al., 2009), há um conjunto de circunstâncias onde a sua utilização poderá assumir importância fundamental na compreensão das situações relacionadas com captações e encarar com bastante mais segurança problemas que de outra forma seriam de difícil avaliação e resolução. O arquivo do registo analógico ou digital destas propriedades permite ainda em qualquer altura uma reavaliação da sondagem mecânica com base na informação obtida, para outro objectivo que não o inicial.

A importância das diagrfias está igualmente relacionada com o facto de que a correcta reconstituição da coluna litológica de uma sondagem mecânica feita somente a partir dos fragmentos das formações é dificultada pelo próprio processo de perfuração devido a misturas de materiais provenientes de profundidades diferentes, influência de desprendimentos de materiais da parede das sondagens, perdas de alguns constituintes, em especial da fracção fina (limos, argilas, micas, etc.), difícil determinação correcta de espessuras, etc.. Estes problemas e indefinições agravam-se com a profundidade da sondagem, mesmo aplicando métodos de geofísica de superfície, o que torna conveniente o estudo geofísico do interior da perfuração.

Tendo em conta que a maioria das empresas de perfuração de sondagens possui, na melhor das hipóteses, um conjunto de sondas que mede um número bastante reduzido de parâmetros convencionais, torna-se necessário saber tirar o máximo partido desta informação. Assim, considerando que a maior parte das diagrfias convencionais utilizadas em Hidrogeologia caracteriza os aquíferos pelas suas propriedades físicas, que por sua vez podem ser indirectamente relacionadas com propriedades hidráulicas ou ainda como um complemento a análises químicas em águas subterrâneas provenientes das sondagens (Paillet et al., 1994) na identificação de camadas permeáveis e caracterização das zonas de alteração e fracturação, é fundamental um conhecimento abrangente das suas potencialidades.

No entanto, não constitui objectivo deste capítulo a descrição exhaustiva de cada parâmetro registado, bem como dos equipamentos utilizados. Para o efeito, refere-se

amíude o livro técnico-científico “*Diagrfias Aplicadas à Hidrogeologia*” (Ramalho et al., 2009) publicado pela Editora Palimage, realizado pela autora da presente dissertação em colaboração com o Prof. Doutor Manuel Marques da Silva e com o Prof. Doutor António Correia, respectivamente das Universidades de Aveiro (UA) e de Évora (UE). Este livro, especialmente direccionado para técnicos ligados à Hidrogeologia, contém descrições detalhadas dos equipamentos, nomeadamente das sondas e dos princípios físicos e químicos que lhes estão subjacentes, além da sua aplicação conjunta em situações diversas, tanto a nível de uma análise detalhada de situações específicas, como de uma avaliação e remediação de problemas surgidos no decurso da exploração de sondagens de captação.

Apesar de servir igualmente de complemento ou introdução a Ramalho et al. (2009) optou-se por salientar neste capítulo a aplicabilidade de algumas diagrfias convencionais em estudos de Hidrogeologia com objectivos diversos. Assim, referem-se as suas aplicações para identificações litológicas e correlações estratigráficas, identificação de espessuras de zonas de alteração e fracturação, camadas aquíferas, detecção de fracturas e mostra-se ainda a possibilidade de estimar a qualidade química da água nativa com um conjunto reduzido de diagrfias eléctricas, recorrendo a exemplos baseados em problemas aplicados a sistemas aquíferos portugueses, por vezes com origem em Ramalho et al. (2009), incluindo diversos modos de estimar alguns parâmetros hidráulicos dos aquíferos e fazendo em alguns casos a sua correlação com informação obtida a partir de geofísica de superfície.

Pelo seu cariz de ordem prática, as aplicações mencionadas neste capítulo pretendem ilustrar as potencialidades e limitações da utilização de um conjunto reduzido de diagrfias convencionais em diversas situações relacionadas com a experiência profissional da autora. Para as situações referidas, são descritos alguns objectivos fundamentais na utilização de diagrfias convencionais, tanto ao nível de decisão de entubamento das sondagens, como numa fase posterior de diagnóstico de situações que se revelaram complicadas e de difícil resolução. Além disso, é discutida a aplicabilidade das várias sondas, bem como as vantagens da sua utilização e alguns aspectos acerca do modo como esta deve ser feita.

2.3. Critérios de escolha das diagrfias a realizar

Embora em Hidrogeologia as diagrfias tenham normalmente como objectivo imediato a definição da coluna definitiva de entubamento, em algumas situações, certas alterações não visíveis numa análise simples dos testemunhos ou através da realização de ensaios na sondagem, são também detectadas através delas. Por isso, as diagrfias também são usadas para outros fins, como a estimativa de parâmetros hidráulicos dos aquíferos ou ainda a identificação de fracturas em rochas cristalinas. Neste tipo de trabalhos as diagrfias servem, muitas vezes, como complemento à informação obtida à superfície, através do estudo dos *cuttings*, testemunhos, geofísica, cartografia geológica, características da água ou ensaios de caudal, dado que permitem obter informação geológica, geofísica e geoquímica, entre outras, a profundidades bem determinadas. Por estes motivos, servem com frequência para reforçar e correlacionar as interpretações de dados geofísicos e hidrogeológicos

recolhidos à superfície, permitindo melhores bases para modelações geológicas e hidrogeológicas através de uma caracterização mais rigorosa das formações geológicas e/ou dos fluidos que elas contêm.

A Fig. 2.1 mostra um esquema onde se referem algumas informações importantes que poderão ser obtidas através da interpretação de diagragias convencionais realizadas em Hidrogeologia, consoante os ambientes geológicos e hidrogeológicos, os objectivos da campanha, equipamentos utilizados e disponibilidade financeira.

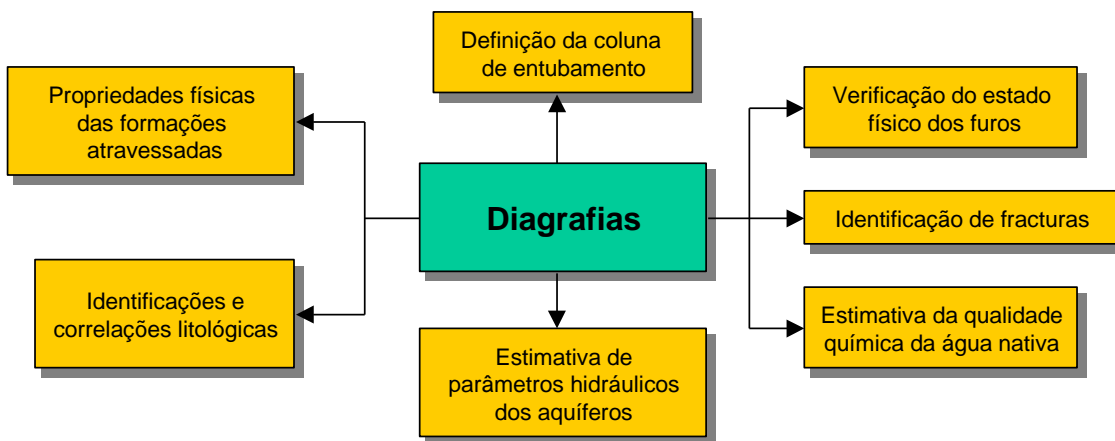


Fig. 2.1 – Objectivos e benefícios da utilização de diagragias em Hidrogeologia (Ramalho et al., 2009). Destacam-se a identificação de fracturas e as estimativas da qualidade da água nativa e de parâmetros hidráulicos como factores principais da caracterização de fluidos, embora as propriedades físicas das formações atravessadas e identificações e correlações litológicas tenham grande importância para o efeito, em especial quando as formações geológicas constituem aquíferos contendo água com características típicas.

Na perspectiva da Fig. 2.1, uma correcta e eficaz interpretação de diagragias pode desempenhar um papel importante em trabalhos de Hidrogeologia. Essa importância é sobejamente conhecida e encontra-se descrita em trabalhos tão antigos como Venoff (1966), Kwader (1986), Keys e MacCary (1971), Chappelier (1992), apenas para citar alguns, na medida em que se podem medir ou estimar propriedades físicas importantes das formações geológicas e dos fluidos que elas contêm a partir de diagragias realizadas em sondagens mecânicas, como é o caso da resistividade eléctrica, radioactividade natural, potencial espontâneo, porosidade, densidade, temperatura e condutividade da água (Ellis, 1987).

Para fins hidrogeológicos, as diagragias mais utilizadas são as eléctricas, nucleares e da coluna de fluido. As diagragias Acústicas e do *Caliper* também são utilizadas, sendo a última muito importante para proceder a correcções dos dados devido à variação do diâmetro da sondagem, especialmente em formações cristalinas. No entanto, a escolha das diagragias a realizar depende de alguns factores bastante importantes, devendo obedecer a alguns princípios gerais. Em primeiro lugar, é preciso planificar a campanha de diagragias simultaneamente em função da disponibilidade financeira, de equipamento e do modo como a sondagem se encontra (parcialmente entubada, em *open-hole*, preenchida ou não com fluido condutor, etc.). Tendo sempre em mente que o trabalho do técnico está limitado a um caderno de encargos, ao equipamento existente e simultaneamente operacional e disponível no momento da realização da

campanha, terá que tirar o máximo partido das diagrfias que puder realizar, tornando-se pois importante conhecer de antemão o tipo de informações que cada parâmetro medido pode fornecer. Assim, é necessário conhecer as características de cada sonda a utilizar e os princípios físicos subjacentes a cada um dos parâmetros que ela mede, bem como a sua resposta previsível perante as litologias e condições que a sondagem supostamente atravessa, para uma interpretação dos resultados consistente e fundamentada. Finalmente, ainda que no mercado esteja disponível uma larga gama de sondas que medem um número e variedade significativos de parâmetros, com algumas excepções, o mercado ligado às captações de água enferma de uma falta de liquidez crónica, pelo que é necessário considerar o factor financeiro relacionado com a considerável mobilização de meios que ocorre simultaneamente a uma paragem de toda a equipa envolvida na realização da sondagem propriamente dita, nomeadamente sondadores e hidrogeólogos. Um programa de diagrfias em sondagens mecânicas relativamente profundas que se revele demasiado extenso, poderá tornar incomportável a execução das mesmas de um ponto de vista de gestão financeira, o que significa que as campanhas não deverão ser “cegas” e sim contemplar em primeiro lugar uma análise custo/benefício. Para esta análise ser rigorosa, é vantajoso ter ou poder obter um bom conhecimento geológico e hidrogeológico prévio da região onde se localiza(m) a(s) sondagem(ens) mecânica(s) em que as diagrfias vão ser realizadas. Em zonas hidrogeologicamente bem conhecidas, um técnico experiente necessitará de menos indicadores, e, portanto, de um conjunto menor de diagrfias, o que tornará uma campanha significativamente mais rápida e menos onerosa. Em alguns casos extremos, em aquíferos bem conhecidos, estas apenas servirão para confirmar informações já existentes em arquivo e garantir o sucesso do investimento avultado que é por vezes feito na perfuração de uma sondagem.

Embora existam tantas diagrfias quantas as propriedades que se possam medir num dado furo, em cada caso, as informações passíveis de ser obtidas variam consoante a situação da sondagem e os equipamentos e verbas disponíveis. Ao registar simultaneamente vários parâmetros à sua profundidade real, elas permitem ter uma visualização da sua variação que, de outra forma, seria impossível conseguir. Assim, a partir de um conjunto de diagrfias, poder-se-á retirar informação de carácter diverso, que será utilizada consoante o objectivo e condições da sua execução. Na Tabela 2.1 são apresentadas sumariamente algumas das diagrfias convencionais mais frequentemente utilizadas em Hidrogeologia, bem como a sua aplicação potencial e as condições físicas da sondagem mecânica necessárias à sua realização.

Das diagrfias da Tabela 2.1 destacam-se as diagrfias eléctricas com dispositivo simples e as multielectródicas, que apenas podem ser realizadas com a sondagem em *open-hole*, mas que permitem obter um conjunto de parâmetros que podem dar informações acerca da qualidade química da água nativa, características hidráulicas dos aquíferos ou servir como calibração a dados de geofísica de superfície, nomeadamente de sondagens eléctricas verticais (SEVs) ou *ground penetrating radar* (GPR). Por outro lado, as medições da radioactividade natural e induzida são bastante utilizadas em Hidrogeologia, pois têm como enorme vantagem o facto de poderem ser utilizadas tanto em *open-hole* como em sondagens entubadas, preenchidas ou não com qualquer tipo de fluido. As diagrfias nucleares mais utilizadas são as de

Radiação Gama Natural, que envolvem a medição da radioactividade natural das formações adjacentes à sondagem mecânica e a diagrafia de Neutrões, que consiste em medições de radioactividade induzida, dando informações acerca do conteúdo em água das formações e, como tal da respectiva porosidade.

Tabela 2.1 – Diagrafias mais frequentemente utilizadas, a sua aplicação potencial e as condições da sondagem mecânica requeridas para a realização dessas mesmas medições (modificado de Keys, 1990 e Chappelier, 1992).

Diagrafia	Propriedades medidas	Aplicação potencial	Condições físicas da sondagem	Unidade
Potencial Espontâneo (SP)	Potencial eléctrico causado por diferenças de salinidade no furo e fluidos intersticiais	Identificação de litologias, conteúdo em argilas, qualidade da água, localização de zonas permeáveis	Sondagem não entubada preenchida com fluido condutivo	mV
Radiação Gama Natural	Radiação gama de radioisótopos naturais ou artificiais	Identificação de litologias relacionadas com o conteúdo em argilas e siltes e localização de zonas permeáveis	Quaisquer condições, desde que a sondagem não tenha diâmetro demasiado grande	cps
Single Point Resistance (SPR)	Resistência da rocha, fluido de saturação e fluido do furo	Identificação de litologias, localização de fracturas e localização de zonas permeáveis	Sondagem não entubada preenchida com fluido condutivo	ohm
Resistividade Normal (RN) (8", 16", 32" e 64")	Resistividade das rochas e fluidos de saturação	Identificação de litologias, interpretações quantitativas da salinidade da água intersticial e localização de zonas permeáveis	Sondagem não entubada preenchida com fluido condutivo	ohm.m
Resistividade Lateral (RL) (6')	Resistividade das rochas	Identificação de litologias, interpretações quantitativas da salinidade da água intersticial e localização de zonas permeáveis	Sondagem não entubada preenchida com fluido condutivo	ohm.m
Neutrões	Conteúdo em hidrogénio (porosidade)	Identificação de litologias, porosidade saturada	Quaisquer condições	cps
Temperatura	Temperatura do fluido e/ou temperatura das formações	Gradiente geotérmico, localização da água injectada	Sondagem preenchida com fluido	graus Celsius
Condutividade do Fluido	Condutividade/resistividade do fluido	Muito eficiente para localizar zonas de circulação de água e interface água doce/salgada	Sondagem preenchida com fluido	μ S/cm ohm.m
Fluxo	Sentido e velocidade do fluxo	Zonas de entrada e saída de água	Sondagem preenchida com fluido	m/min L/h
Acústica	Velocidade das ondas P	Identificação de litologias, porosidades, determinação de parâmetros geotécnicos	Sondagem não entubada preenchida com fluido	μ s/m
Caliper	Diâmetro do furo	Calibração de dados, verificação do estado físico dos furos	Quaisquer condições	cm polegadas

2.4. Controlo na aquisição de dados

Uma vez que as campanhas de diagrafias para Hidrogeologia são feitas na sua maioria durante a suspensão dos trabalhos de realização da captação com a sondagem ainda em *open-hole*, é importante preservar o máximo de informação, mesmo sem qualquer utilidade imediata, para que no futuro possam sempre ser reprocessadas e/ou reinterpretadas com segurança para o mesmo ou outros objectivos. Por isso, as empresas de prospecção, pesquisa e captação de água subterrânea que fazem diagrafias compõem geralmente os seus registos com todas as informações necessárias, ou que poderão no futuro revelar-se necessárias à sua

reinterpretação, podendo constar do cabeçalho de cada diagrfia ou ao longo do relatório de execução da sondagem mecânica.

Alguns dados essenciais para a interpretação de diagrfias são logo *a priori* fornecidos pelo sondador, cujo controlo da execução sondagem é fundamental para o técnico responsável pela realização e interpretação das diagrfias. Por sua vez, este deverá ter estes dados em consideração para que possa fazer uma interpretação correcta dos valores adquiridos. É necessário, pois, que os sondadores e o técnico funcionem como uma equipa coesa e responsável, estabelecendo ao longo do tempo rotinas de trabalho conjuntas que contribuam positivamente para a obtenção de resultados fiáveis. Algumas informações que são importantes registar estão referidas em Ramalho et al. (2009), destacando-se entre estas o nível hidroestático na sondagem (NHE), as características do fluido de perfuração (tipo de fluido, densidade, viscosidade, resistividade eléctrica do fluido e respectiva temperatura de determinação, a resistividade eléctrica do filtrado e a resistividade eléctrica do *cake*, no caso do fluido de perfuração ser lama bentonítica), o tempo decorrido desde a sua última circulação e a temperatura à superfície e no fundo da perfuração.

A sequência para a realização das diagrfias também não deverá ser aleatória, uma vez que há situações que é sempre preciso acautelar no decurso de uma campanha.

É por isso necessário ter em consideração que, devido às características específicas de cada sondagem, será por vezes desejável que a sequência de realização das diagrfias se inicie com uma chamada *dummy probe*, descida muito lentamente para causar a menor perturbação possível no fluido. Esta é normalmente uma sonda avariada ou de tecnologia ultrapassada para testar a segurança e consistência das paredes da sondagem mecânica no caso de haver dúvidas a este respeito referidas pelo sondador.

Nestas circunstâncias, em seguida deverá ser descida a sonda que inclua a diagrfia de Temperatura, para esta ser realizada com o fluido que preenche a sondagem o mais possível em equilíbrio térmico com as formações adjacentes, a velocidade muito baixa e constante, nunca superior a 5 m/min. Durante a interpretação da diagrfia de Temperatura, é importante avaliar a possível existência de convecção térmica em pequena escala no interior da sondagem, que poderá perturbar o gradiente geotérmico local (Beck e Balling, 1988). Os dados de temperatura em sondagens são igualmente utilizados para calcular a viscosidade e densidade do fluido, valores de controlo que poderão vir a ser importantes no futuro. Esta diagrfia poderá fazer parte de uma sonda multiparamétrica, que a meça em simultâneo com a condutividade do fluido, as resistividades normais, a radiação gama natural e o potencial espontâneo. Por outro lado, pelas suas características específicas, é importante que a diagrfia de Neutrões seja realizada apenas depois da restante campanha ter dado garantias que as paredes da sondagem mecânica são estáveis. A perda da fonte radioactiva de uma sonda de neutrões no decurso de uma diagrfia de Neutrões poder-se-á vir a revelar um problema de contaminação ambiental no sistema aquífero em estudo, no caso por exemplo da utilização de uma fonte radioactiva de Am-Be de 1 Ci, cuja meia-vida é de 418 anos (Keys, 1990). Dever-se-ão por isso tomar todas as providências para que tal não aconteça, o que implica, em casos de dúvida acentuada, prescindir da realização desta diagrfia.

A Fig. 2.2 mostra um fluxograma possível da sequência de medição de parâmetros e consequente utilização das sondas de uma campanha de diagrfias convencionais em Hidrogeologia. A proposta da utilização da diagrfia do *Caliper* em último lugar prende-se com o facto do deslizamento da própria sonda ao longo das paredes da sondagem as poder danificar.

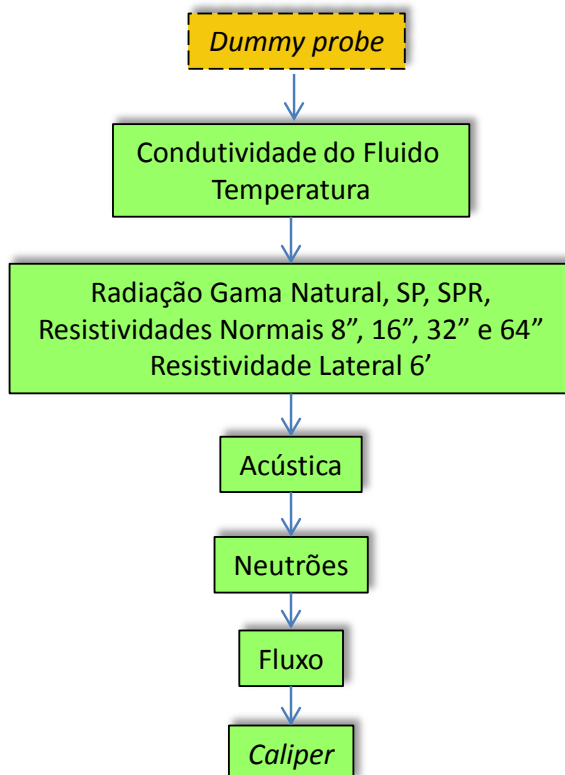


Fig. 2.2 – Fluxograma relativo à possível ordem de realização das diagrfias convencionais mais utilizadas em Hidrogeologia referidas na Tabela 2.1.

A velocidade de deslocamento das sondas ao longo da sondagem mecânica é um outro aspecto importante a ter sempre em conta para os custos das campanhas das diagrfias, em especial em sondagens mais profundas, nunca esquecendo que uma velocidade adequada é fundamental para a boa qualidade de uma diagrfia e varia consoante os parâmetros a medir. Por questões económicas, no entanto, as empresas de captação de água subterrânea utilizam com frequência velocidades de deslocamento das sondas na ordem dos 10 a 15 m/min, embora para fins científicos seja preferível utilizar uma velocidade de 5 m/min e no caso de diagrfias de Neutrões, 3 m/min.

2.5. Processamento dos dados de diagrfias

A apresentação dos dados de uma campanha de diagrfias convencionais para Hidrogeologia incluindo as medidas de vários parâmetros distintos é feita através de diagrfias sobrepostas e/ou dispostas lado a lado.

Tanto no decurso do trabalho de campo como já em gabinete dever-se-ão escolher criteriosamente quais as diagrfias a sobrepor, uma vez que este passo do

processamento poderá facilitar grandemente tanto a interpretação qualitativa como a quantitativa. Dever-se-ão sobrepôr diagrfias cuja informação seja complementar ou, perante o ambiente em questão, ter contraste suficiente para permitir uma interpretação preliminar imediata e realçar aspectos que se afigurem importantes na campanha. Para tal, esta selecção é feita dependendo do ambiente geológico, objectivos da campanha e diagrfias realizadas. Uma vez mais, é importante ter uma ideia das formações geológicas que serão atravessadas e como os parâmetros a medir se comportam perante elas. Embora antigamente os registos fossem analógicos, actualmente os dados são adquiridos sob a forma digital, o que permite o seu armazenamento de uma forma mais eficiente. Por isso, a sua visualização está facilitada quer no campo, quer em gabinete, uma vez que os dados são registados quaisquer que sejam os seus valores extremos, podendo posteriormente ser processados e tratados em *software* apropriado e amigável e apresentadas em qualquer escala vertical, o que constitui uma grande melhoria no manuseamento e na sua apresentação. Não constitui objectivo desta dissertação uma abordagem às características específicas de cada *software* de processamento de diagrfias, bem como as suas vantagens e desvantagens, mas referem-se o ROCKWORKS, VIEWLOG ou WELLCAD como opções para o efeito. A Fig. 2.3 mostra, para o mesmo troço de uma sondagem, localizada no Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do-Chão (Ramalho, 2000a), uma imagem dos documentos de saída, em papel, aquando da aquisição de dados onde, embora o registo digital seja completo, se visualizam apenas os limites das escalas previamente escolhidas, e a mesma informação posteriormente processada em gabinete.

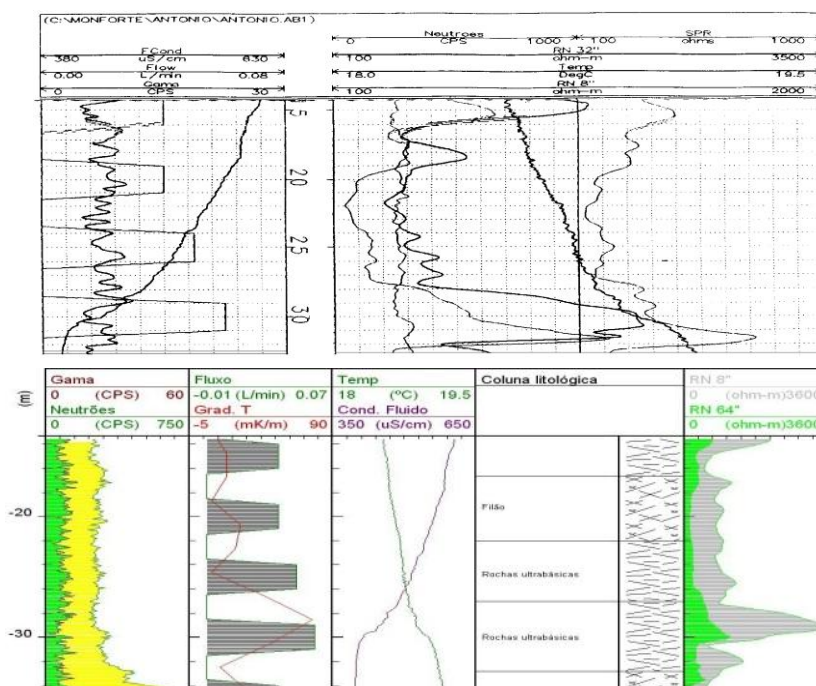


Fig. 2.3 – Dois modos distintos de apresentação de diagrfias num mesmo troço de uma sondagem localizada no Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do Chão. (Acima) *Software* LOGSHELL, utilizado na aquisição de dados em trabalho de campo. (Abaixo) *Software* VIEWLOG, utilizado no processamento de dados em gabinete (Ramalho, 2000a).

Pela sua versatilidade, este tipo de processamento em gabinete é capaz de evidenciar características inicialmente despercebidas das formações, já depois de uma análise e processamento mais detalhados. É possível também a apresentação de diagrfias indirectas estimadas a partir de dados registados, como por exemplo, a diagrfia do Gradiente Geotérmico ou da Porosidade.

2.6. Interpretação de diagrfias

Uma correcta interpretação de diagrfias requer o conhecimento da geometria da sondagem e do modo como os fluidos se distribuem na sua coluna e na zona envolvente, com base nos parâmetros medidos pelas sondas utilizadas. Além disso, é necessário também não esquecer que é por vezes imprescindível efectuar correcções aos valores registados. É o caso por exemplo, de sondagens mecânicas realizadas em zonas muito fracturadas ou cársicas, em que a variação do seu diâmetro tem um papel importante nos valores registados de grande parte dos parâmetros medidos. Para isso, é frequentemente realizada a diagrfia do *Caliper* no final da campanha, para fornecer informação contínua acerca da variação do diâmetro de uma sondagem (Ramalho et al., 2009). Estas variações de diâmetro são muitas vezes devidas a porosidade secundária, mudanças de método de perfuração, existência de cavidades ou presença de argilas e lama de perfuração em formações porosas e permeáveis (Chappelier, 1990), pelo que por sua vez se torna importante identificar a sua origem com outras diagrfias. Esta diagrfia é igualmente utilizada para a correcção das outras e permite uma interpretação correcta delas, uma vez que grande parte dos valores registados em outros tipos de diagrfias, nomeadamente eléctricas e nucleares, são afectados pelo diâmetro da sondagem (Keys, 1990). Na diagrfia de Radiação Gama Natural, deverá ser introduzido um factor de correcção para o diâmetro da sondagem. Se bem que esta diagrfia possa ser utilizada em sondagens entubadas, o entubamento causa uma atenuação que deverá ser corrigida para cada material específico, tal como aço, PVC, etc. (COLOG, 1993; Ramalho et al., 2009).

A Fig. 2.4 mostra alguns factores que afectam as medidas e que obrigam à correcção das diagrfias, a ter presente aquando da interpretação dos dados.

A interpretação de diferentes tipos de diagrfias requer ainda não só um conhecimento razoável das propriedades físicas medidas por todas as sondas utilizadas numa campanha, mas também a compreensão das implicações geológicas dos dados adquiridos. Por exemplo, em formações compactas e cristalinas, a sua interpretação para a caracterização de fluidos é consideravelmente diferente do que a mesma realizada em formações sedimentares. Nas primeiras, a interpretação de diagrfias tem importância na detecção de fracturas e/ou cavidades com entradas e/ou saídas de água na sondagem, havendo ainda outros aspectos distintos a considerar, relacionados com o modo de evolução em profundidade do grau da alteração das formações e na identificação e caracterização das fracturas que lhes estão associadas através de diagrfias eléctricas e nucleares (Tabela 2.1). Porém, no caso de formações sedimentares, as diagrfias eléctricas são registadas com um conjunto de sondas que de acordo com as suas características específicas, oferecem um leque de potencialidades que as torna ferramentas importantes na análise de aquíferos,

características dos fluidos e formações geológicas. Estas potencialidades estão relacionadas com a sua capacidade de identificação de zonas porosas e permeáveis, localização de zonas impermeáveis, cálculo da percentagem de argila na rocha reservatório ou ainda o cálculo resistividade eléctrica das formações não perturbadas ou da água da formação e, como tal, a estimativa indirecta da sua qualidade química.

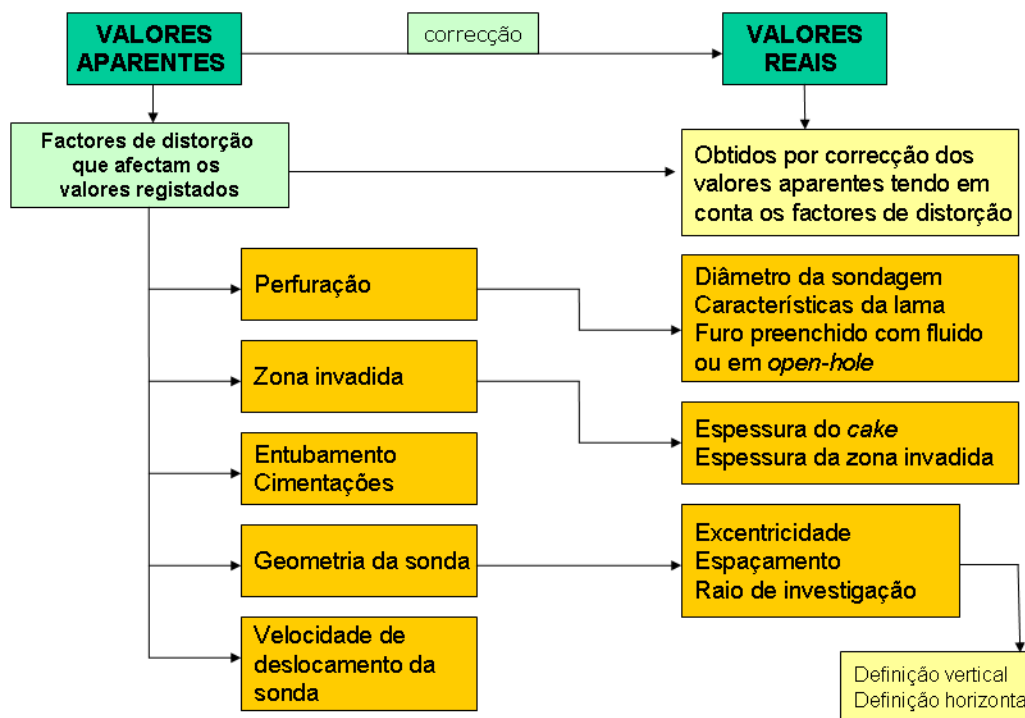


Fig. 2.4 – Factores que afectam as medidas e correcções de diagrfias (adaptado de Bayó Dalmau, 1988, in Ramalho et al., 2009).

Em Hidrogeologia, destacam-se a diagrfia do Potencial Espontâneo (SP) e as diagrfias de Resistividade Normal (RN) com espaçamentos múltiplos e Resistividade Lateral (RL) como sendo as mais geralmente usadas para este efeito. A correção das diagrfias eléctricas é efectuada com diagrfias de Temperatura e da Condutividade de Fluido. A Fig. 2.5 mostra um esquema adaptado de Chappelier (1992) das várias zonas de invasão da lama de perfuração numa formação aquífera, necessário ter presente aquando da interpretação de quaisquer diagrfias eléctricas. A sua importância principal reside no entanto no facto de que vários espaçamentos electródicos de uma sonda de resistividade normal com profundidades de investigação diferentes respondem de formas distintas consoante a resistividade e a espessura das camadas atravessadas (Chappelier, 1992) e a condutividade eléctrica da coluna de fluido. É pois possível estimar a resistividade eléctrica da formação não perturbada, R_t com sondas de espaçamento electródico maior ou intermédio quando o diâmetro da sondagem é pequeno e a espessura da camada é grande. Nestas circunstâncias, o fluido na sondagem representa uma pequena percentagem do volume total que se mede e a sua influência é muito reduzida. Se a espessura da camada é superior a 3 vezes o espaçamento entre o eléctrodo de corrente e o de potencial, o efeito das formações adjacentes é desprezável e pode determinar-se a verdadeira resistividade do aquífero (Beck, 1981).

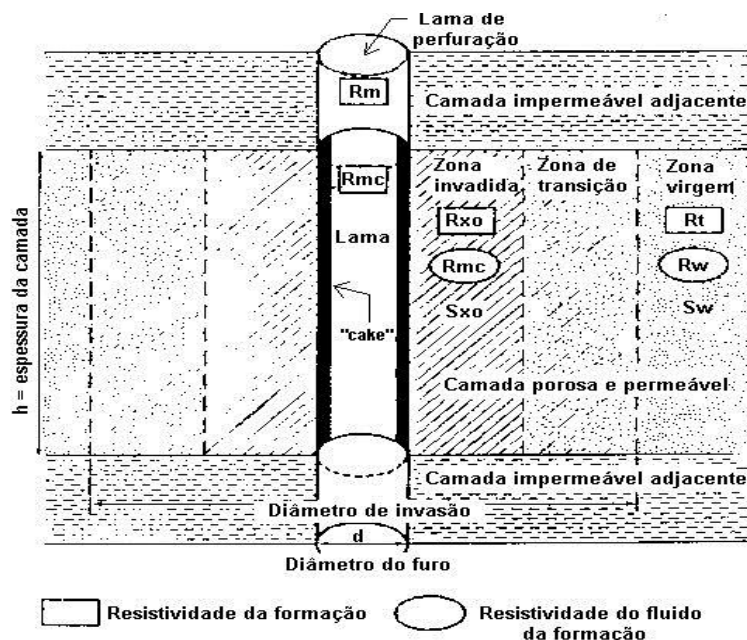


Fig. 2.5 – Esquema das várias zonas de invasão da lama numa formação aquífera (adaptado de Chappelier, 1992). R_m – resistividade eléctrica da lama de perfuração (ohm.m); R_{mf} – resistividade eléctrica do filtrado da lama (ohm.m); R_{mc} – resistividade eléctrica do cake (ohm.m); R_{xo} – resistividade eléctrica da zona invadida (ohm.m); R_t – resistividade eléctrica da formação não perturbada (ohm.m); R_w – resistividade eléctrica da água subterrânea (ohm.m).

Normalmente, são utilizadas sondas de RN com espaçamento entre o eléctrodo de potencial e o eléctrodo de corrente de 8" (20 cm), 16" (40 cm), 32" (80 cm) e 64" (160 cm) (Ramalho et al., 2009). A sua capacidade de penetração nas formações geológicas irá obviamente depender do diâmetro da sondagem, pelo que é importante uma boa noção do diâmetro da sondagem e/ou um bom registo do *Caliper*. Tendo em conta que as sondas de RN têm penetrações diferentes nas formações geológicas adjacentes da sondagem, consideram-se principalmente a RN curta (RN16") com poder de penetração mais reduzido que, em princípio, permite obter R_{xo} (a resistividade eléctrica da zona invadida, devido ao seu menor espaçamento entre o eléctrodo de corrente e o de potencial) e a RN comprida (RN64") que, muitas vezes, permite obter a R_t (a verdadeira resistividade eléctrica da zona não perturbada). Assim, para obter R_t e R_{xo} , é fundamental combinar toda a informação registada em diferentes espaçamentos de sondas de RN com diferentes profundidades de investigação.

Uma vez que as diagrfias realizadas com fins hidrogeológicos são muitas vezes conduzidas pouco tempo após a perfuração, a sondagem ainda não está em equilíbrio. A segregação gravítica da lama e a água para o interior da sondagem modificam a condutividade eléctrica da coluna do fluido ao longo do tempo e influenciam os resultados das diagrfias eléctricas se as diagrfias forem efectuadas durante este período (Keys, 1990). Por isso, a resistividade da lama varia gradualmente com o tempo ao longo da coluna causando variações em R_m , R_{mf} e R_{mc} (Chappelier, 1992). Se, por outro lado, a sondagem atingiu o equilíbrio térmico, esta resistividade irá variar em função do gradiente geotérmico local.

Com a utilização das diagrfias de RN e RL é possível aplicar a Lei de Archie (Archie, 1942; Winsauer et al., 1952) a diferentes tipos de problemas a resolver. Esta lei foi

estabelecida experimentalmente para meios saturados e relaciona a resistividade eléctrica de uma rocha com a porosidade, a geometria da distribuição dos poros e a resistividade do electrólito que os preenche. De acordo com a Lei de Archie, a resistividade eléctrica de uma rocha aumenta com a diminuição da salinidade do fluido que ela contém e quando o tamanho do grão e, conseqüentemente a permeabilidade, aumentarem. Este aumento, porém, não é tão notório como seria se as relações de Archie fossem rigorosamente aplicáveis (Chappelier, 1992), uma vez que a aplicação da Lei de Archie é apenas válida para formações limpas, *i.e.*, sem argila.

Assim, pela primeira Lei de Archie, o quociente entre a resistividade eléctrica total de um nível litológico permeável (R_t) e a resistividade eléctrica da água da formação (R_w), é uma constante adimensional a que é hábito chamar Factor de Formação, F . De acordo com Archie (1942) e Winsauer et al. (1952), e recorrendo ao esquema da Fig. 2.5, pode ainda escrever-se:

$$F = \frac{R_t}{R_w} = \frac{R_{x_0}}{R_{mf}} = \frac{a}{\varphi^m} \quad (2.1)$$

em que R_t é a resistividade eléctrica da rocha (ohm.m), R_w é resistividade eléctrica da água da formação (ohm.m), R_{x_0} é a resistividade eléctrica da zona invadida (ohm.m), R_{mf} é a resistividade do filtrado da lama (ohm.m), φ é a porosidade total, m é o factor de cimentação (adimensional) e a é um factor que depende da litologia, cujos valores podem ser encontrados em tabelas na literatura (Shon, 1996, por exemplo).

O registo de RN com espaçamentos múltiplos combinado com outros registos de apoio (resistividade da lama de perfuração, análises do filtrado da mesma lama e diâmetro da sondagem) permite detectar a existência de zonas invadidas pela lama e, portanto, potencialmente permeáveis. A extensão da zona invadida vai pois depender das propriedades das camadas perfuradas, sendo inferior quando a camada perfurada tem uma porosidade eficaz baixa. Esta simplificação está igualmente dependente do maior ou menor diâmetro da sondagem, mas acaba por ser, na maioria das diagrfias antigas efectuadas em sondagens, a única abordagem possível. Por isso, torna-se necessária uma comparação constante entre a condutividade eléctrica da água medida laboratorialmente e *in-situ* e o resultado das estimativas de R_w efectuadas em cada troço permeável. É possível existirem discrepâncias entre ambas, que poderão estar relacionadas não só com o diâmetro da sondagem, mas também com factores como a diferença entre os valores de R_{mf} medidos à superfície e ao longo da sondagem, erros de medida de R_{mf} , relacionados com as características físicas da zona invadida ou variações sazonais da qualidade da água, caudais extraídos e influência da temperatura em zonas de climas extremos.

Nas condições de aplicabilidade da Lei de Archie, a porosidade pode ser estimada utilizando a equação de Humble (Chappelier, 1992):

$$F = \frac{0,62}{\varphi^{2,15}} \quad (2.2)$$

Contudo, no caso da presença de argila, por vezes é necessário remover o seu efeito para a estimativa da porosidade das formações aquíferas, através da determinação do chamado Factor de Formação Intrínseco (F_i). Para tal, têm sido utilizados vários

modelos para a remoção desse efeito da argila, a maior parte empíricos, baseados na fracção argilosa ou na capacidade de troca catiónica (Patnode e Wyllie, 1950; Winsauer e McCardell, 1953; Waxman e Smits, 1968; Clavier et al., 1984; Sen et al., 1988), tal como está descrito em Khalil et al. (2011) da forma que se segue:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{F^*} \left(\frac{1}{R_w} + BQ_v \right) \quad (2.3)$$

Em que F^* , por analogia com a equação de Archie se denomina factor de resistividade da formação areno-xistosa, Q_v é a capacidade de troca catiónica (CTC) por unidade de volume de poro de rocha (meq/ml), que descreve o número de catiões disponível para condução, com ligações fracas aos locais das argilas carregados negativamente e que varia consoante o mineral de argila, como se pode ver na Tabela 2.2 (Costa, 1985). Q_v varia com a porosidade de acordo com a equação (Worthington, 1993):

$$\log Q_v = -3,56 - 2,74 \log \phi \quad (2.4)$$

O parâmetro B representa a mobilidade média dos catiões próximo das superfícies dos grãos e descreve a facilidade com que os catiões se movem ao longo da superfície da argila. Varia com a resistividade de acordo com a equação (Worthington, 1993)

$$B = \left[1 - 0,83 \exp. \left(\frac{-0,5}{R_w} \right) \right] \quad (2.5)$$

E introduz-se no modelo de Waxman-Smits de forma a relacionar o Factor de Formação Aparente (F_a) e o Factor de Formação Intrínseca (F_i).

$$F_a = \frac{F_i}{1 + BQ_v R_w} \quad (2.6)$$

Onde BQ_v reflecte o efeito de condução à superfície devido às partículas de argila. Quando não existem partículas de argila, $F_a = F_i$. Quando existem partículas de argila, BQ_v será consideravelmente elevado e F_a e F_i serão consideravelmente diferentes. No entanto, esta equação pode ser modificada de forma a relacionar os valores obtidos com os vários espaçamentos de sondas de resistividade eléctrica, recorrendo aos vários parâmetros obtidos a partir deles, designadamente R_{xo} , R_{mf} e R_o , de forma que

$$F_a = \frac{R_{xo}}{R_{mf}} = F_i - BQ_v R_t \quad (2.7)$$

Tabela 2.2 – Capacidade de Troca Catiónica (CTC) de alguns minerais de argila, em meq/100g (Costa, 1985).

Mineral de argila	CTC (meq/100g)
Vermiculite	100-150
Montmorilonite	80-150
Illite	10-40
Caulinite	3-15

2.6.1. Identificações litológicas e correlações estratigráficas

Em zonas sedimentares, as diagrfias realizadas com fins hidrogeológicos são muitas vezes utilizadas para identificar litologias quando em presença de alternância de formações arenosas e argilosas. Nestas circunstâncias, quando existem várias sondagens com diagrfias, poder-se-ão por sua vez efectuar correlações estratigráficas a partir destas. Esta é, aliás, uma das maiores utilizações das diagrfias na indústria petrolífera. A sonda mais comum utilizada pelas empresas de prospecção e captação de água que é aquela que é financeiramente mais acessível, mede o potencial espontâneo (SP), a resistência monoelectródica (SPR) e a radiação gama natural. Em aquíferos multicamada, esta sonda permite a identificação de litologias com resultados bastante positivos. Quando se fazem estas diagrfias de uma forma sistemática numa zona sedimentar, torna-se ainda possível efectuar correlações estratigráficas. Esta sonda tem que ser usada no final dos trabalhos de perfuração e antes do entubamento, pois as diagrfias do SP e do SPR são realizadas sob condições restritas e apenas em sondagens em *open-hole*, ao contrário da diagrfia de Radiação Gama Natural, que pode ser aplicada sob um largo espectro de condições físicas das sondagens, com qualquer tipo de lama de perfuração e em vários tipos de rocha (Keys et al., 1993).

Nesta última, uma vez que a radiação gama natural que a sonda detecta tem a sua origem no conteúdo em urânio (^{238}U), o tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K) nos materiais localizados a uma distância de 15 a 30 cm das paredes da sondagem (Keys, 1990; Doveton, 1994), podem detectar-se formações carboníferas, evaporitos e, especialmente, camadas argilosas, entre outras (Tabela 2.3). É o contraste entre as assinaturas eléctricas e radioactivas das formações arenosas e argilosas que permite a distinção entre ambas, o que é de grande utilidade nas identificações litológicas em sondagens mecânicas efectuadas em aquíferos arenosos multicamada.

Tabela 2.3 – Classificação das principais rochas-reservatório de acordo com o seu grau de radioactividade (adaptado de Chappelier, 1992, in Ramalho et al., 2009).

Rochas com baixa radioactividade natural	Rochas com radioactividade natural média	Rochas com elevada radioactividade natural
<ul style="list-style-type: none"> • Calcários e dolomitos • A maior parte dos carvões • Evaporitos sem potássio (halite, anidrite) • Rochas básicas e ultrabásicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Arenitos e areias • Gneisses 	<ul style="list-style-type: none"> • Granitos potássicos e rochas derivadas • Algumas areias e arenitos ricos em minerais acessórios do urânio • Fosfatos • Evaporitos potássicos • A maior parte das argilas • Xistos negros

Estas identificações litológicas estão visíveis no exemplo da Fig. 2.6, que mostra as diagrfias de SPR e Radiação Gama Natural de duas sondagens mecânicas realizadas no sistema aquífero multicamada de Viso-Queridas, próximo de Montemor-o-Velho (Ramalho, 2003).

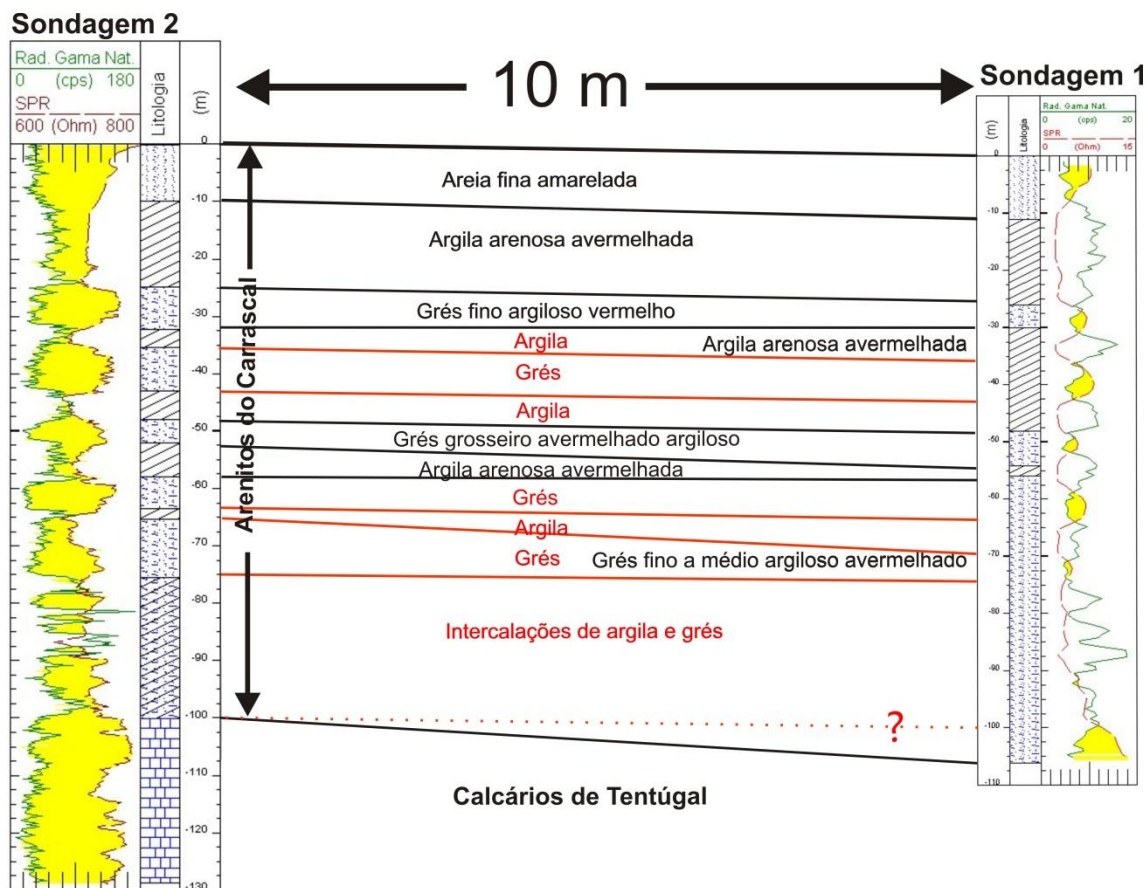


Fig. 2.6 – Diagramas de Radiação Gama Natural e do SPR realizadas em duas sondagens mecânicas do Sistema Aquífero de Visos-Querida (Ramalho, 2003). Estas duas diagramas serviram para identificar as principais litologias (areias e argilas) em cada sondagem, definir a coluna definitiva da captação e correlacionar estratigraficamente as duas sondagens.

Este é um sistema aquífero essencialmente poroso e livre, onde afloram os Arenitos do Carrascal, mais ou menos argilosos, sobrepostos aos calcários e calcários margosos de Tentúgal. A diagrama do SPR, ainda que qualitativa, dá uma boa noção da variação da resistividade eléctrica das formações (bastante elevada em formações arenosas sem argila contendo água nativa de baixa mineralização) e mais baixa na presença de argilas, por oposição a valores mais elevados de radiação gama natural. Por isso, nestas duas sondagens, a interpretação de apenas estas duas diagramas permitiu distinguir as camadas arenosas sem argila das camadas argilosas da Sondagem 2, aquando da sua realização em 2003 e compará-las com a reinterpretação das correspondentes camadas da Sondagem 1, de 1992. A interpretação das diagramas levou pois, à opção do prolongamento em profundidade da Sondagem 1 e a definição do posicionamento dos tubos-ralos levou a que o caudal recomendado de $72 \text{ m}^3/\text{h}$ para a Sondagem 1 subisse para $84 \text{ m}^3/\text{h}$ na Sondagem 2.

Além da identificação de litologias, uma correcta interpretação destas duas diagramas poderá permitir a realização de correlações estratigráficas que localizem camadas-guia. Estas, por sua vez possibilitam obter indicações acerca da localização previsível das formações aquíferas, o que poderá evitar o aparecimento de problemas na futura exploração de uma captação de água (Marques da Silva, 1992). Um exemplo desta capacidade das diagramas e da sua importância prática para o abastecimento de água de uma região encontra-se representado na Fig. 2.7.

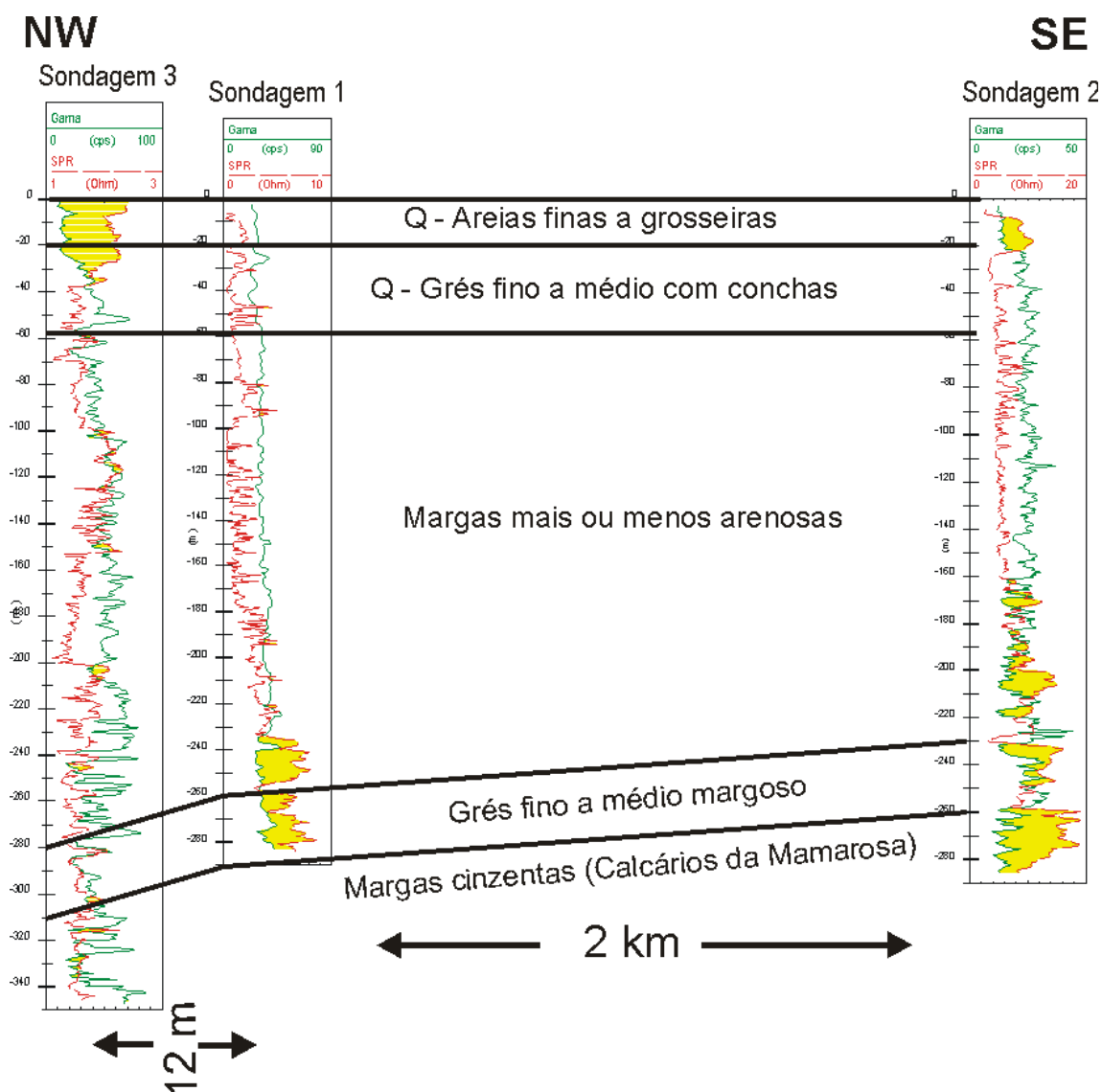


Fig. 2.7 – Correlações litológicas efectuadas entre 3 sondagens mecânicas num perfil NW-SE a partir das diagrfias de SPR e Radiação Gama Natural (Ramalho et al., 2009) de captações do Sistema Aquífero do Cretácico de Aveiro, com consequências na qualidade química da água captada.

Este exemplo encontra-se referido em detalhe em Ramalho et al. (2009). Neste, a interpretação apenas das diagrfias de Radiação Gama Natural, do SPR e das suas assinaturas características em formações arenosas, argilosas e carbonatadas permitiu uma análise hidrogeológica regional, que por sua vez possibilitou a identificação de camadas-guia do sistema aquífero do Cretácico de Aveiro e, como tal, a definição dos melhores troços para a colocação dos tubos-ralos. Este facto conduziu à resolução de alguns problemas práticos relacionados com a previsão qualitativa do tipo de água relativamente à mineralização de algumas das suas camadas permeáveis, baseando-se na experiência geológica do técnico sem contudo ser possível fazer uma previsão sequer grosseira da sua composição química quantitativa. Aqui, a análise das diagrfias da Sondagem 1 (a captar água com condutividade eléctrica de $1190 \mu\text{S}/\text{cm}$) e da Sondagem 2, localizada nas proximidades a captar água bastante menos mineralizada, serviu de suporte à decisão sobre o aumento da profundidade de uma nova captação de água para substituir a Sondagem 1, entretanto colapsada. A água desta nova captação (Sondagem 3) tem uma condutividade eléctrica de $401 \mu\text{S}/\text{cm}$,

que lhe confere uma qualidade química bastante superior à da Sondagem 1. Foi a interpretação conjunta da diagrafia do SPR juntamente com a diagrafia da Radiação Gama Natural que a nível regional melhorou as correlações entre sondagens, uma vez que esta última detecta camadas de argila muito finas (Keys e MacCary, 1971; Chappelier, 1992) e as camadas-guia (Marques da Silva, 1992).

Outras diagrafias que dão boas indicações acerca das litologias atravessadas têm a ver com a informação que se pode obter acerca da porosidade, nomeadamente as diagrafias de Neutrões e as diagrafias Acústicas. As primeiras, ao variarem com o conteúdo em hidrogénio em redor das paredes da sondagem (Ramalho et al., 2009), também são frequentemente utilizadas para identificação de litologias, podendo contribuir para o estabelecimento de correlações litológicas e estratigráficas sob condições físicas da sondagem bastante variáveis (Keys, 1990). As segundas, se bem que não sejam muito utilizadas devido aos elevados custos da sonda, baseiam-se no estudo da propagação de ondas acústicas a partir de uma sonda acústica. A medição da velocidade de propagação destas ondas e a sua atenuação dá informações importantes acerca das propriedades mecânicas das rochas, sendo fundamentalmente utilizadas em Hidrogeologia para determinações de porosidade e identificações litológicas. O facto da sonda acústica não incluir material radioactivo é considerado uma vantagem desta sobre a sonda de neutrões em algumas situações potencialmente críticas em termos ambientais. Por outro lado, a impossibilidade de obter dados em furos entubados e/ou sem fluido com a sonda acústica implica necessariamente o uso da sonda de neutrões nestas circunstâncias. Uma vez mais, a sonda a utilizar terá que ser uma opção baseada no equipamento disponível, adequabilidade do mesmo às condições físicas ambientais e da sondagem e em factores financeiros.

Nas Figs. 2.8 e 2.9 encontram-se dois exemplos da utilização simultânea de diagrafias Acústicas e de Neutrões no estudo de litologias, que mostram a sua variação em dois troços distintos de um conjunto mais vasto das diagrafias efectuadas numa sondagem mecânica realizada em Belverde para o reconhecimento do Miocénico da parte terminal da Bacia do Baixo Tejo através de uma sondagem com amostragem contínua (Ribeiro et al., 2003).

A Fig. 2.8 mostra o troço 210-252 m dos dois receptores (RX1 e RX2) da diagrafia Acústica de uma sonda acústica não compensada, pelo método da área variável (Ramalho et al., 2009), bem como o respectivo DT médio, a oscilar entre os 400 e os 500 $\mu\text{s/m}$. Destaca-se o troço dos 231,5 a 239 m como tendo maior porosidade, correspondente a arenitos médios a finos, com maior resistividade eléctrica, com uma zona (236-238 m) contendo menor quantidade de argila, apresentando valores de radiação gama natural inferiores aos valores médios do troço em análise, que são de cerca de 200 cps. No troço de siltitos localizado imediatamente abaixo deste, entre os 239 e os 245 m, regista-se um patamar de 150 cps na diagrafia de Radiação Gama Natural, ao qual corresponde uma ligeira baixa previsível dos valores do SPR.

No caso da Fig. 2.9, o troço da mesma sondagem entre os 480 e 525 m possui uma diversidade litológica superior, com camadas intercaladas de argilitos, siltitos, arenitos médios a finos, arenitos grosseiros e matéria orgânica.

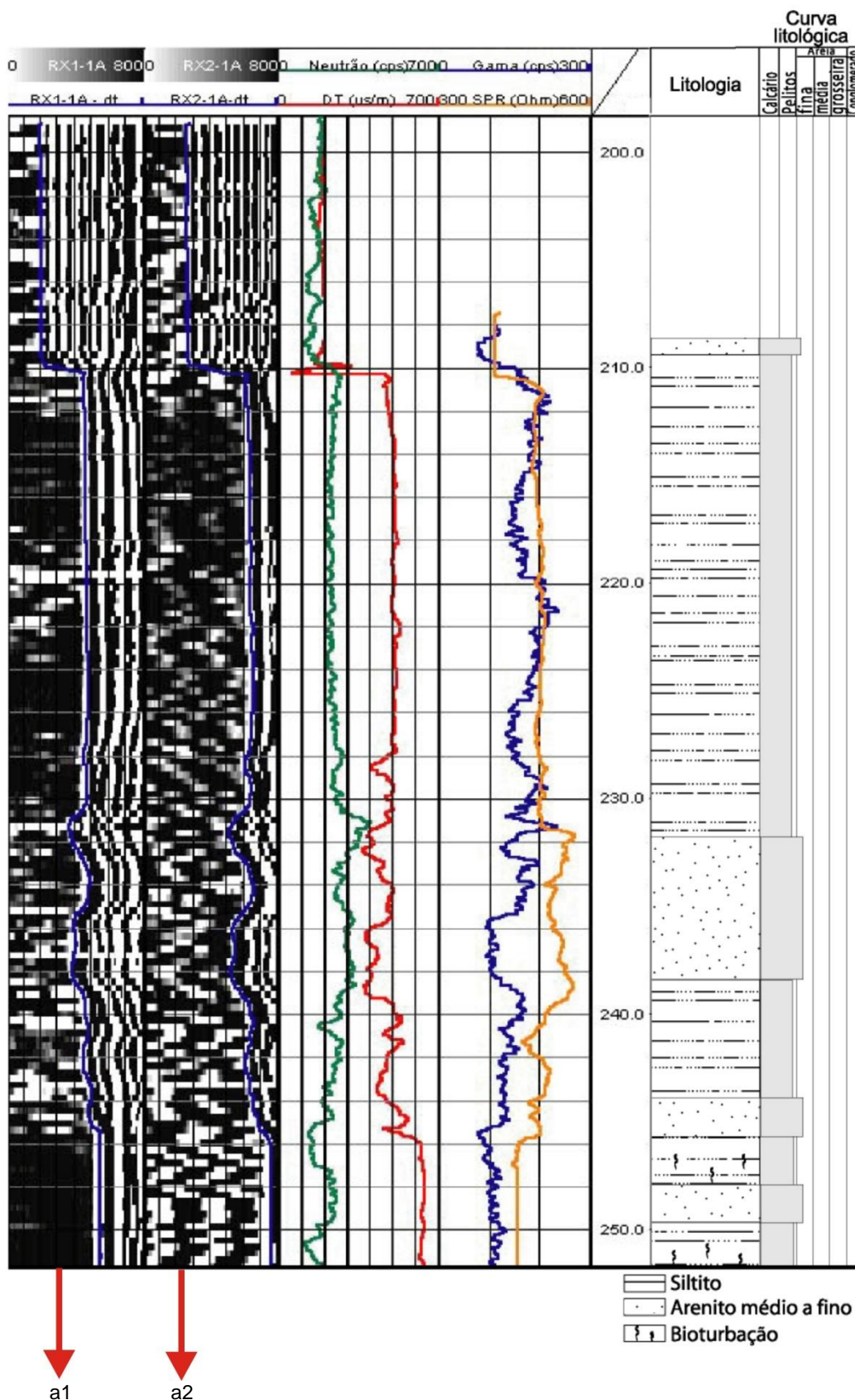


Fig. 2.8 – Diagrfias efectuadas na sondagem de Berverde. (a1 e a2) registo dos dados não processados da sonda SAA-1000 pelo método da área variável. Diagrfias de Neutrões, Acústica, do SPR e Radiação Gama Natural. Correspondente troço da litologia (Ribeiro et al., 2003).

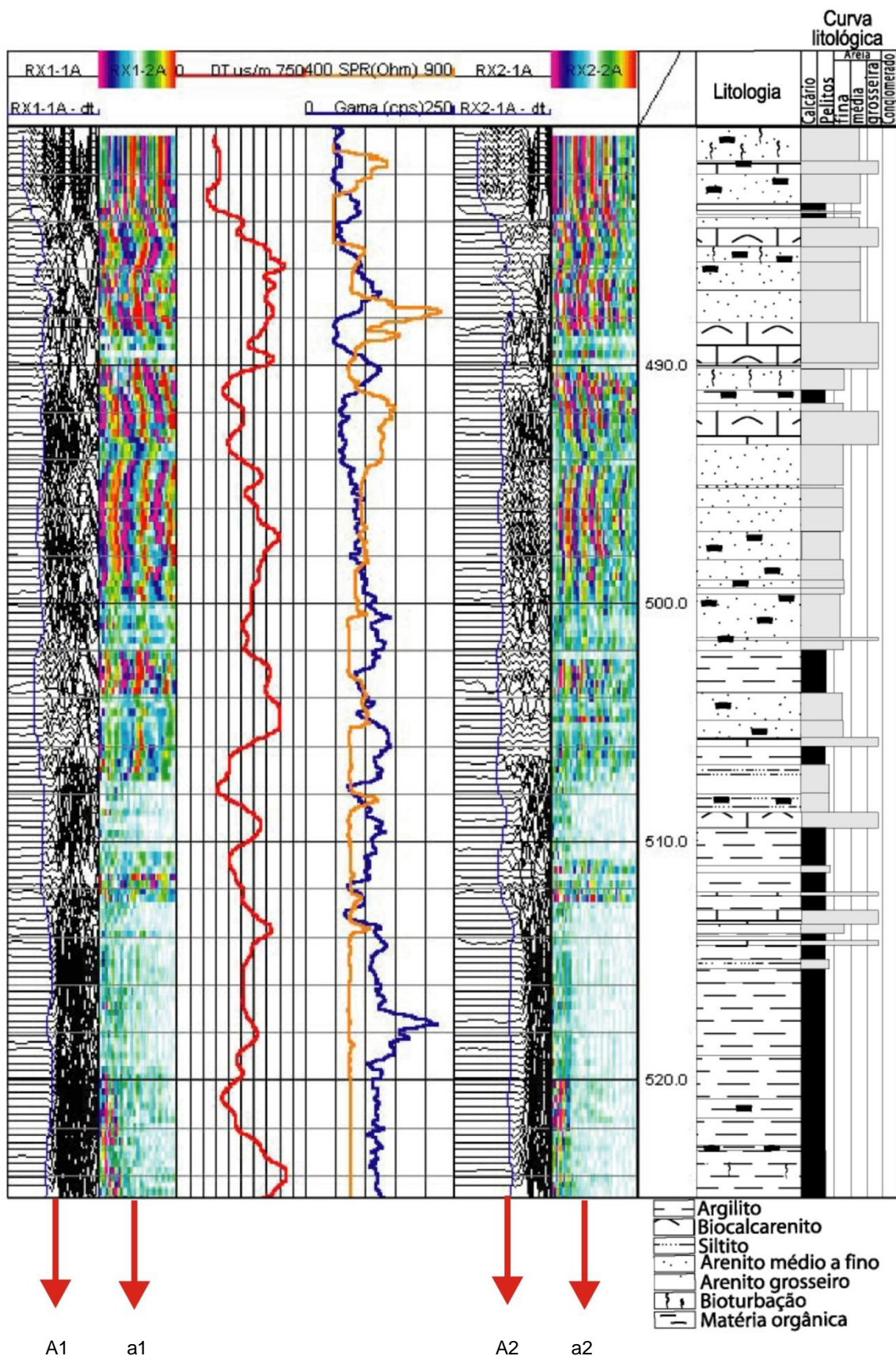


Fig. 2.9 – Diagrafias efectuadas na sondagem de Belverde. (A e a) registo dos dados não processados da sonda Mountsopris, Inc. SAA-1000, apresentados de dois modos diferentes, referentes à chegada das ondas P nos dois receptores Rx1 (A1 e a1) e RX2 (A2 e a2). Diagrafia Acústica, do SPR e Radiação Gama Natural. Neste troço, não existe diagrafia de Neutrões para correlação. Correspondente troço da litologia (Ribeiro et al., 2003).

Os picos da radiação gama natural podem ser correlacionados com camadas margosas micáceas fossilíferas, com presença de micas contendo ^{40}K . Aqui, a representação da diagrfia Acústica encontra-se em *wiggle trace* (Ramalho et al., 2009) e a maior parte dos valores de radiação gama natural situa-se entre os 50 e os 150 cps, inferiores ao troço anterior. Em média, neste último troço, os valores da diagrfia Acústica oscilam entre os 375 e os 450 $\mu\text{s/m}$, o que significa que a sua porosidade é inferior ao primeiro troço. As velocidades acústicas mais elevadas estão frequentemente relacionadas com camadas maciças e compactas, como argilitos e/ou calcários e menos com camadas margosas fossilíferas. Os valores mais baixos foram obtidos para arenitos siltosos porosos (fossilíferos e com baixo conteúdo em argilas) e arenitos biocalcarenosos. O carácter variável, quer do grau de porosidade, quer do conteúdo argiloso, micáceo e fossilífero nos níveis atravessados pelas diagrfias na sondagem de Belverde reflecte-se igualmente nas diagrfias. Com base nesta informação aliada à informação micropaleontológica, palinológica e de datações isotópicas, Ribeiro et al. (2003) identificaram uma relação entre os picos de radiação gama natural e a definição das sequências deposicionais previamente identificadas por Antunes et al. (1999; 2000) e Pais et al. (2002).

2.6.2. Identificação das zonas de alteração e fracturação

A mesma sonda convencional e mais acessível existente no mercado já referida anteriormente, que mede o SP, SPR e a radiação gama natural permite igualmente obter uma boa imagem da variação qualitativa da resistência das formações em redor das paredes da sondagem (Keys, 1990). A sua importância prática é que um aumento da resistividade da formação é indicado por um aumento da resistência da diagrfia e vice-versa. Da mesma forma, as argilas resultantes de processos de alteração e/ou fracturas podem também ser detectadas com picos e patamares mais elevados na diagrfia de Radiação Gama Natural. Com estes dados pode, pois, retirar-se também informação acerca das profundidades e espessuras da zona fracturada e das várias zonas de alteração em rochas compactas e cristalinas. Nas rochas com estas características, a utilização desta sonda em conjunto com a sonda de Neutrões, que responde principalmente ao conteúdo em hidrogénio e, como tal, à presença de água (Keys e MacCary, 1971), aumenta a consistência e a qualidade da informação obtida (Fig. 2.9).

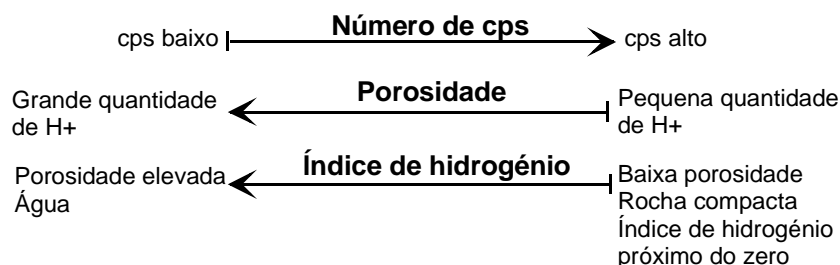


Fig. 2.9 – Escalas relativas nas diagrfias de Neutrões das sondas de neutrões utilizadas em Hidrogeologia (adaptado de Chappelier, 1992, in Ramalho et al., 2009).

Apesar da diagrafia do SPR fornecer apenas interpretações qualitativas, Ramalho et al. (2009) mostraram as suas potencialidades a nível da identificação da evolução em profundidade do grau de alteração das formações geológicas, identificação de fracturas isoladas no seio de rocha sã e de zonas fracturadas de espessura considerável numa sondagem realizada no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 2000b; Ramalho et al, 2009), bem como a sua correlação com a informação da correspondente diagrafia de Neutrões (Fig. 2.10). De facto, em rochas compactas, as diagrafias do SPR e de Neutrões detectam a diminuição progressiva do seu grau de alteração até eventualmente ser atingida a rocha sã, o que permite concluir com frequência da existência de dois tipos de comportamentos hidráulicos separados por uma zona de rocha sã. No caso das diagrafias da Fig. 2.10, tal pode ser comprovado pela observação das diagrafias de Fluxo e pode ainda ver-se a diminuição do SPR nas zonas fracturadas aos 38 m e entre os 44 m e os 46 m de profundidade. É ainda de notar a diferença entre os valores do SPR entre as zonas alterada (electricamente menos resistiva) e fracturada (que se traduz num aumento da resistência eléctrica). Em simultâneo com o aumento progressivo da resistência eléctrica na diagrafia do SPR, detecta-se um aumento igualmente progressivo nos valores de neutrões, indicadores de menor porosidade, apenas perturbados com a existência de zonas fracturadas onde estes diminuem significativamente. Os gabros sãos encontram-se num patamar constante de cerca de 1150 cps na diagrafia de Neutrões. É de salientar a presença de uma zona fracturada com entrada de água na sondagem entre os 52 e os 54 m identificada a partir de um pico da diagrafia de Radiação Gama Natural (F1) e variações significativas nos valores das diagrafias de Fluxo e do Gradiente Geotérmico.

2.6.3. Identificação de camadas aquíferas

Em formações sedimentares detríticas, a diagrafia de Radiação Gama Natural e do SPR interpretadas em conjunto com uma boa diagrafia do SP também podem dar um contributo na identificação de camadas permeáveis (Chappelier, 1992). A análise qualitativa da intensidade das deflexões desta última permite identificar camadas porosas e permeáveis, em alguns casos localizar zonas impermeáveis com a diagrafia de Radiação Gama Natural, podendo igualmente calcular-se a percentagem de argila contida na rocha-reservatório. Contudo, sempre que possível, além da utilização desta sonda deve ainda realizar-se a aquisição de outras diagrafias eléctricas, para complemento da informação disponível. As diagrafias de resistividade multielectrónica com diferentes profundidades de investigação, juntamente com a diagrafia do SPR constituem bons indicadores da existência de camadas aquíferas, embora somente as primeiras tenham a capacidade de dar informações quantitativas acerca da qualidade da água nativa existente nestas mesmas camadas aquíferas.

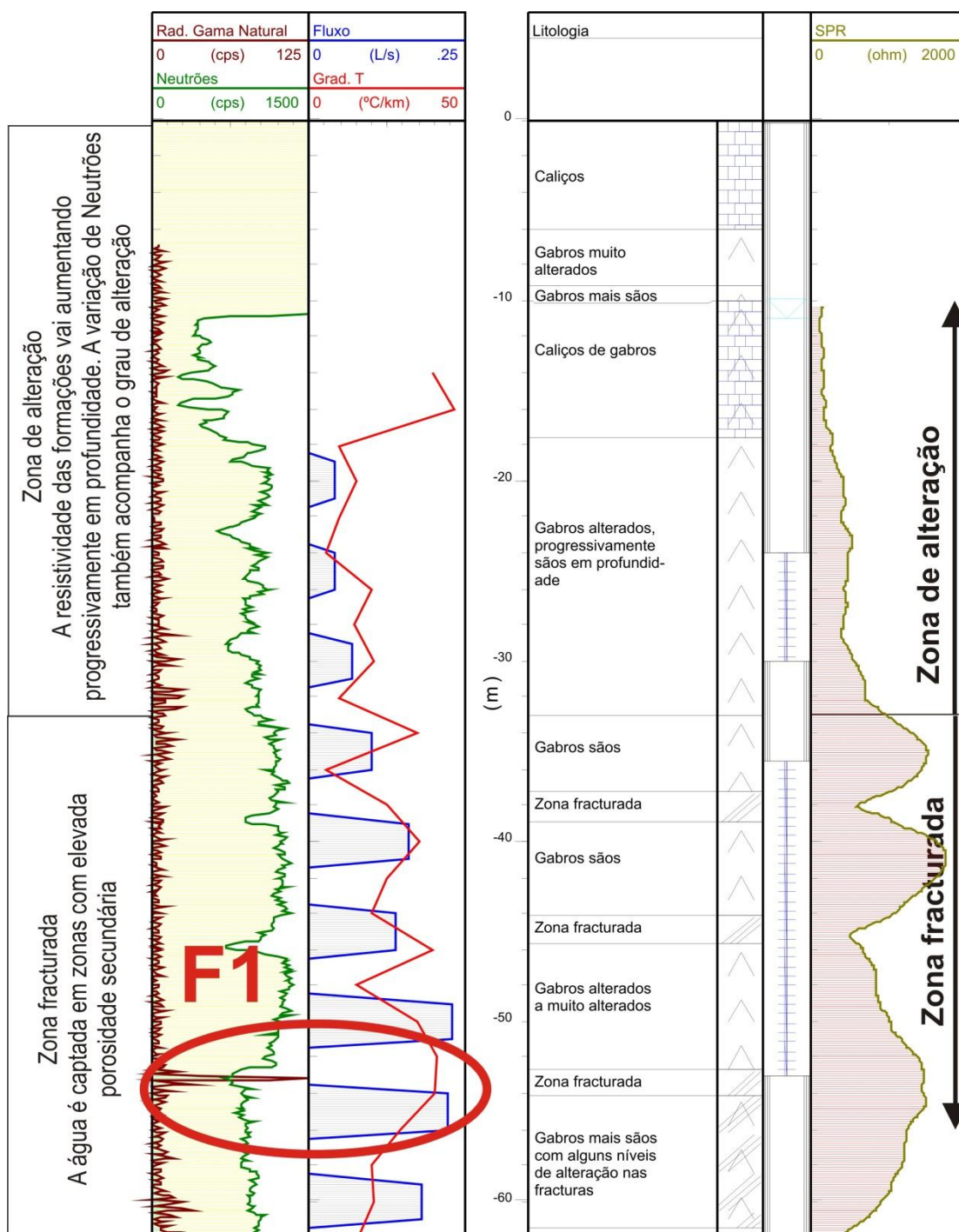


Fig. 2.10 – Diagrafia do SPR e diagrfias nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da coluna de fluido (Fluxo e Gradiente Geotérmico), com referência para as zonas alterada e fracturada numa sondagem realizada no sistema aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 2000b; Ramalho et al., 2009).

As diagrfias da Fig. 2.11 realizadas numa sondagem do sistema aquífero multicamada do Cretácico de Aveiro com uma sonda simples de SR, SPR e radiação gama natural demonstram esta capacidade. Estas mostram a individualização dos troços de argila e areias, com espessuras muito pequenas, mas onde uma interpretação ao detalhe de diagrfias realizadas de uma forma tecnicamente correcta e com a profundidade zero bem posicionada permitiu localizar as camadas permeáveis e definir a colocação dos tubos-ralos nas zonas mais promissoras, o que não teria acontecido na sua ausência.

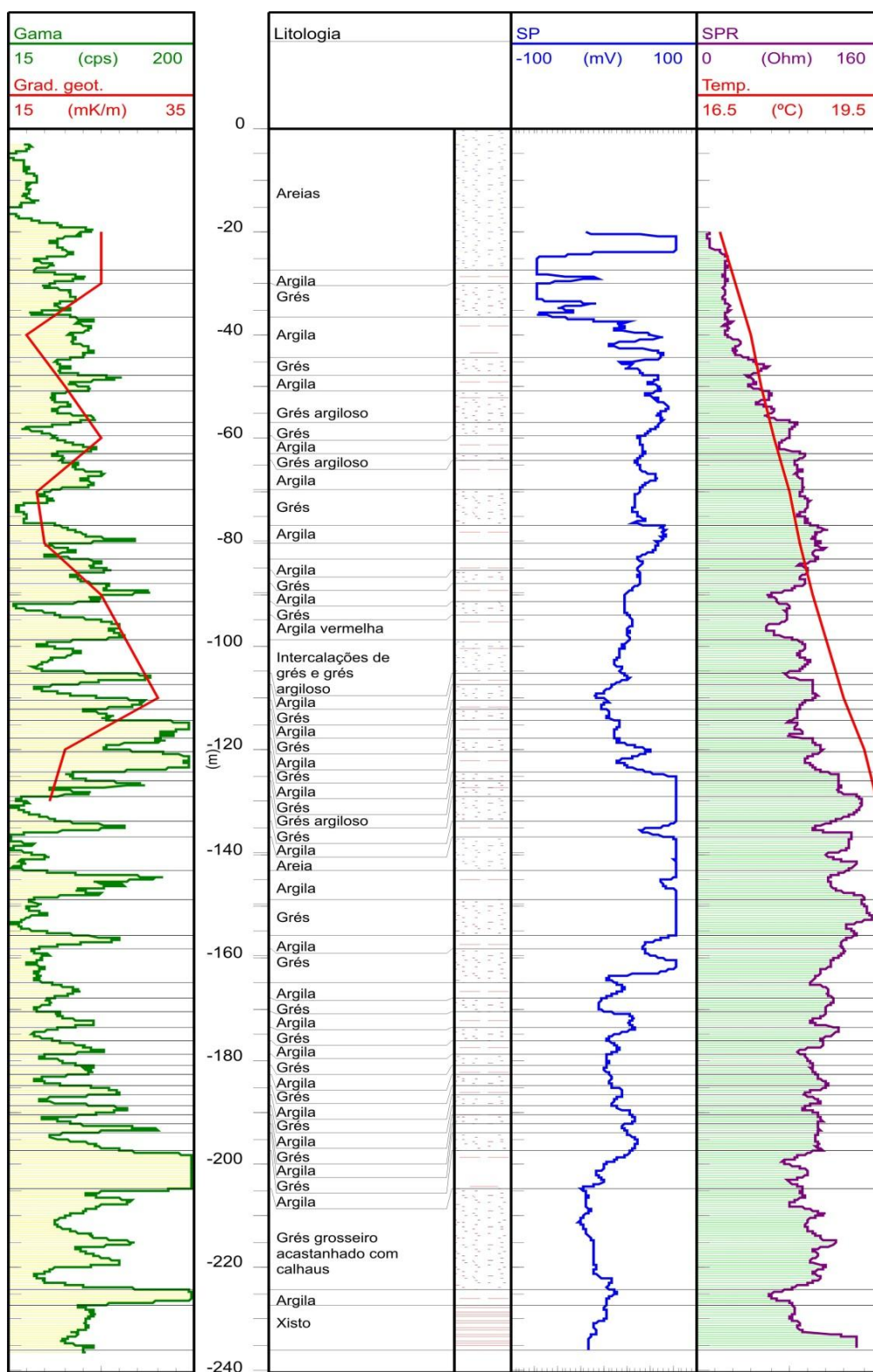


Fig. 2.11 – Diagramas do SP, SPR e Radiação Gama Natural numa sondagem localizada no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro. A interpretação conjunta destas diagramas em zonas bem conhecidas de aquíferos multicamada permite localizar camadas aquíferas, com baixo conteúdo em argilas e camadas argilosas, identificadas pelos picos de radiação gama natural e escolher para a colocação de tubos-ralos nas zonas que se afigurem mais promissoras a nível de espessura e características químicas da água, valorizando a qualidade final da captação.

Caso exista adicionalmente disponível uma diagrfia de Neutrões, poder-se-ão ainda identificar níveis aquíferos suspensos por trás de entubamentos cegos (Keys e MacCary, 1971) e a passagem de zonas saturadas para zonas não saturadas, em formações porosas, já que o índice de hidrogénio cai abruptamente ao atravessá-las (Chappelier, 1992). No entanto, a resposta da diagrfia de Neutrões à presença de certos minerais ricos em hidrogénio é muitas vezes prejudicial na interpretação, apesar de poder também fornecer informação útil, com a distinção entre camadas de gesso ricas em hidrogénio (com deflexões para a esquerda) e formações anidriticas (com deflexões para a direita) (Keys e MacCary, 1971; Chappelier, 1992) e ainda camadas de carvão (Keys, 1990). No entanto, estes tipos de formações podem ser melhor diagnosticados se a diagrfia de Neutrões for utilizada em conjunto com outras diagrfias, a par de um conhecimento geológico razoável da zona.

As diagrfias da Condutividade do Fluido, além de poderem também ser utilizadas na identificação de zonas permeáveis, são aplicadas na detecção da interface água doce/água salgada, detecção de plumas de contaminação ou ainda como auxiliares de interpretação de traçadores (Chappelier, 1992; Ramalho et al., 2009).

2.6.4. Detecção de fracturas

Para a caracterização do modo de ocorrência dos fluidos em formações compactas e cristalinas, a capacidade das diagrfias identificarem fracturas, quer através da variação do diâmetro da sondagem, quer pela deposição de minerais de alteração, constitui um outro aspecto fundamental na análise hidrogeológica de uma sondagem mecânica.

A detecção de fracturas em rochas compactas é feita com o recurso preferencial a um conjunto de sondas que dêem indicações da variação das características eléctricas das formações atravessadas e simultaneamente salientem aspectos que são comuns de encontrar nas zonas de falha, nomeadamente deposição de argilas alteração, alteração do conteúdo em iões de H^+ ou alteração do diâmetro da sondagem. Além da diagrfia do SPR, no caso das diagrfias eléctricas (Howard, 1990), a diagrfia de Radiação Gama Natural no caso das diagrfias nucleares é considerada das mais eficazes na detecção de fracturas em rochas compactas devido à frequente ocorrência de argilas de alteração. A diagrfia de Neutrões é igualmente encarada como um excelente indicador da existência de fracturas em rochas compactas e cristalinas densas, com porosidade primária muito baixa e conteúdo em hidrogénio mínimo, nomeadamente calcários, mármore e granitos, que frequentemente exibem produtos hidratados de alteração química na presença das fracturas (Howard, 1990) e proporcionam picos negativos facilmente identificáveis e correlacionáveis com as outras diagrfias referidas (ver F1 na Fig. 2.10). Esta diagrfia não só salienta as variações de diâmetro da sondagem causadas pelas fracturas, como também responde aos produtos de alteração química no interior e em redor das suas aberturas (Howard, 1990), que envolvam a ocorrência de minerais hidratados.

Devido a frequentemente não serem necessárias lamas bentoníticas ou espumas para sustentação das paredes da sondagem aquando da sua perfuração, a caracterização dos fluidos provenientes de fracturas em rochas cristalinas deverá ser feita

maioritariamente a partir de diagrfias da coluna de fluido, de onde se destacam as diagrfias de Fluxo, de Temperatura e da Condutividade do Fluido. As variações da condutividade do fluido e dos registos da temperatura ajudam na identificação de fluxos de água para o interior da sondagem em meios fracturados, tal como o tipo de água que produz esses mesmos fluxos. Esta indicação é de enorme importância em Hidrogeologia, pois permite identificar locais de entrada e saída de água e obter estimativas de caudais para cada zona fracturada e não apenas parâmetros que digam respeito à totalidade da sondagem. No caso das sondas de fluxo, consoante as situações e os objectivos, poder-se-á optar pelo sistema de micromolinete ou de impulso de calor, utilizados sob condições hidráulicas diferentes. A sonda de fluxo com o sistema de micromolinete é indicada para utilizar durante os ensaios de bombagem, uma vez que apenas mede fluxos que são, em geral, mais elevados que os fluxos estáticos naturais. Esta sonda é baseada na transmissão de um impulso que indica o número de revoluções do micromolinete por unidade de tempo (Howard, 1990), que por sua vez é relacionada com a velocidade de fluxo (Keys e MacCary, 1971) através da equação do molinete, fornecida pelo seu construtor. As melhores diagrfias de Fluxo com os sistemas de micromolinete são obtidas comparando a diagrfia ascendente com a diagrfia descendente efectuadas na mesma sondagem à mesma velocidade constante (Crowder et al., 1994). Este equipamento tem a sua melhor utilização para medir fluxos superiores a 90 cm³/min (Keys, 1990; Crowder et al., 1994).

Por outro lado, as sondas de fluxo com o sistema de impulso de calor podem detectar fluxos tão baixos como 0,038 l/min, especialmente sob condições estáticas (Howard, 1990) ou durante um ensaio de caudal (Crowder et al., 1994). Sob condições estáticas, deve esperar-se algum tempo antes de adquirir medidas a cada mudança de profundidade, para prevenir perturbações no fluido e efectuar várias medidas para registar a média do valor registado. A maior desvantagem da sonda de fluxo com o sistema de impulso de calor é que fluxos superiores a 11,35 l/min já não são detectados (Ramalho et al., 2009). A medição do fluxo de água no interior da sondagem utilizando uma sonda de fluxo com esta em repouso e/ou em bombagem torna possível estimar alguns parâmetros hidráulicos e avaliar a contribuição individual de cada troço para o caudal extraído.

A Fig. 2.12 mostra um conjunto de diagrfias em formações compactas, compreendendo diagrfias nucleares e da coluna do fluido realizadas numa sondagem mecânica realizada no Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do-Chão (Ramalho et al., 2009) preenchida com água nativa. Distinguem-se as zonas calcárias menos alteradas dos 44 aos 50 m e dos 58 aos 62 m com baixo conteúdo em argila, resistividade elevada e valores de neutrões igualmente elevados que chegam a atingir 1400 cps. Em algumas zonas existem fracturas, bem identificadas pelo decréscimo abrupto dos valores de neutrões e pelos valores baixos da diagrfia do SPR. Nestas fracturas, por vezes, as oscilações abruptas também da diagrfia do Gradiente Geotérmico revelam a existência de circulação de água de e para o interior da sondagem. Registam-se fracturas com entradas de água na sondagem a profundidades da ordem dos 75 m e 90 m (F1) e com saída de água a profundidades de 34-38 m (F2), 80 m (F3) e 100 m (F4).

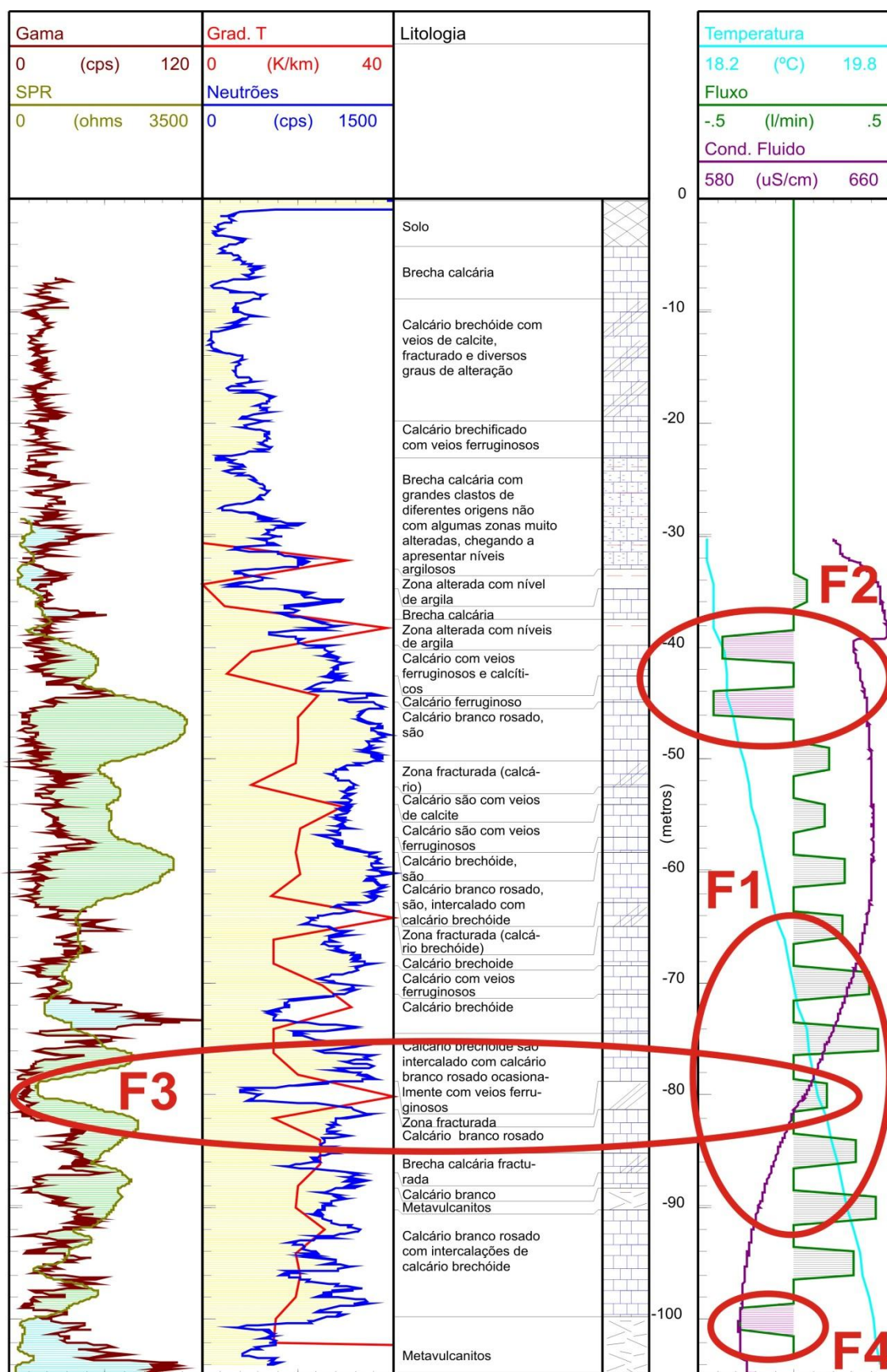


Fig. 2.12 – Exemplo de um conjunto de diagrfias em formações compactas: diagrfias nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e diagrfias da coluna de fluido (Fluxo com o sistema de impulso de calor, Condutividade do Fluido, Temperatura e Gradiente Geotérmico) efectuadas numa sondagem mecânica localizada no Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do-Chão (Ramalho, 2000c).

Dando como exemplo a zona fracturada entre os 79 e os 81 m, aqui não só existe uma enorme variação dos valores do gradiente geotérmico e como tal, da temperatura em profundidade, mas também um decréscimo dos valores de neutrões até aos 300 cps e radiação gama natural até 10 cps, ao mesmo tempo que se nota um aumento de caudal, acompanhado do aumento dos valores registados da condutividade eléctrica do fluido, de 600 para 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

No entanto, sem a presença de sondas de fluxo, de condutividade eléctrica da água e do *Caliper* disponíveis, a identificação de fracturas em rochas compactas e muito resistivas pode socorrer-se em alternativa da interpretação conjunta das diagrfias de Neutrões e Temperatura, estas últimas podendo indicar a presença de fracturas e se os fluxos produzidos são de ou para o interior da sondagem. Estes aspectos serão abordados mais em detalhe no Capítulo 3. A sua interpretação associada à diagrfia do SPR indica a variação da resistividade eléctrica ao longo da sondagem, que decresce nas zonas fracturadas. Este é o caso das diagrfias eléctricas do SPR e de RN64” realizadas numa sondagem mecânica efectuada no Sistema Aquífero do Anticlinal de Estremoz (Ramalho, 2000d; Ramalho et al., 2009) da Fig. 2.13, que são perfeitamente correlacionáveis.

Nesta sondagem, as fortes deflexões negativas da curva de neutrões evidenciadas nas zonas entre os 40 e os 50 metros e os 95 e os 160 metros, associadas ao patamar de cerca de 2000 cps em ambos os troços e ainda os patamares da curva de SPR reflectindo resistividade elevada, permitem concluir da ausência de zonas produtivas entre estes dois troços.

A partir da interpretação da diagrfia do Gradiente Geotérmico, torna-se possível evidenciar zonas de forte circulação de água aos 85 m (F1), 165 m (F2) e 210 m (F3). A fractura produtiva identificada aos 85 m revela-se ainda claramente através do contraste evidenciado pela presença de níveis argilosos na diagrfia de Radiação Gama Natural e à forte resposta negativa das sondas de Neutrões e do SPR. Todas estas fracturas, embora parcialmente preenchidas com argilas de alteração, são suficientemente abertas para permitirem circulação de água, que causa perturbações visíveis na diagrfia de Temperatura e bem evidenciada nas oscilações da diagrfia do Gradiente Geotérmico. No Complexo Vulcano-Sedimentar de Estremoz, constituído por alternância de mármore, xistos e níveis de metavulcanito ocorrendo a profundidades superiores a 160 m, esta resposta já não se torna tão clara. É de salientar que a fractura F4, aos 198 m, corresponderá a uma concentração anormal de urânio motivada pela sua elevada solubilidade e posterior deposição em ambientes que lhe são favoráveis, causando o pico que se verificou, estreito, pronunciado e isolado na diagrfia de Radiação Gama Natural.

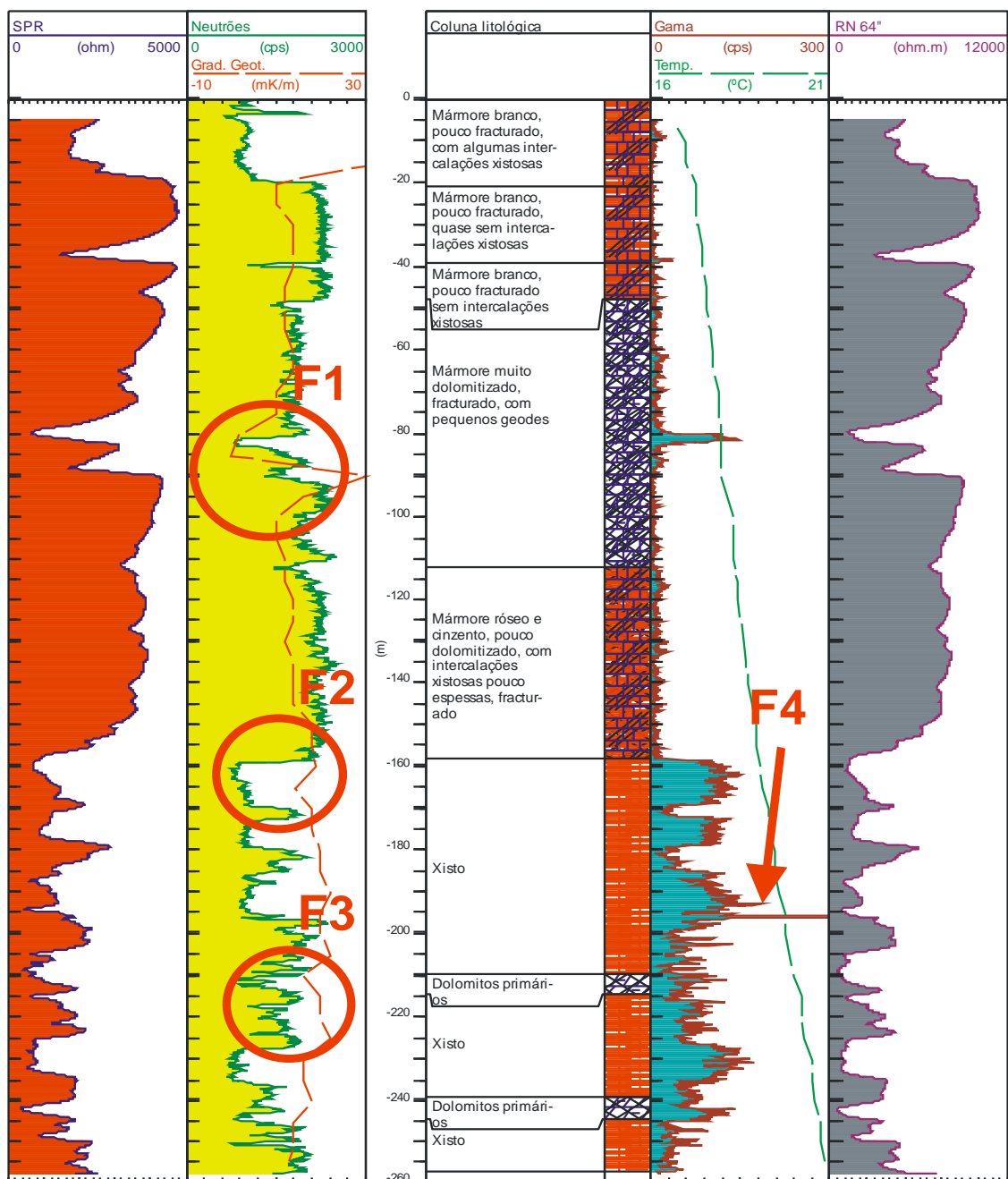


Fig. 2.13 – Identificação de fracturas com o recurso a diagrfias (Ramalho, 2000d; Ramalho et al., 2009) numa sondagem localizada no Sistema Aquífero do Anticlinal de Estremoz. Diagrfias eléctricas (SPR e RN64''), nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da coluna de fluido (Temperatura e Gradiente Geotérmico).

2.6.5. Estimativa da qualidade química da água nativa

A realização de um conjunto de diagrfias eléctricas numa sondagem mecânica torna ainda possível uma estimativa da qualidade química da água das formações, em especial em aquíferos multicamada localizados em bacias sedimentares.

Nestes casos, a interpretação das diagrfias é feita partindo do princípio que, consoante o diâmetro da sondagem, a maior ou menor profundidade de investigação das diferentes sondas eléctricas atingirá mais ou menos profundamente as formações adjacentes, segundo a distribuição da Fig. 2.5 (Chappelier, 1992). A extensão da

invasão da lama bentonítica nas diferentes zonas referenciadas na Fig. 2.5 depende das propriedades das camadas perfuradas. Em geral, a invasão é fraca quando a camada permeável tem uma porosidade eficaz pouco elevada, como é o caso por exemplo das margas. A invasão será mais extensa quando a camada permeável for mais porosa, como é o caso de areias bem calibradas.

Para determinar as características salinas de uma água, utiliza-se muitas vezes o conceito de salinidade equivalente, que consiste na salinidade em termos do teor em cloreto de sódio (NaCl) que produziria uma resistividade eléctrica igual à da água em causa (Chappelier, 1992). A contribuição de um sal para a resistividade de uma solução depende da sua concentração e salinidade total, e a estimativa da concentração em NaCl equivalente pode ser feita através de factores multiplicativos ou factores de Dunlap, apresentados na Tabela 2.4 para vários aniões e catiões (Chappelier, 1992). Para obter a salinidade real das águas para uma dada região, devem ser preparados uma série de ábacos representativos dessa região mostrando a variação da resistividade em função da concentração de sais dissolvidos e concentração dos vários iões em função da quantidade de sais dissolvidos. Só assim poderá ser estimada uma composição química aproximada para uma amostra de água.

A interpretação conjunta das diagrfias de Temperatura e de Condutividade de Fluido é importante na determinação da concentração equivalente em NaCl, como é visível através do ábaco da Fig. 2.14.

É, no entanto, importante ter em consideração que não é possível determinar a composição química de uma amostra de água através da sua resistividade eléctrica. A salinidade determinada desta forma é apenas uma aproximação, em particular no caso das águas superficiais cujo conteúdo em NaCl é pouco significativo.

Tabela 2.4 – Factores de Dunlap para vários aniões e catiões (Chappelier, 1992).

Catião	Factor de Dunlap	Anião	Factor de Dunlap
Na ⁺	1,00	Cl ⁻	1,00
K ⁺	0,85	HCO ₃ ⁻	0,27
Ca ²⁺	0,95	SO ₄ ²⁻	0,50
Mg ²⁺	2,00	CO ₃ ²⁻	1,26

Este ábaco dá no entanto ao hidrogeólogo a possibilidade de determinar, a partir da sua resistividade eléctrica, se a água encontrada está dentro dos limites aceitáveis para o consumo. Em zonas relativamente bem conhecidas, o valor do NaCl equivalente obtido com os factores de Dunlap pode ainda dar indicações quantitativas importantes acerca da qualidade química prevista para a água nativa a obter numa sondagem mecânica que aí se realize e para a colocação mais adequada dos troços de tubo-ralo. No caso de investimentos de particulares e empresas de captação de água subterrânea em sondagens relativamente profundas, este é um factor que se torna de grande importância.

Esta estimativa pode ser efectuada através da realização de diagrfias da Condutividade Eléctrica do Fluido, do SP ou através de outras diagrfias eléctricas

que, quando interpretadas em conjunto, dão indicações acerca da qualidade química da água contida nas várias camadas arenosas que a sondagem atravessa.

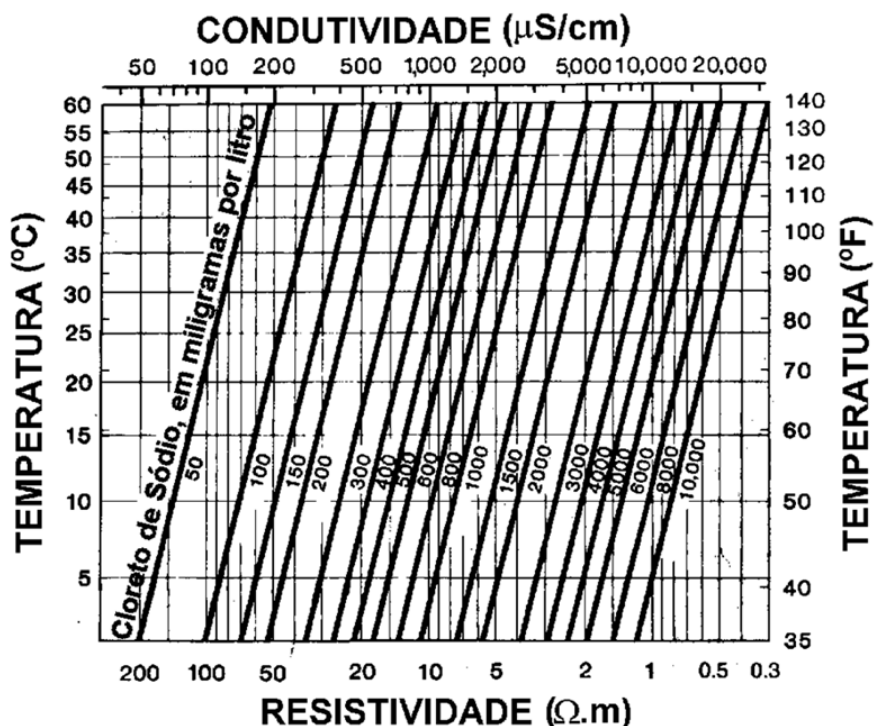


Fig. 2.14 – Ábaco que relaciona a resistividade eléctrica (ohm.m) e/ou a condutividade eléctrica (µS/cm), temperatura (°C e °F) e a concentração equivalente em NaCl (mg/l) (adaptado de Keys, 1990).

2.6.5.1. Aplicação da diagrfia da Condutividade do Fluido

A diagrfia da Condutividade do Fluido pode ser registada em conjunto com a diagrfia de Temperatura e Resistividade do Fluido ou simultaneamente a outras diagrfias eléctricas com uma sonda multiparamétrica e mede a condutividade eléctrica do fluido no interior da sondagem. Em muitos casos, a qualidade química do fluido na coluna, e como tal, a sua condutividade eléctrica, pode não reflectir a qualidade do fluido intersticial, mas no entanto a informação obtida poderá ser útil, quando combinada com outras diagrfias (Keys, 1990). É o caso de sondagens realizadas com circulação de lamas bentónicas, em que a diagrfia da Condutividade de Fluido reflecte o valor de R_{mf} ao longo da coluna de fluido. Em formações compactas contendo água nativa na coluna de fluido, a diagrfia da Condutividade do Fluido dá a variação em profundidade da sua condutividade eléctrica, que por sua vez pode ser relacionada com as variações da mineralização total da água ou com o Total de Sólidos Dissolvidos (TSD) na coluna de fluido segundo a eq. (2.8) (Custodio e Llamas, 1996):

$$\text{Condutividade da água } (\mu\text{S/cm}) = 1,35 \text{ TSD} \quad (2.8)$$

É o caso do exemplo da Fig. 2.15, em que um conjunto de diagrfias realizado numa sondagem preenchida com água nativa em formações compactas do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 2000e) e composto por diagrfias nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da Coluna de Fluido (Condutividade do Fluido, Fluxo e Gradiente Geotérmico) dá, além destas, indicações adicionais acerca da presença de fracturas na sondagem e da respectiva produtividade.

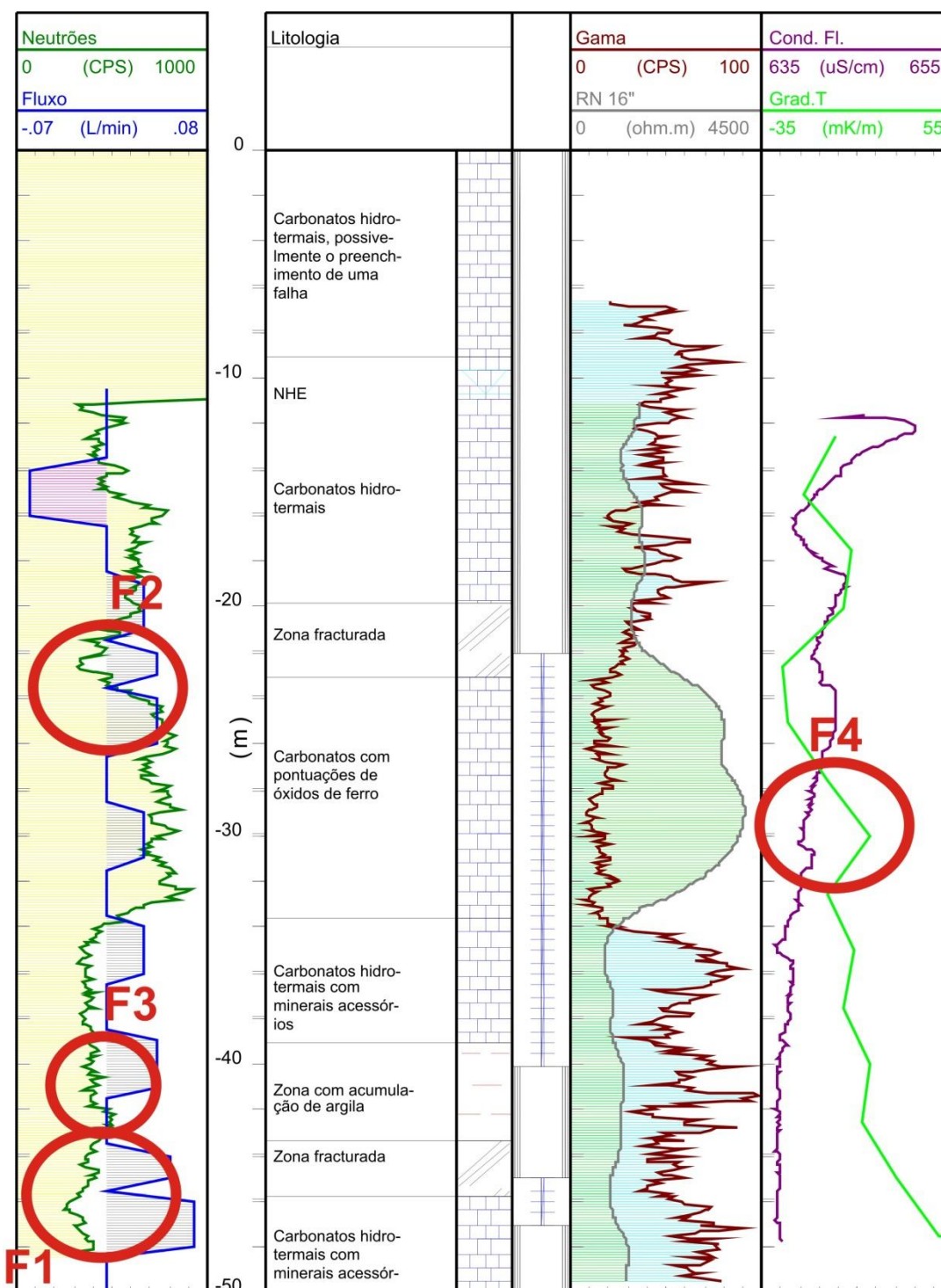


Fig. 2.15 – Diagrafias eléctricas (RN 16"), nucleares (Neutrões e Radiação Gama Natural) e da coluna de fluido (Fluxo, Condutividade do Fluido e Gradiente Geotérmico) numa sondagem localizada no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 2000e).

Aqui, destaca-se o aumento da resistividade eléctrica das formações carbonatadas entre os 23 e os 34 m simultâneo com a diminuição dos valores de radiação gama natural e aumento dos valores de neutrões, indicadores da presença de formações menos alteradas. As zonas fracturadas detectam-se a partir de uma irregularidade acentuada dos valores de neutrões e radiação gama natural entre os 42 e os 45 m (F1). Ao mesmo tempo, tal como foi referido anteriormente, destacam-se as variações

simultâneas da diagrfia de Fluxo e da diagrfia da Condutividade Eléctrica do Fluido, nomeadamente com um influxo de água de temperatura superior e ligeiramente menor condutividade eléctrica entre os 20 e os 23 m (F2). Na zona fracturada que se localiza aos 43 m (F3), o influxo de água é de maior temperatura, mas de mais baixa condutividade eléctrica – menos mineralizado. Uma dessas zonas de fractura, aos 26 m (F4), traduz-se num influxo para o interior da sondagem com caudal natural ascendente de 0,06 l/min, condutividade eléctrica da ordem dos 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e temperatura inferior, como se pode observar a partir das diagrfias da Condutividade do Fluido e do Gradiente Geotérmico.

2.6.5.2. Aplicação da diagrfia do Potencial Espontâneo (SP)

Tendo apenas o registo de boas diagrfias do SP é possível calcular a resistividade da água de formação (R_w), que por sua vez permite estimar a salinidade equivalente e a partir daí a qualidade química da água (Chappelier, 1992). A interpretação desta diagrfia em águas doces não é fácil de efectuar, pois a natureza dos potenciais eléctricos registados depende, em grande parte, da qualidade da água ou da lama que se tenha usado na perfuração (Keys, 1990; Ramalho et al., 2009). Apesar do SP reflectir principalmente potenciais de contacto desenvolvidos entre camadas de argila e aquíferos arenosos quando postos em contacto nas operações de perfuração (Keys, 1990), a que correspondem os pontos de inflexão das respectivas curvas, estas dependem, no entanto, essencialmente da diferença de salinidades entre os fluidos em contacto.

Assim, a interpretação quantitativa do SP em Hidrogeologia baseia-se em três pressupostos (Chappelier, 1992): (i) que a água da formação e a lama de perfuração são ambas soluções de NaCl; (ii) que na zona em questão, as formações estão limpas, o que significa que a areia não tem qualquer teor de argila e as formações argilosas são verdadeiras camadas de argila; (iii) que a resistividade do filtrado da lama R_{mf} é superior à resistividade da água de formação R_w (o que nem sempre é verdade, porque a água de formação pode ter uma resistividade eléctrica superior ao filtrado da lama, invertendo o SP e dificultando o cálculo do R_w).

Assim, considerando que a amplitude da deflexão aumenta com o aumento do contraste das salinidades, podem ocorrer 3 situações. Quando a água de formação é mais salina do que o filtrado da lama, $R_{mf} > R_w$, a curva do SP é normal (o positivo está do lado oposto às argilas e a deflexão para o negativo mostra a presença de uma formação porosa e permeável). Quando acontece o oposto, $R_{mf} < R_w$ e o SP é invertido. Quando ambas as resistividades estão muito próximas, o SP chama-se *flat* e a diagrfia não mostra uma diferença nítida entre as argilas e as camadas porosas e permeáveis, dificultando a interpretação.

Nesta diagrfia, a posição zero é escolhida pelo técnico, uma vez que as medidas são sempre interpretadas com valores relativos (mV), com a deflexão positiva para a direita e a deflexão negativa para a esquerda. As formações argilosas ou margosas atravessadas por uma sondagem mecânica têm praticamente o mesmo potencial natural, podendo definir-se uma linha de base. É a partir desta denominada a Linha de Base das Argilas (LBA) que se considera o potencial zero e se determina o potencial

espontâneo em formações permeáveis, podendo esta sofrer desvios ao longo da diagrafia, que por vezes dificultam a sua interpretação. Estas variações na LBA podem ser causadas por variações no contacto do eléctrodo de referência à superfície (o “peixe”) e heterogeneidade da lama da perfuração ao longo da coluna de fluido. Um desvio na LBA pode também ser muitas vezes atribuído a variações geológicas. Geralmente, no entanto, corresponde a variações de salinidade no electrólito das rochas saturadas, e, por vezes, a alterações nas propriedades das argilas. Sem a definição da LBA, a interpretação de diagrfias de SP em formações sedimentares é muito mais difícil. Quando $R_{mf} > R_w$, as diagrfias de SP atravessam camadas com características de elevada porosidade e permeabilidade, a curva deflecte para a esquerda, e, se estas camadas forem espessas o suficiente, a LBA pode ser desenhada (Chappelier, 1990). O SP pode ser calculado com o recurso à seguinte expressão:

$$\text{deflexão SP (mV)} = -K \log \frac{R_{mfe}}{R_{we}} \quad (2.9)$$

onde R_{mfe} é a resistividade eléctrica equivalente do filtrado, isto é, a resistividade eléctrica que terá o filtrado quando a totalidade dos sais nele dissolvidos for substituída por uma concentração equivalente de NaCl; R_{we} é a resistividade eléctrica equivalente da água de formação e K é a constante electroquímica dependente da temperatura (Ramalho et al., 2009). No entanto, a forma e amplitude das deflexões do SP podem ser influenciadas por outros factores além da concentração iónica que faz variar a resistividade eléctrica da água. São eles a espessura das camadas permeáveis, a resistividade das formações, a existência de argilas, desvios à LBA devido a factores externos, permeabilidade das camadas e a existência de minerais condutores (Chappelier, 1992). A presença de argila numa formação reservatório reduz a amplitude da sua deflexão em função linear da sua percentagem na rocha.

Independentemente dos vários tipos de argilas que possam estar presentes, os componentes minerais das rochas não têm, na maior parte das vezes, qualquer influência directa nas deflexões de SP. Contudo, alguns condutores, em especial sulfuretos metálicos e grafite, podem causar uma anomalia de SP negativa considerável. O mesmo acontece com alguns carvões que causam deflexões para a direita, semelhantes àquelas que ocorrem em reservatórios arenosos com água de boa qualidade química, dificultando a interpretação da diagrafia do SP.

Mesmo assim, uma boa diagrafia de SP pode ser utilizada para calcular a resistividade da água nativa, R_w . De facto, uma vez que a deflexão é proporcional aos valores de R_{mfe} e R_{we} :

$$\text{deflexão SP (mV)} = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (2.10)$$

A explicação detalhada do modo como a interpretação das diagrfias de SP encontra-se em Chappelier (1992) e Ramalho et al. (2009) e a sua aplicação a casos-estudo portugueses encontra-se descrita em Ramalho et al. (2009). O modo de interpretar diagrfias de SP com o recurso à eq. (2.10) para a estimativa da qualidade química da água nativa é igualmente referido em Ramalho et al. (2009) através do estudo da

sondagem da Fig. 2.16. Nesta sondagem, localizada no sector Murtosa-Torreira do sistema aquífero multicamada do Cretácico de Aveiro, foi apenas utilizada a sonda mais simples e financeiramente acessível existente no mercado, que mede o SP, SPR e a radiação gama natural.

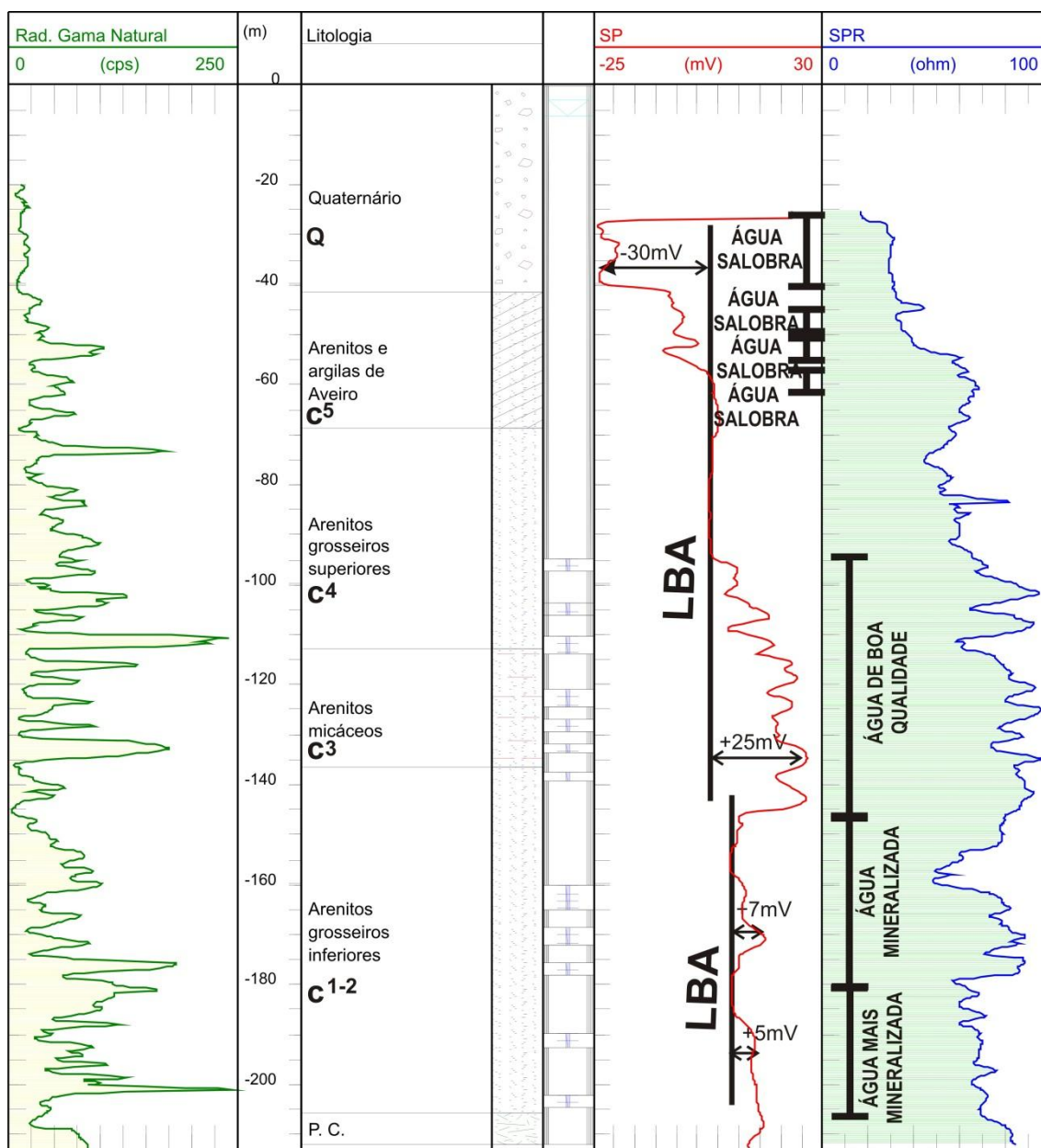


Fig. 2.16 – Coluna litológica, diagrfias de Radiação Gama Natural, SP e SPR de uma sondagem mecânica localizada no sector Murtosa-Torreira do Sistema Aquífero Cretácico de Aveiro, correlacionando a forma das curvas e os valores de SP com as características da água nativa (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

No entanto, e porque nesta sondagem a diagrfia do SP é de boa qualidade, foi possível estimar a partir desta a qualidade química da água nativa para os vários troços identificados como permeáveis a partir das diagrfias de radiação gama natural e SPR (Ramalho et al., 2009).

A definição da LBA na curva do SP e a análise da variação da resistência das formações na diagrfia do SPR e dos picos de radiação gama natural tornou possível

definir os 3 troços permeáveis do Cretácico produtivo de Aveiro. A aplicação a estes da eq. (2.10) permitiu por sua vez ter uma ideia da qualidade da água de cada um deles através da estimativa da condutividade eléctrica do fluido em função da temperatura a partir do ábaco da Fig. 2.14. Considerando a água das formações como uma solução de NaCl e através dos factores de Dunlap (Tabela 2.4) foi possível estimar uma possível composição química para a água nativa de cada um dos troços permeáveis e assim definir um posicionamento mais adequado para a colocação dos tubos-ralos.

A Tabela 2.5 mostra os valores de NaCl equivalente obtidos para os 3 troços permeáveis referidos. Se os tubos-ralos tivessem sido apenas colocados entre os 95 e os 145 m seria expectável que a sondagem produzisse água com melhor qualidade química do que aquela que foi obtida, pelo que como consequência desta análise, a sondagem foi cimentada a partir dos 150 m.

Tabela 2.5 – Determinação do NaCl equivalente dos 3 troços permeáveis individualizados do Sistema Aquífero multicamada do Cretácico de Aveiro com o recurso à eq. (2.10) e ao ábaco da Fig. 2.14 (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

1º troço permeável (98-147 m)	2º troço permeável (161-179 m)	3º troço permeável (184-208 m)
Deflexão da curva SP = +25 mV R _w = 25,65 ohm.m 240 ppm NaCl equivalente	Deflexão da curva SP = +7 mV R _w = 13,94 ohm.m 440 ppm NaCl equivalente	Deflexão da curva SP = +5 mV R _w = 13,02 ohm.m 490 ppm NaCl equivalente

A comprovar este facto, têm-se os valores da concentração dos principais aniões e catiões e da concentração em NaCl equivalente calculados para a análise química de uma sondagem mecânica situada nas proximidades da sondagem anterior (Tabela 2.6), cuja concentração em NaCl equivalente da zona dos tubos-ralos equivalente ao 1º troço permeável é notavelmente semelhante à sondagem da Fig. 2.16 e aos valores correspondentes ao 1º troço permeável da sondagem da Tabela 2.5.

Tabela 2.6 – Análise química da água proveniente do 1º troço permeável da zona dos tubos-ralos recolhida numa sondagem situada nas proximidades da sondagem da Fig. 2.16, factores de Dunlap e NaCl equivalente (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

Ião	Concentração (mg/l)	Factor de Dunlap	NaCl equivalente (mg/l)
Cl ⁻	93,2	1,00	92,3
HCO ₃ ⁻	102,5	0,27	27,68
SO ₄ ²⁻	36,2	0,50	18,1
Na ⁺	92,2	1,00	92,2
K ⁺	8,8	0,85	7,48
Ca ²⁺	5,2	0,95	4,94
Mg ²⁺	6,6	2,00	13,2
			255,90

2.6.5.3. Aplicação de diagrfias de Resistividade Normal e Lateral

Com a possibilidade de se utilizarem sondas tecnologicamente mais avançadas, medindo simultaneamente a resistividade eléctrica a diferentes profundidades de penetração que permitem interpretações quantitativas, utilizam-se as sondas de resistividade normal (RN) e lateral (RL). Estas consistem em instrumentos

multielectródicos que permitem calcular a resistividade da formação atravessada pela sondagem, e a partir da aplicação da Lei de Archie (eq. 2.1) podem muitas vezes ser estimadas a diagrfia da Porosidade total e da Permeabilidade. Caso exista a possibilidade de serem feitas, estas diagrfias são muito úteis, podendo ter uma boa definição vertical e indicando por isso com bastante precisão a espessura das camadas.

Em Hidrogeologia, tanto na interpretação dos dados das sondas de RN como RL são utilizados diferentes espaçamentos de eléctrodos de corrente e de potencial, de acordo com a informação que se pretende obter (Chappelier, 1992). Tendo em conta que estes determinam a profundidade de investigação, esta vai obviamente depender do diâmetro da sondagem e das características das formações geológicas. Quando se realizam medidas de RN e RL, tanto o diâmetro da sondagem como o modo da resistividade eléctrica variar nas várias zonas que a limitam deverão sempre considerados (Figs. 2.5 e 2.17) na interpretação dos resultados.

As sondas de RL são projectadas para dar informações sobre R_t e as de RN para dar informações sobre R_t e R_{xo} . Estes valores são afectados também pela resistividade eléctrica da lama (R_m). As sondas de RL são especialmente eficazes quando utilizadas em formações resistivas (Chappelier, 1992) e para sondagens de grande diâmetro, é desejável a existência de uma diagrfia de RL para a obtenção de R_t .

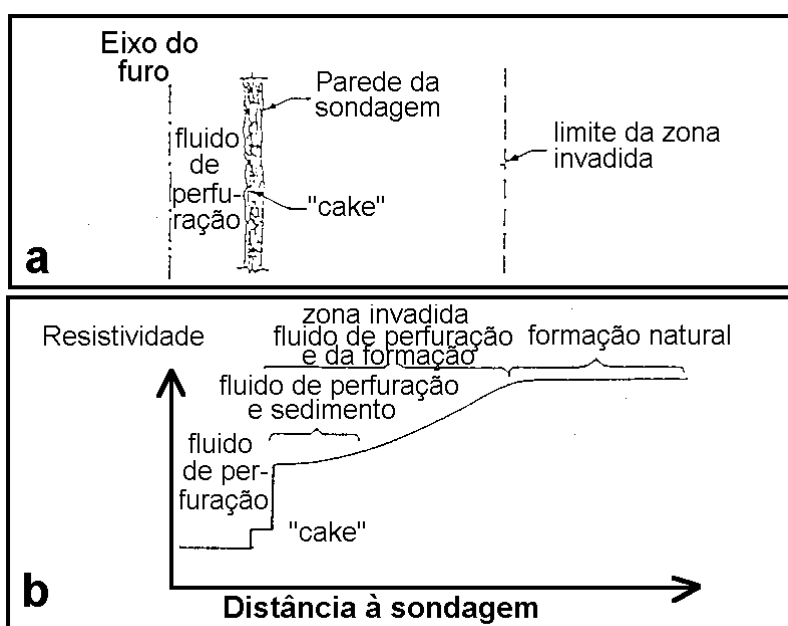


Fig. 2.17 – Variação da resistividade eléctrica com a distância ao eixo da sondagem: a) Na zona invadida próxima à sondagem, a água de formação é substituída pelo filtrado do fluido de perfuração (as partes sólidas da lama formam o *cake*). O filtrado diminui progressivamente até que a resistividade se estabiliza na zona não invadida. b) Perfil de resistividade esquemático das condições presentes em a) (adaptado de Beck, 1981, in Ramalho et al., 2009).

Em geral, a diagrfia de RN regista uma resistividade aparente, diferente da resistividade da formação, que é função da espessura da camada e da sua resistividade, espaçamento dos eléctrodos, diâmetro da sondagem, resistividade da lama e espessura da zona invadida. O modo como as correcções são feitas encontra-se explicado em detalhe em Chappelier (1992); porém, em geral, estas correcções não

são feitas por rotina, acabando por se encarar os resultados obtidos como boas aproximações. No entanto, considera-se real a resistividade obtida com a sonda de RL.

O modo de estimar a qualidade química da água nativa na presença de formações arenosas limpas em aquíferos multicamada numa sondagem com lama bentonítica de baixa mineralização através da interpretação quantitativa de diagrfias de RN16” e RN64” é explicado em detalhe em Ramalho et al. (2009) numa sondagem localizada na Gafanha da Nazaré, no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro (Fig. 2.18).

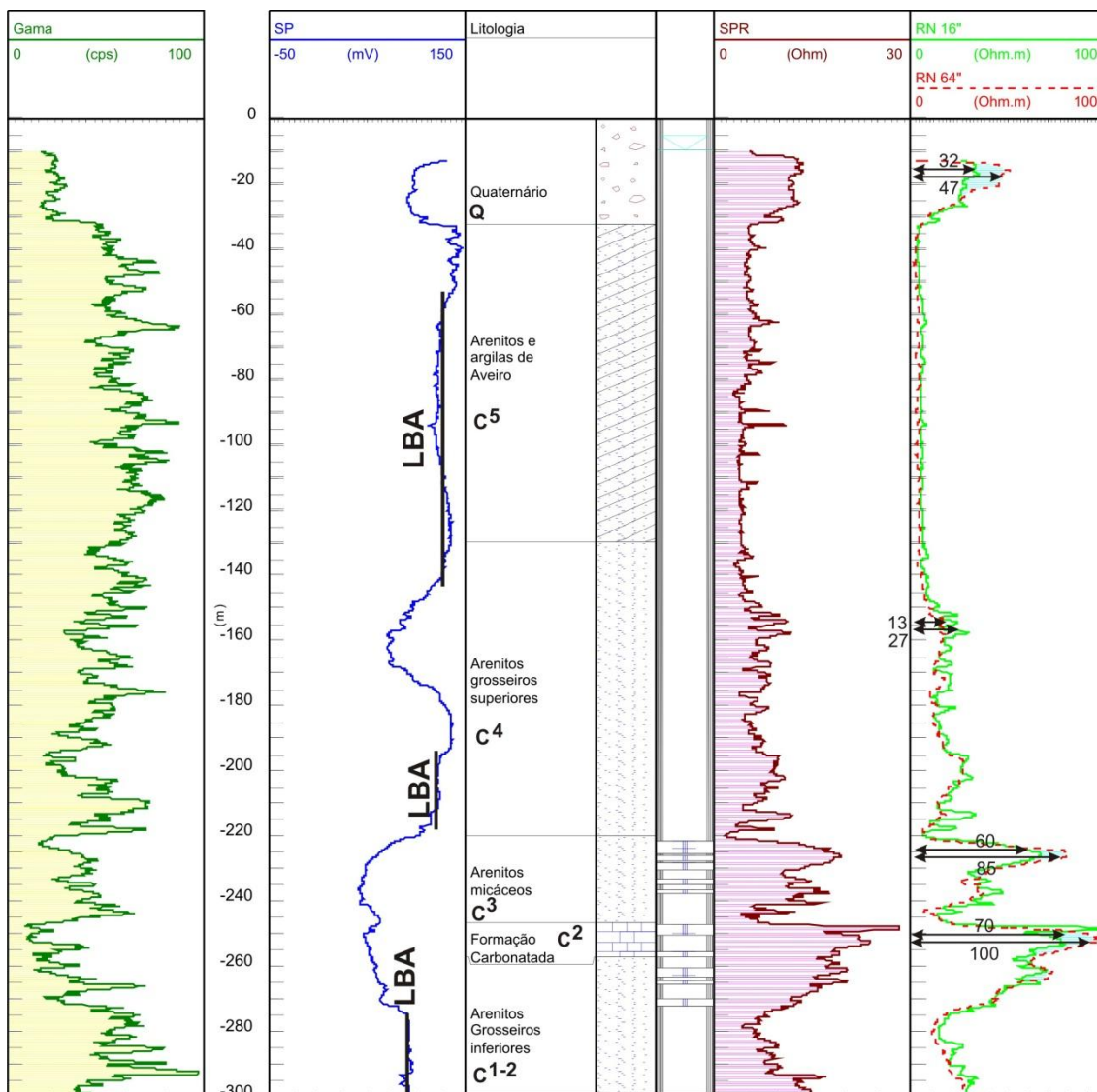


Fig. 2.18 – Diagrfias eléctricas (SP, SPR, RN 16” e RN 64”) e nucleares (Radiação Gama Natural), utilizadas na estimativa da qualidade da água nativa dos troços permeáveis numa sondagem localizada na Gafanha da Nazaré, no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro (adaptado de Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

Para cada um dos troços permeáveis definidos previamente pelas diagrfias eléctricas (SP, SPR, RN16” e RN64”) aos 15, 155, 225 e 252 m, foi estimada a concentração em NaCl equivalente a partir da resistividade da água R_w , partindo do princípio que R_{xo} correspondia a RN16”, R_t correspondia a RN64” e recorrendo às eqs. (2.1) e ao ábaco

da Fig. 2.14 (Tabela 2.7). Uma vez que o valor obtido para a concentração em NaCl equivalente é um bom indicador da qualidade química da água, apenas o troço dos 155 m apresenta neste caso uma condutividade eléctrica característica das águas mediamente mineralizadas, pelo que não foi seleccionado para colocação de tubo-ralo, tal como se pode ver na Fig. 2.18.

Tabela 2.7 – Estimativa de NaCl equivalente para uma lama bentonítica de temperatura de 28 °C, utilizando valores obtidos em 4 profundidades distintas nas diagrfias de RN16” e RN64” (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

Profundidade (m)	R_t (ohm.m)	R_{xo} (ohm.m)	$R_w = \frac{R_t \times R_{mf}}{R_{xo}}$ (ohm.m)	NaCl equivalente (mg/l)
15	47	32	36,7	125
155	13	27	12,04	≅400
225	85	60	35,42	130
252	100	70	3,5	120

Pelas suas características e localização em profundidade que lhes confere menor vulnerabilidade à poluição, os tubos-ralos da presente sondagem localizaram-se nos dois troços inferiores, aos 225 m e aos 252 m, respectivamente com 130 mg/l e 120 mg/l de NaCl equivalente. Os valores obtidos confirmam a baixa mineralização das águas do Cretácico produtivo, ainda que o conteúdo equivalente em NaCl calculado possa ser inferior ao que têm as respectivas águas neste sector (Marques da Silva, 1990).

Um dos erros provém da temperatura da lama bentonítica utilizada nos cálculos, que foi de 28 °C. Efectivamente, nesta zona, a temperatura das águas do Cretácico oscila geralmente entre os 23 °C e os 25 °C. Valores de temperatura inferiores conduziriam, pois, a valores mais elevados da mineralização estimada, mais próximos portanto da realidade local.

A interpretação dos dados da sonda de RL segue metodologia idêntica, pelo que quando esta diagrfia existir, dever-se-ão considerar os valores registados correspondendo a R_t , devido à sua maior profundidade de investigação. Exemplos de aplicação da sonda de RL podem ser encontrados em Marques da Silva (1990), Marques da Silva et al. (2000) ou Ramalho et al. (2009).

2.6.6. Estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos

Uma grande vantagem que as diagrfias têm em relação aos ensaios de caudal normais para a estimativa de parâmetros hidráulicos dos aquíferos é que permitem uma análise ao longo de toda a sondagem e não apenas da sondagem na sua totalidade. Além disso, torna por vezes desnecessária a utilização de *packers*. Por outro lado, têm como vantagem relativamente à geofísica de superfície o facto de, em condições favoráveis (sondagem em *open-hole* e/ou um conjunto apreciável de diagrfias que estudem uma diversidade significativa de parâmetros), se poderem obter informações acerca de troços específicos e individuais a profundidades bem determinadas. Desta forma, se existirem dados de ambas as proveniências – diagrfias e geofísica de superfície – é possível um conhecimento da variação espacial

e em profundidade dos parâmetros comuns. São vários os parâmetros hidráulicos de aquíferos passíveis de inferir a partir da análise de diagrfias, consoante as condições físicas da sondagem, o tipo de informação e as diagrfias disponíveis. Assim, a partir de um conjunto de diagrfias, que poderão ser da coluna de fluido (Fluxo), eléctricas (RNs ou RL), nucleares (Neutrões) ou Acústicas, poder-se-ão obter informações acerca de caudais, produtividades, porosidades, permeabilidades ou saturação em água a profundidades bem definidas. No entanto, as condições de utilização destas diagrfias são diferentes e o modo de obtenção dos parâmetros também. É preciso ter ainda ter em consideração que a informação acessória das restantes diagrfias (Radiação Gama Natural, por exemplo) é fundamental para a interpretação.

2.6.6.1. Aplicação de diagrfias de Fluxo

A análise de diagrfias de Fluxo para a estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos recorre à informação parcelar acerca dos caudais obtidos nos troços permeáveis ou com tubo-ralo para compreender o modo como cada um deles contribui para o resultado final da captação no seu todo.

A partir das indicações dadas por uma diagrfia de Fluxo, tanto com o sistema de micromolinete como com o sistema de impulso de calor, é possível obter uma estimativa do caudal em troços seleccionados, desde de que os dados obtidos sejam calibrados. Esta estimativa é muito importante, na medida em que se obtêm valores relativos aos caudais que entram e/ou saem da sondagem em fracturas bem localizadas por outras diagrfias ou camadas aquíferas e é feita de acordo com a própria definição de caudal, *i.e.*:

$$Q = V \times S \quad (2.11)$$

em que Q é o caudal (m^3/s), V é a velocidade do fluxo estimada a partir de dados das sondas de fluxo (m/s) e S é a secção atravessada pelo fluido (m^2), calculada por

$$S = \pi R^2 \quad (2.12)$$

em que R é o raio da sondagem (m).

No entanto, é necessário não esquecer que a informação utilizada na eq. (2.11) é obtida de modo diferente consoante a sonda de fluxo que é utilizada. Tal como já foi referido anteriormente, a sonda de micromolinete é utilizada preferencialmente aquando da realização de um ensaio de bombagem (a menos que exista artesianismo na sondagem estudada). Por outro lado, a sonda de impulso de calor mede os fluxos naturais existentes na coluna de fluido ou é utilizada após um ensaio de bombagem, para o reconhecimento de fracturas de baixa permeabilidade, estimuladas por bombagem, que produzem fluxos extremamente pequenos, mas perceptíveis.

A captação de água muito mineralizada numa sondagem localizada no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro e a importância em saber qual o papel de cada um dos tubos-ralos e respectiva contribuição para a captação no seu todo

levou a que fossem feitos registos simultâneos de salinometria e de fluxo com o sistema de micromolinete (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009) (Fig. 2.19).

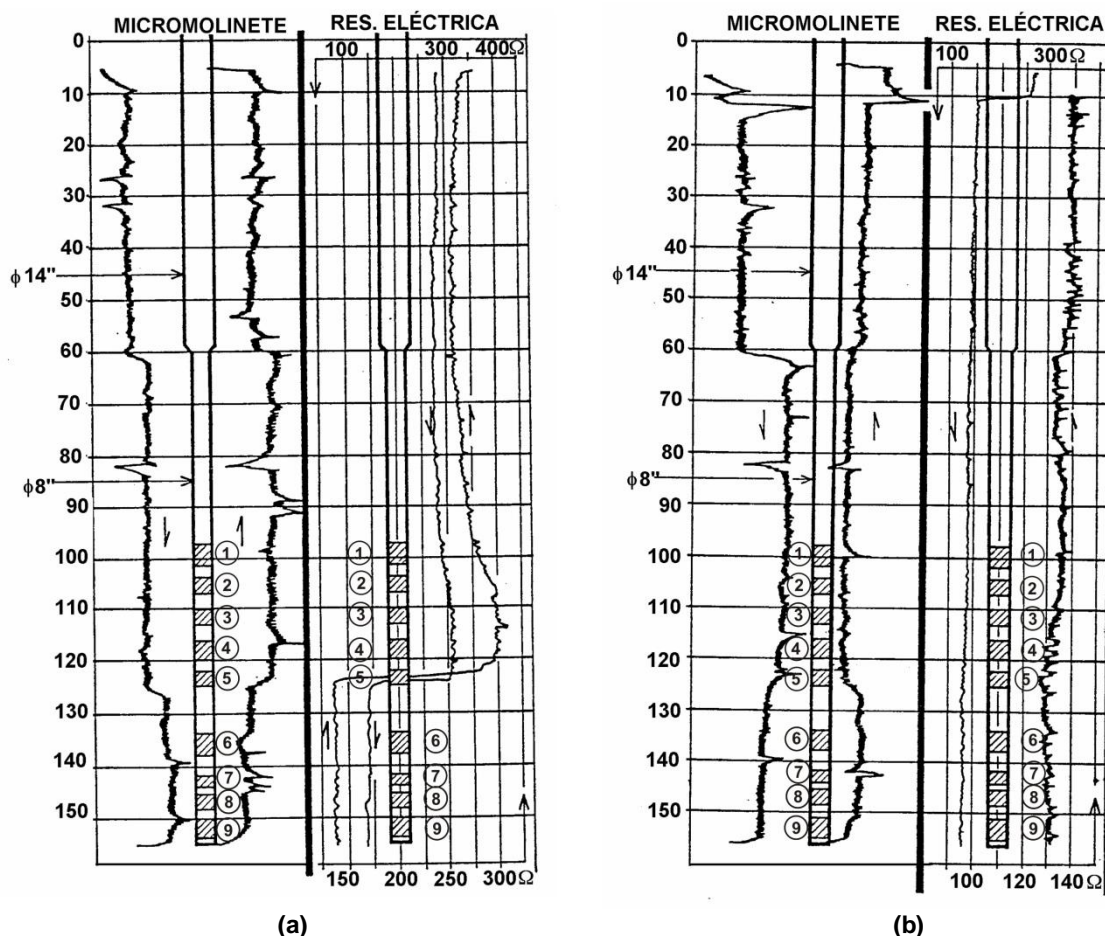


Fig. 2.19 – Registos de salinometria e das diagrfias de fluxo em repouso (a) e em bombagem (b) (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009) realizados numa sondagem localizada no Sistema Aquífero Multicamada do Cretácico de Aveiro.

Estes registos foram efectuados com a sondagem em repouso e em bombagem para proceder a uma cimentação tecnicamente sustentada de parte da captação, de forma a melhorar a qualidade da água captada. Não havendo, como no caso presente, diferenças significativas entre os vários níveis piezométricos estáticos das camadas aquíferas, quando a sondagem é sujeita a rebaixamentos apreciáveis, as camadas mais transmissivas contribuem com mais água do que as menos transmissivas para o caudal da captação explorado e para a composição química final da água captada.

A observação da Tabela 2.8 permite constatar que, com a sondagem da Fig. 2.19 em repouso, há circulação de água no interior da mesma, uma vez que o troço 9 de tubo-ralo (o mais profundo) proporciona a entrada de um caudal de 0,719 l/s. No entanto, parte desta água é absorvida pelo troço 6 (0,260 l/s) e o troço 5 absorve a restante água (0,459 l/s). Esta transferência de água é devida à diferença de níveis piezométricos entre as várias camadas aquíferas, servindo a própria sondagem como meio hidráulico de circulação.

Tabela 2.8 – Valores obtidos para a velocidade da água e respectivos caudais em cada troço de tubo-ralo, com a sondagem em repouso (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

Troço de tubo-ralo	Prof. do tubo-ralo (m)	Velocidade da água (m/min)			Caudal (l/s)	Variação do caudal (l/s)
		Registo na descida.	Registo na subida.	Média		
1	97	0	0	0	0	0
2	104	0	0	0	0	0
3	110	0	0	0	0	0
4	116	0	0	0	0	0
5	122	0	0	0	0	-0,459
6	134	0,84	0,86	0,85	0,459	-0,260
7	142	1,32	1,34	1,33	0,719	0
8	146	1,32	1,34	1,33	0,719	0
9	151	1,32	1,34	1,33	0,719	+0,719
					Soma	0,000 l/s

Bombando com um caudal diminuto (1,3 l/s), as diferentes camadas contribuem com caudais parciais segundo as suas próprias características hidráulicas e o rebaixamento efectivo que as solicita. Como se pode ver através da Tabela 2.9, alguns troços de tubo-ralo (2, 3 e 8) praticamente não contribuem para o caudal bombado (que é muito pequeno).

Tabela 2.9 – Valores obtidos para a velocidade da água e respectivos caudais em cada troço de tubo-ralo, com a sondagem em bombagem com Q=1,3 l/s (Marques da Silva, 1990; Ramalho et al., 2009).

Troço de tubo-ralo	Prof. do tubo-ralo (m)	Velocidade da água (m/min)			Caudal (l/s)	Variação do caudal (l/s)
		Diag. Desc.	Diag. Asc.	Média		
1	97	2,405	2,405	2,405	1,300	+0,065
2	104	2,270	2,300	2,285	1,235	0
3	110	2,270	2,300	2,285	1,235	0
4	116	2,270	2,300	2,285	1,235	+0,130
5	122	2,042	2,046	2,044	1,105	+0,390
6	134	1,320	1,326	1,323	0,715	+0,114
7	142	1,110	1,114	1,112	0,601	+0,049
8	146	1,014	1,030	1,022	0,552	0
9	151	1,014	1,030	1,022	0,552	+0,552
					Soma	1,300 l/s

As conclusões obtidas pela interpretação destas diagrfias levaram à decisão de cimentar a parte da sondagem abaixo dos 130 metros de profundidade, neutralizando-se os quatro troços de tubo-ralo mais profundos e que exploravam as camadas com águas mais mineralizadas (Fig. 2.19, diagrfia de Salinometria com a sondagem em repouso). A água obtida em ensaios posteriores à cimentação apresentava teores em cloretos com valores abaixo de 130 mg/l. Alguns meses após a exploração contínua desta captação a concentração em cloretos desceu mesmo abaixo de 70 mg/l.

2.6.6.2. Aplicação da Lei de Archie

A estimativa de parâmetros hidráulicos dos aquíferos com o recurso à Lei de Archie baseia-se uma vez mais nos dados das resistividades eléctricas obtidos com várias profundidades de investigação com sondas de resistividade multielectrónica e no modo como estas variam de acordo com as Figs. 2.5 e 2.17. No caso das formações se encontrarem livres de argila, a Lei de Archie pode ser aplicada directamente

através das eqs. (2.1). Caso contrário, ter-se-á que aplicar a abordagem de Khalil et al. (2011), que se encontra descrita das eqs. (2.3) à (2.7).

Ambas as situações foram abordadas em duas sondagens mecânicas realizadas na zona do Ludo do Sistema Aquífero da Campina de Faro, fundamentalmente constituído pelas Areias e Cascalheiras de Faro-Quarteira (areias feldspáticas e arenitos grosseiros, argilosos do Quaternário, passando a cascalheiras e conglomerados) com uma espessura máxima de 30 m (SNIRH, 2012). A definição da estrutura geológica da região foi realizada por Roseiro (2009) e resultou de uma análise de descrições dos *logs* litológicos de sondagens e de piezómetros. Esta opção mostra a importância da certeza da realização de diagrfias tecnicamente rigorosas. Foram também incluídos nessa análise os resultados de algumas SEVs realizadas na área de estudo (Mota, 2006), que revelaram valores de resistividade eléctrica homogéneos em profundidade a variar entre 20 e 190 ohm.m.

Pela visualização das diagrfias de uma sondagem no Vale do Ludo (Fig. 2.20), distinguem-se dois aquíferos distintos, um superficial e outro mais profundo. Uma análise mais detalhada do *log* litológico e das diagrfias permite concluir que existe uma discrepância de profundidades entre a descrição litológica e as diagrfias. Esta discrepância foi detectada logo aquando do entubamento da sondagem, pois a selecção dos troços para a colocação de tubos-ralo teve em conta a interpretação das diagrfias e não o *log* litológico. A LBA, na curva do SP, tem uma deriva significativa ao longo da sondagem, podendo significar que as águas das formações, de diferentes salinidades, são separadas por camadas argilosas que não são uma membrana de troca catiónica perfeita (Schlumberger, 1972). Pelos baixos valores de radiação gama natural registados às mesmas profundidades dos picos de SPR, assume-se que os troços permeáveis estão limpos de argilas e como tal, a Lei de Archie é válida.

Assim, seleccionaram-se os troços de tubo-ralo onde foi estimada a porosidade com o recurso à Lei de Archie. Através das eqs. (2.1), estimou-se o valor de F e também a respectiva R_w . Em posse desses valores, e recorrendo à tabela de Shon (1996) para os valores médios de a e m , é feita uma estimativa da porosidade total das formações permeáveis.

No caso da sondagem da Fig. 2.20, a lama de perfuração foi preparada com um baixo conteúdo em cloretos e R_{mf} é semelhante a R_w , no caso dos troços permeáveis com tubos-ralo (Tabela 2.10). Nesta sondagem o SP encontra-se invertido, o que significa que no caso das formações superficiais com água com maior condutividade eléctrica, as deflexões de SP têm valores positivos. Neste caso, e como é visível, as camadas permeáveis com tubos-ralo têm apenas ligeiras deflexões negativas relativamente a uma LBA com deriva acentuada.

Apesar do tempo que mediou entre a última circulação das lamas e a realização das diagrfias ter sido nestas circunstâncias forçosamente muito curto, admitiu-se que a temperatura da coluna de fluido apresentasse tendência para o equilíbrio com a temperatura das formações, aumentando assim ligeiramente em profundidade. Assim, atribuindo um gradiente geotérmico médio para a zona de 22 °C/km (Ramalho e Correia, 1998), considerou-se para efeito de estimativas, que a temperatura numa sondagem aumente cerca de 2 °C a partir dos 100 m. Como tal, admitiu-se a

existência em profundidade de um aumento da temperatura da lama bentonítica, e consequentemente, da diminuição da condutividade eléctrica da mesma.

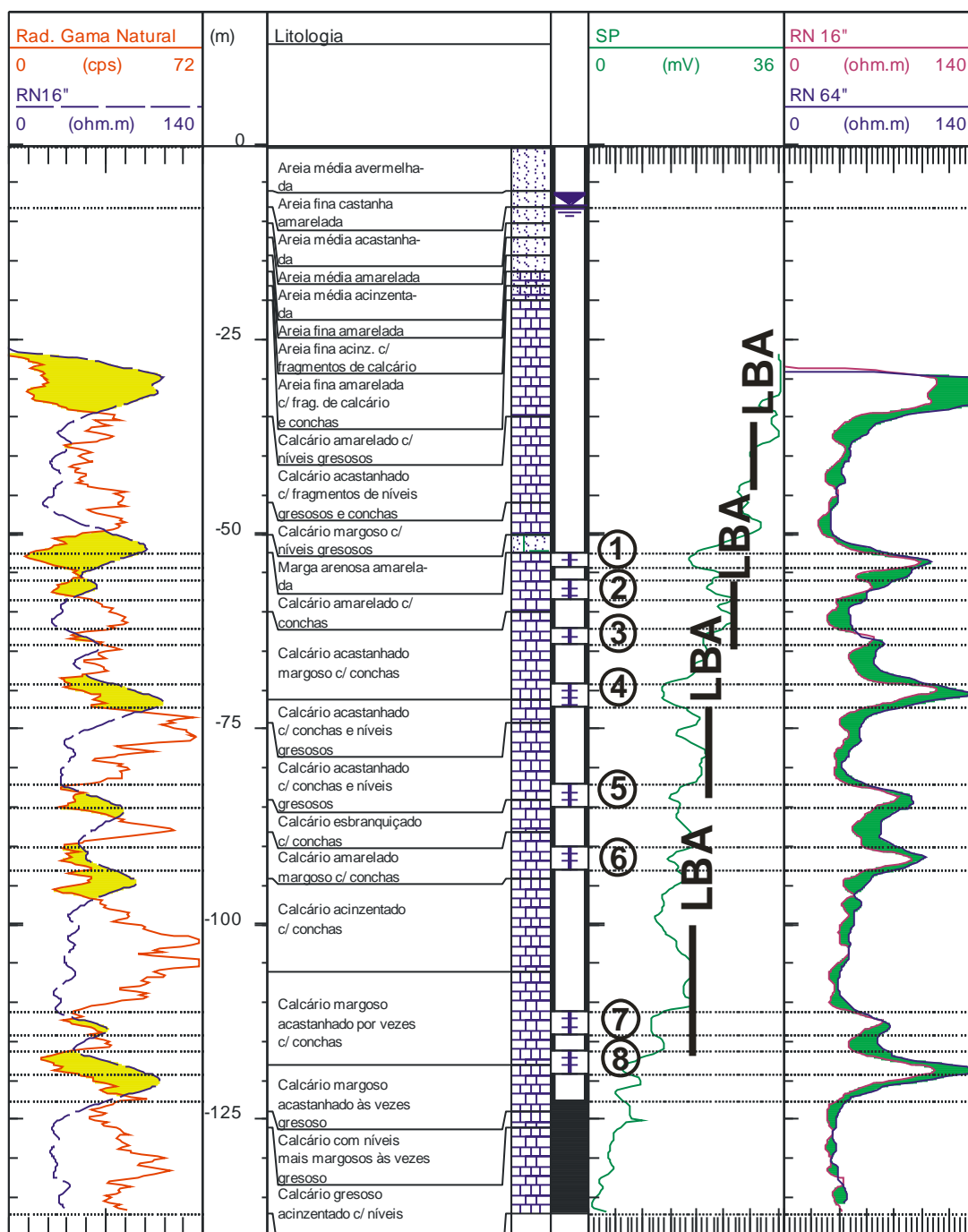


Fig. 2.20 – Diagramas de SP, Radiação Gama Natural, RN16" e RN64" de uma sondagem no Vale do Ludo localizada no Sistema Aquífero da Campina de Faro. Salientam-se as zonas amarelas, que correspondem aos troços permeáveis (zonas simultaneamente com baixa radiação gama natural, indicadores da baixa presença de argilas e resistividade eléctrica elevada, indicadores da presença de zonas arenosas) e onde foram colocados tubos-ralo, aquando do entubamento da sondagem.

Na estimativa da porosidade recorreu-se ao valor de R_{mf} determinado a partir do conteúdo em Cl⁻ da lama bentonítica. A partir deste, estimou-se igualmente o conteúdo em NaCl equivalente da mesma e a R_w a partir do ábaco da Fig. 2.14. Partindo desse pressuposto, para o primeiro troço de tubo-ralo (52-54 m) faz-se uma estimativa da

R_{mf} , para 22 °C, através da figura, considerando 150 mg/l de $Cl^- \cong 247$ mg/l NaCl, obtendo-se cerca de 20 ohm.m. De acordo com as relações das eqs. (2.1), uma estimativa para a R_w neste troço é de 21,4 ohm.m, que equivale a uma condutividade eléctrica da água (σ_w) de 467 $\mu S/cm$ (a 22 °C).

Seguindo metodologia idêntica, a Tabela 2.10 mostra os parâmetros estimados pela Lei de Archie para as restantes zonas permeáveis com tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.20.

Tabela 2.10 – Parâmetros estimados pela aplicação directa da Lei de Archie para as zonas permeáveis com tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.20 com o recurso às eqs. (2.1) e ao ábaco da Fig. 2.14.

Mineralização total da água captada = 445,2 mg/l

Condutividade eléctrica a 25 °C da água captada = 545 $\mu S/cm$

Cl^- filtrado da lama = 150mg/l \Rightarrow 247 mg/l NaCl equivalente $\Leftrightarrow R_{mf}$ inicial = 20 ohm.m

Tubo-ralo	Profundidade (m)	R_t (RN 64") (ohm.m)	R_{xo} (RN16") (ohm.m)	T (°C)	R_{mf} (ohm.m)	F	R_w (ohm.m)	σ_w ($\mu S/cm$)	a	m	ϕ
1	52,0-54,0	107	100	22	20	5,00	21,40	467	0,88	1,37	0,28
2	56,0-58,0	70	64	22	20	3,20	21,88	457	0,88	1,37	0,39
3	62,5-64,5	72	66	22	20	3,30	21,82	458	0,88	1,37	0,38
4	69,0-72,0	135	111	22	20	5,55	24,32	411	0,88	1,37	0,26
5	82,0-85,0	93	83	22	20	4,15	22,41	446	0,88	1,37	0,32
6	90,0-93,0	103	93	23	19	4,89	21,04	475	0,88	1,37	0,29
7	111,0-114,0	77	65	24	18	3,61	21,32	469	0,88	1,37	0,36
8	119,5-122,5	137	109	24	18	6,06	22,62	442	0,88	1,37	0,24

Recorrendo sempre às eqs. (2.1), uma vez que os valores de radiação gama natural registados são baixos na zona dos tubos-ralos, a porosidade total (ϕ) estimada para cada um dos troços oscila entre os 26 e os 39 %. Na estimativa da porosidade, para a e m , foram utilizados os valores de Shon (1996) atribuídos a rochas detríticas fracamente cimentadas, tais como areias, arenitos e alguns calcários, normalmente de idade Terciária e com porosidade a oscilar entre 25% a 45%. A média de ϕ é de 0,32 para esta sondagem.

Os valores de σ_w assim estimados para cada troço permeável oscilam entre 411 e 475 $\mu S/cm$; o valor de σ_w a 25 °C determinado laboratorialmente numa análise físico-química resumida é de 595 $\mu S/cm$. Considera-se esta como sendo uma boa aproximação, uma vez que a condutividade eléctrica sobe com a temperatura (Custodio e Llamas, 1996).

No mesmo sistema aquífero, porém uma sondagem localizada nas Dunas Douradas-Almansil contém argila em algumas zonas de colocação de tubo-ralo, o que é visível na análise simultânea da diagrfias de Radiação Gama Natural e RN16" (Fig. 2.21), a abordagem para a estimativa da porosidade difere, aproximando-se dos trabalhos de Khalil et al. (2011). Estes autores estimaram a qualidade química da água e porosidades em troços comprovadamente com argila, como se verifica a partir da análise prévia da sobreposição das diagrfias do SPR com Radiação Gama Natural.

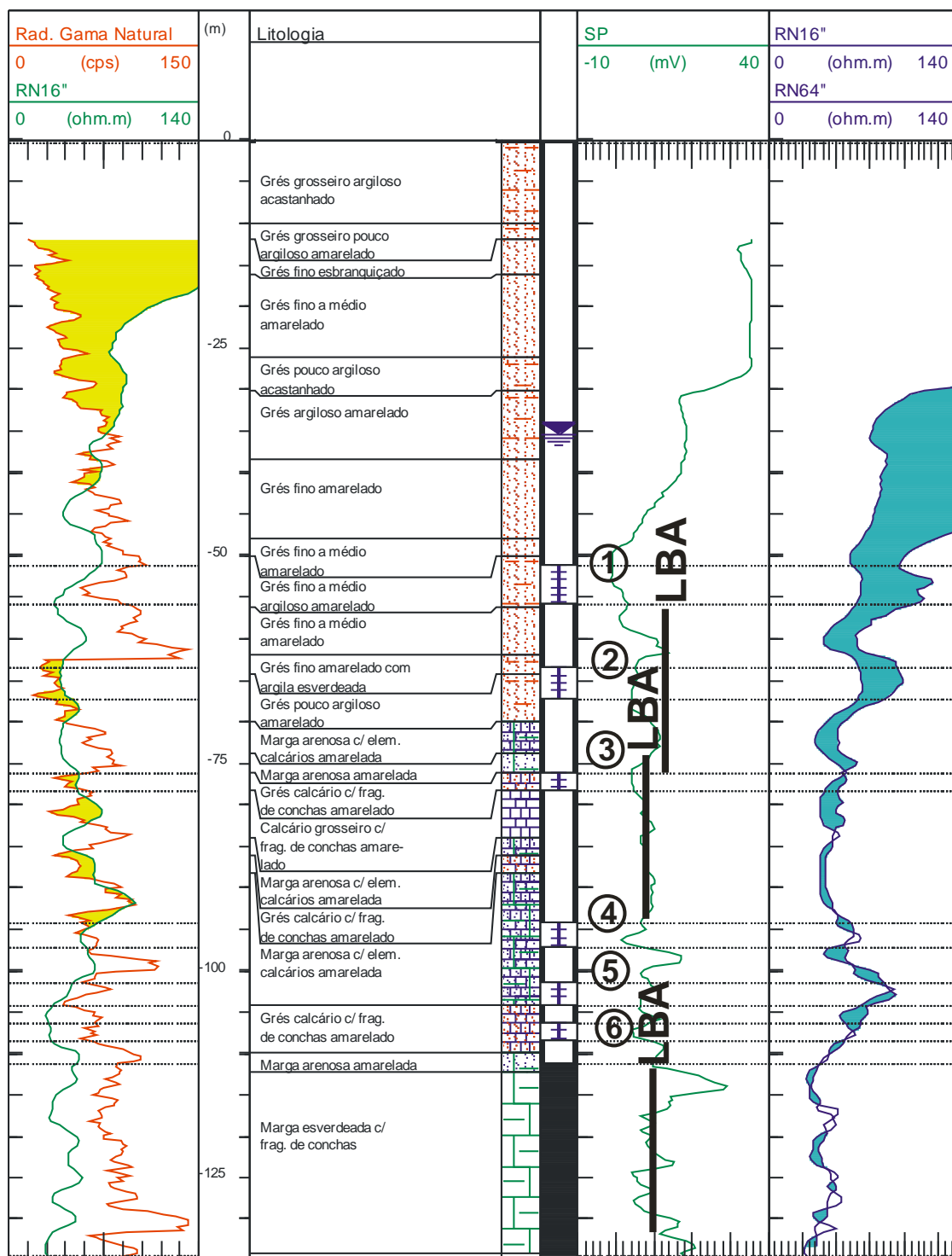


Fig. 2.21 – Diagramas de SP, Radiação Gama Natural, RN16" e RN64" de uma sondagem realizada nas Dunas Douradas-Almansil, localizada no Sistema Aquífero da Campina de Faro. Salientam-se as zonas amarelas, que correspondem aos troços permeáveis (zonas simultaneamente com baixa radiação gama natural, indicadores da baixa presença de argilas e resistividade eléctrica elevada, indicadores da presença de zonas arenosas) e onde foram colocados tubos-ralo, aquando do entubamento da sondagem.

Seguindo esta metodologia, Khalil et al. (2011) estimaram a condutividade hidráulica no aquífero arenoso da Núbia, no sul do Egipto, recorrendo a diagramas de resistividade em sondagens mecânicas de captação de água. Estas diagramas foram utilizadas para a estimativa R_w e do Factor de Formação Aparente (F_a) em função da

profundidade, que por sua vez serviram para estimar o Factor de Formação Intrínseco (F_i), através do modelo de Waxman-Smits (Waxman e Smits, 1968) para evitar o efeito das argilas. A presença de algumas argilas ao longo de toda a sondagem da Fig. 2.21, comprovada pelos valores de radiação gama natural com valores consideravelmente superiores aos da Fig. 2.20, complica as estimativas de porosidade em alguns troços críticos, uma vez que a Lei de Archie nestas condições não é válida (Archie, 1942).

Por isso, no que diz respeito aos troços permeáveis contendo argila localizados no mesmo sistema aquífero do exemplo da Fig. 2.20, a metodologia aplicada foi a utilizada em Khalil et al. (2011). Na sondagem da Fig. 2.21, R_{mf} é inferior a R_w , o que implica que as correspondentes deflexões de SP sejam positivas. Esta sondagem capta água com σ_w inferior à sondagem da Fig. 2.20.

Uma análise das diagrfias permite ver que esta sondagem apresentava troços de produtividade duvidosa, na medida em que a variabilidade vertical do conteúdo em argila não só se mantém em valores elevados ao longo de toda a sondagem como também as zonas escolhidas para colocação de tubo-ralo apresentam valores de radiação gama natural relativamente elevados. Apenas na zona do tubo-ralo 2 o valor do registo de radiação gama natural se encontra mais baixo, com cerca de 36 cps. Presume-se ser esta a zona mais livre de argilas, e como tal, um dos locais mais adequados para a colocação de um tubo-ralo, o que tornou a escolha para a colocação dos restantes um processo difícil, tendo resultado numa duvidosa escolha para a colocação dos tubos-ralo 3, 4 e 6. O tubo-ralo 1, para ser mais eficaz, teria que ser menor, de forma a não atravessar argilas, uma vez que na sua maior parte também atravessou uma zona argilosa. O tubo-ralo 6 foi, sem qualquer dúvida uma má escolha em termos de produtividade.

A Tabela 2.11 mostra os parâmetros estimados pela Lei de Archie para as zonas permeáveis com tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.21. Os valores de condutividade eléctrica da água captada estimados através da Lei de Archie nos diversos tubos-ralos da sondagem também se encontram adulterados pela influência das argilas nos valores de resistividade eléctrica, em especial na diagrfia de RN64”.

Tabela 2.11 – Parâmetros estimados pela aplicação directa da Lei de Archie para as zonas permeáveis com tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.21 com o recurso à eq. (2.1) e ao ábaco da Fig. 2.14. A vermelho encontram-se os troços de tubo-ralo cujos valores obtidos revelam a presença de argilas e, como tal levaram à não aplicabilidade da Lei de Archie e à adopção da metodologia de Khalil et al. (2011).

Mineralização total da água captada = 205 mg/l

TSD = 165 mg/l

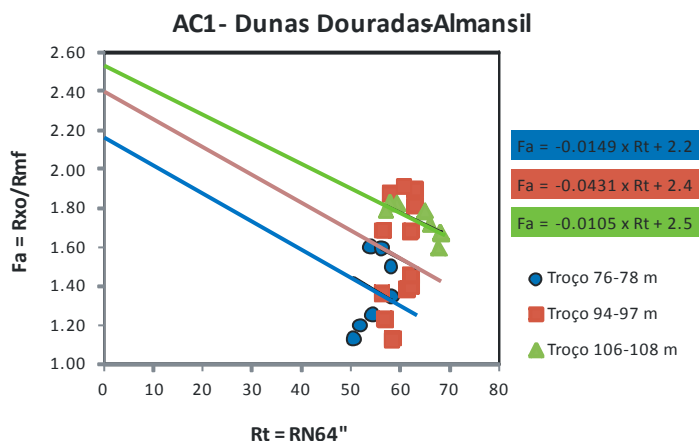
$Cl^- = 80\text{mg/l} \Rightarrow 132\text{ mg/l NaCl equivalente} \Leftrightarrow R_{mf} \text{ inicial} = 37\text{ ohm.m}$

Tubo-ralo	Profundidade (m)	Rt (RN64”) (ohm.m)	Rxo (RN16”) (ohm.m)	T (°C)	Rmf (ohm.m)	F	Rw (ohm.m)	σ_w (uS/cm)	a	m	φ
1	51,0-56,0	122	70	22	37	1,89	64,49	155	0,88	1,37	0,57
2	63,0-67,0	100	70	22	37	1,89	52,86	189	0,88	1,37	0,57
3	76,0-78,0	58	45	22	36	1,25	46,40	216	0,88	1,37	0,77
5	101,0-104,0	100	83	24	35	2,37	42,17	237	0,88	1,37	0,49
6	106,0-108,0	70	60	24	35	1,71	40,83	245	0,88	1,37	0,61

Por este motivo, os únicos valores que se consideraram creíveis pela aplicação directa da lei de Archie foram os dos tubos-ralos 1, 2 e 5, este último com bastantes

reservas, pelos motivos apontados atrás. Os valores estimados de condutividade eléctrica da água nativa nos 3 troços de tubo-ralo onde foi aplicada a Lei de Archie revelaram valores compatíveis com os valores de mineralização total e TSD obtidos através da análise química laboratorial (Tabela 2.11). De uma forma geral, os valores de ϕ estimados em especial nos restantes troços têm valores demasiado elevados, devido ao facto anteriormente mencionado da existência de argilas.

Para isso, nos restantes 3 troços (3, 4 e 6), foi seguida a metodologia de Khalil et al. (2011), da forma que se encontra na Fig. 2.22 representando o gráfico correspondente de $F_a \times R_t$ e a tabela correspondendo às estimativas de ϕ recorrendo à eq. (2.2).



Tubo-ralo	Profundidade (m)	T (°C)	R_{mf} (ohm.m)	F_i	ϕ eq. Humble eq. (2.2)
3	76,0-78,0	22	36	2,50	0,52
4	94,0-97,0	23	36	2,40	0,53
6	106,0-108,0	24	35	2,20	0,55

Fig. 2.22 – Análise dos 3 troços de tubo-ralo da sondagem da Fig. 2.21 e Tabela 2.11, que revelaram a presença de argilas com a metodologia de Khalil et al. (2011). (Acima) Gráfico correspondente de $F_a \times R_t$. (Abaixo) Tabela correspondendo às estimativas de ϕ recorrendo à eq. (2.2).

Para estimativas da condutividade hidráulica como função das características do meio, Khalil et al. (2011) exploram ainda a equação proposta por Kozeny (1927) e mais tarde modificada por Carman (1937; 1956), sendo por isso denominada “equação de Kozeny-Carman”. Esta equação tomou várias formas, incluindo a de Bear (1972)

$$k = \frac{\delta_w g}{\mu} \cdot \frac{d^2}{180} \cdot \frac{\phi^3}{(1 - \phi^2)} \quad (2.13)$$

em que k é a condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade, d é o diâmetro do grão (cm), δ_w é a densidade do fluido (0,9982 g/cm³ a 20°C), μ é a viscosidade dinâmica (0,019 g/cm/s a 20°C) e g é a aceleração da gravidade (980 cm/sec²).

A porosidade total foi estimada por Khalil et al. (2011) através deste método no aquífero arenoso da Núbia e permitiu obter valores de condutividade hidráulica que

foram consideravelmente semelhantes, tanto através da aplicação do modelo de Waxman-Smits (1968) a diagrfias eléctricas (10,4 m/d) como por estimativas a partir de dados de ensaios de caudal (10,6 m/d). No caso presente, a condutividade hidráulica obtida pela eq. (2.13) é de 140 m/d, o que vai de encontro ao valor estimado a partir do ensaio de caudal e se encontra dentro dos valores referidos por Custodio e Llamas (1996) para areias.

2.6.6.3. Aplicação de diagrfias nucleares

A estimativa do coeficiente de armazenamento calculado através de ensaios de caudal e das diagrfias de Neutrões origina ainda valores semelhantes, pelo que, em formações porosas, a utilização das diagrfias de Neutrões para o cálculo de parâmetros hidráulicos não é de excluir (Keys e MacCary, 1971; Keys, 1990).

Por outro lado, a estimativa da porosidade utilizando uma diagrfia de Neutrões é baseada no pressuposto de que todos os iões de hidrogénio têm origem no fluido que preenche os poros na rocha. Caso isto não aconteça, para determinar a porosidade, dever-se-á saber a proporção relativa de cada um dos componentes contendo hidrogénio na formação. Isto implica que se deverá ter um conhecimento dos minerais que estão presentes, por exemplo, das argilas através da utilização de outra diagrfia, como por exemplo a de Radiação Gama Natural ou do SP (Chappelier, 1992). No entanto, medindo o conteúdo em hidrogénio sob condições favoráveis significa estimar a porosidade e a saturação (Chappelier, 1992). A diagrfia de Neutrões tem ainda a grande vantagem de poder ser utilizada com ou sem fluido condutor e tal como já foi referido, o facto da sondagem poder estar entubada não causar nenhum efeito significativo nos valores registados (Keys, 1990).

Para a determinação da porosidade a partir dos registos de diagrfias de Neutrões, Baron e Chappelier (1998) desenvolveram uma fórmula empírica, numa sonda de Am-Be de 1 Ci,

$$\text{cps} = 1078 e^{-6,08\varphi} \quad (2.14)$$

em que cps é o número de contagens por segundo da diagrfia de Neutrões e φ é a porosidade (%).

Em relação à permeabilidade, Sopris Signals (1997) referem a seguinte relação entre a permeabilidade e a porosidade:

$$k = 30,713 \times 100,061797\varphi \quad (2.15)$$

em que k é a permeabilidade ou condutividade hidráulica (m/d) e φ é a porosidade (%).

No Sistema Aquífero dos Gabros de Beja, o perfil de alteração típico de uma rocha gabro-diorítica e respectivas características hidráulicas é o que encontra na Fig. 2.23 e admite-se que a zona alterada se comporta como uma zona porosa em que a Lei de Darcy é válida.

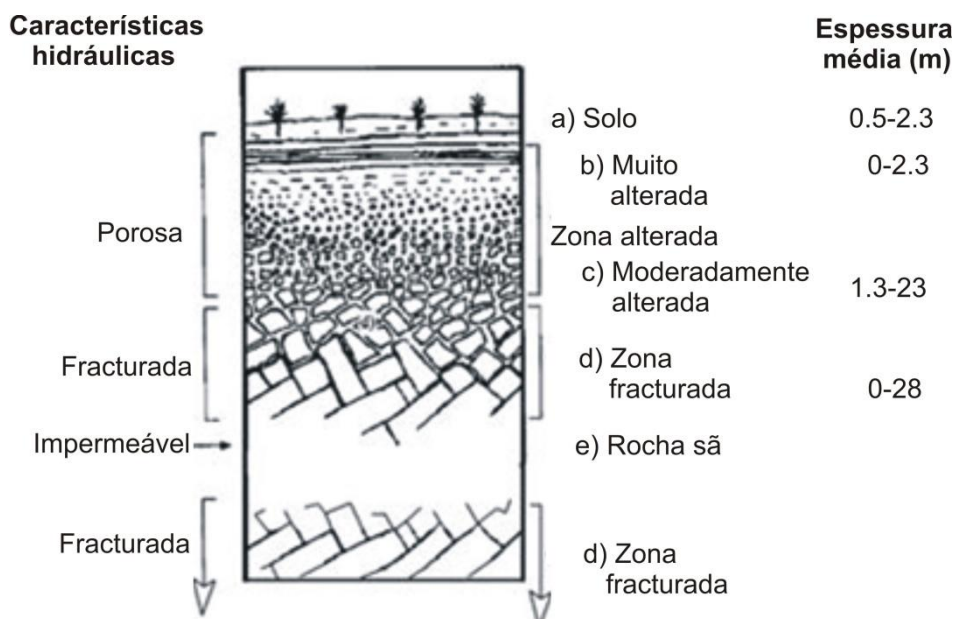


Fig. 2.23 – Perfil de alteração típico de uma rocha gabro-diorítica e respectivas características hidráulicas (adaptado de Paralta, 2001). Está igualmente representada a zona fracturada mais profunda (zona d) sob a rocha não alterada.

A Fig. 2.24 mostra um conjunto de diagrfias efectuadas numa sondagem mecânica realizada neste sistema aquífero (Ramalho, 1998), onde foi utilizada a eq. (2.14) para a estimativa de porosidades (Rocha et al., 2003; Ramalho et al., 2009). Esta análise foi possível devido ao facto da fonte radioactiva utilizada na diagrfia de Neutrões ser idêntica à utilizada por Baron e Chappelier (1998) (fabricante, actividade e idade). Ao mesmo tempo foi efectuado um estudo comparativo entre as porosidades estimadas com o recurso à eq. (2.14) e a partir da Lei de Archie sem correcções para a presença de argilas (eq. 2.2). A espessura da camada de alteração varia consoante o local e, em algumas zonas, pode estender-se até 30 m de profundidade. Abaixo desta, encontra-se com frequência a chamada zona fracturada referida na Fig. 2.23.

A análise conjunta das diagrfias realizadas nesta sondagem dá indicações acerca do grau de alteração das formações atravessadas e dos fluidos que a sondagem contém. Além do aumento gradual em profundidade dos valores da sonda de RN16" e Neutrões até aos 34 m (Rocha et al., 2003), indicadores da diminuição progressiva do grau de alteração e a passagem para a zona fracturada, ocorrem vários picos de neutrões ao longo da sondagem quando as formações atravessam zonas de rocha menos alterada ou mesmo sã. No entanto, ocorre uma zona fracturada aos 30 m (Z1).

Os gabros não alterados têm valores muito baixos de radiação gama natural (Tabela 2.3) que se mantêm ao longo de toda a sondagem, pelo que qualquer mudança litológica poderia ser facilmente detectada através da diagrfia de Radiação Gama Natural, desde que as assinaturas radioactivas das formações fossem distintas. As duas diagrfias de Porosidade da Fig. 2.24, uma calculada através da Lei de Archie e eqs. (2.1) e outra pela eq. (2.14), têm um comportamento semelhante ao longo de toda a sondagem mecânica, embora a primeira apresente valores médios mais elevados do que a segunda, por sua vez com valores mais elevados nas zonas mais alteradas e fracturadas. Esta variação de características das formações é facilmente detectável através da análise das diagrfias eléctricas (SPR e RNs) e da diagrfia de Neutrões,

que mostra o potencial das diagrfias eléctricas e nucleares na identificação de mudanças de litologia e/ou respectivas características.

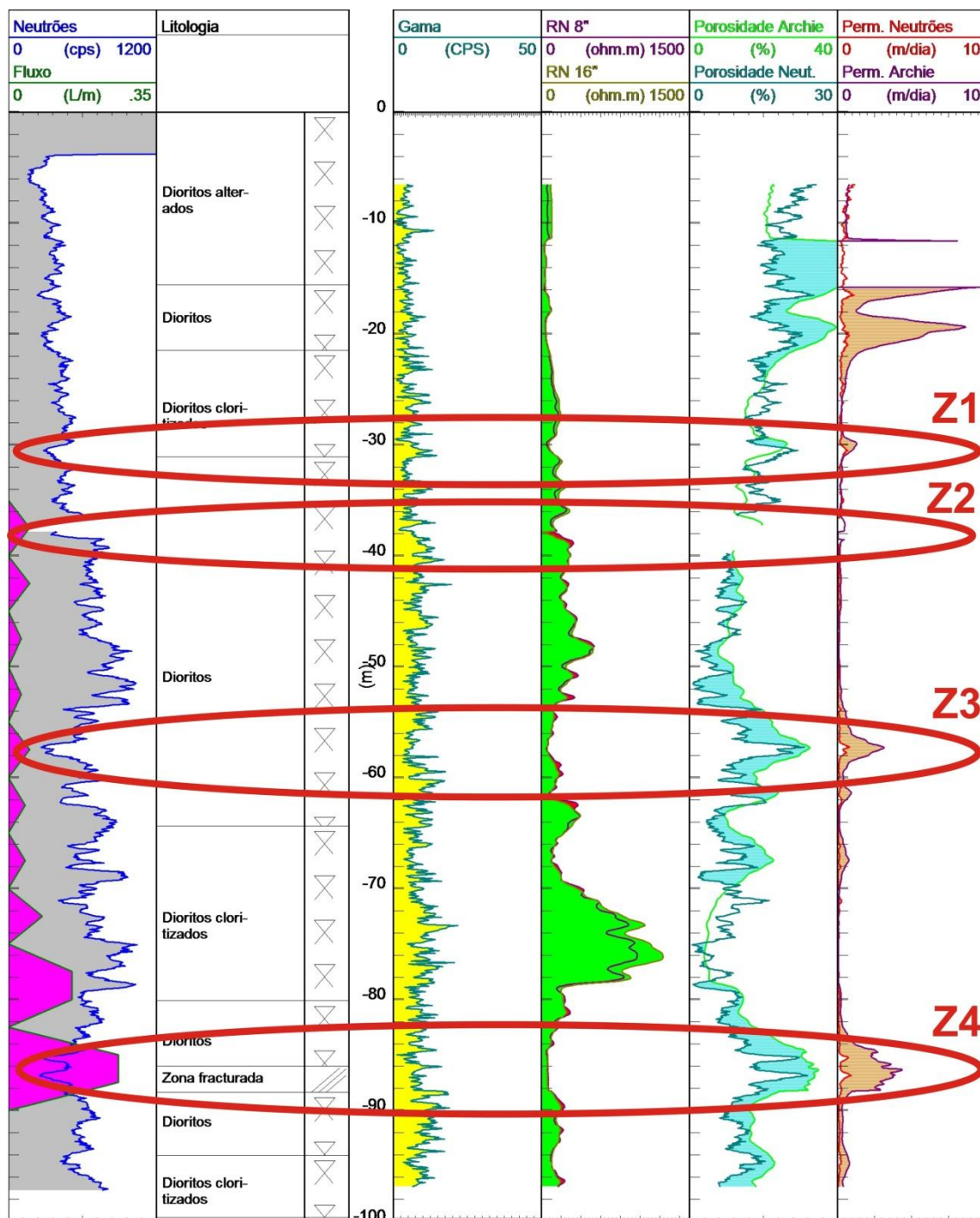


Fig. 2.24 – Diagrfias de Neutrões, de Fluxo, de Resistividade Normal 8" e 16" (Ramalho, 1998), de Porosidade Archie (determinada através da aplicação da Lei de Archie) e de Porosidade Neutrões (determinada através da aplicação da fórmula empírica de Baron e Chappelier (1998) da eq. (2.14) e Permeabilidade de Darcy estimada a partir da eq. (2.15) com a Porosidade de Archie e com a Porosidade de Neutrões numa sondagem localizada no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Ramalho, 1998; Ramalho et al., 2000; Ramalho et al., 2009).

A discrepância entre os valores obtidos pelos dois métodos advém do facto da sondagem até aos 37 m ter um diâmetro de 6" e a partir dos 37 m ter 4", enquanto Baron e Chapellier (1998) utilizaram um furo com um diâmetro de 3" para a obtenção

da eq. (2.14). Como a maiores diâmetros corresponde uma diminuição de cps (aumento da porosidade), os resultados reais seriam superiores se os valores fossem corrigidos para a variação de diâmetro, aproximando-se assim, dos valores obtidos pela equação de Archie.

É de salientar ainda que a diferença dos valores também pode ser afectada pelo facto de Baron e Chapellier (1998) terem obtido a eq. (2.14) num meio menos poroso do que a sondagem mecânica em questão. Aos 58 m, os valores de porosidade aumentam consideravelmente, provavelmente como resultado da presença de uma fractura produtiva e um ligeiro aumento dos valores da diagrafia de Fluxo. Entre os 70 e os 80 m ocorre devido a uma zona menos alterada.

Esta conclusão resulta dos valores elevados de resistividades eléctrica da diagrafia de RN64” e do acentuado decréscimo dos valores da porosidade estimada por ambos os métodos, que poderá ter origem numa zona intensamente fracturada, o que está de acordo com o aumento nos valores da diagrafia de Fluxo (Z3). Abaixo dos 80 m, há ainda uma grande diminuição dos valores de resistividade eléctrica (diorito mais alterado) e de neutrões, o que está de acordo com o aumento da porosidade secundária e com a existência de um segundo aquífero nos Gabros de Beja.

Os valores de permeabilidade na correspondente diagrafia da Fig. 2.24 obtidos com a aplicação da eq. (2.15) situam-se entre 0 e 1,5 m/dia, estes últimos em zonas comprovadamente fracturadas. Estes valores correspondem ainda a valores característicos de rochas ígneas fracturadas, no caso desta sondagem, dioritos mais ou menos alterados e/ou fracturados (Custodio e Llamas, 1996). Observam-se, ainda, zonas com maior porosidade e permeabilidade nas zonas aquíferas, e.g. no aquífero superficial (até aos 16 m) e no aquífero mais profundo (na zona entre os 80 e os 90 m de profundidade, onde há uma zona com elevados valores de porosidade ($\pm 30\%$), correspondendo a Z4).

2.7. Aplicação conjunta de diagrfias e de métodos geofísicos de superfície para a caracterização dos fluidos

A utilização de diagrfias, em especial das diagrfias eléctricas, para complementar e correlacionar com dados de geofísica de superfície é um aspecto igualmente importante a considerar, uma vez que os valores de R_t obtidos pelas diagrfias de RN e RL podem igualmente ser utilizados para calibrar modelos 1D ou 2D de resistividade eléctrica obtidos com geofísica de superfície através de SEVs, informação em 2D de prospecção electromagnética, ou ainda GPR, apenas para citar alguns. Além disso, é possível estimar parâmetros hidráulicos dos aquíferos a partir de diagrfias nucleares e da coluna de fluido e por sua vez correlacioná-los com os dados de geofísica de superfície. Dá-se particular ênfase à correlação de diagrfias eléctricas com métodos eléctricos e electromagnéticos de superfície, cuja resposta é significativamente afectada tanto pelas características das formações geológicas como pela mineralização total da água subterrânea que circula em profundidade. Apresentam-se de seguida dois exemplos representativos da utilização de diagrfias e de métodos geofísicos de superfície aplicados na caracterização de fluidos em ambientes geológicos distintos.

2.7.1. Aplicação de diagrfias eléctricas e nucleares, SEVs e FDEM em formações compactas

No âmbito do trabalho que deu origem às diagrfias na sondagem mecânica interpretada na secção 2.6.6.3 (Fig. 2.24) foram realizadas duas campanhas de SEVs na zona da Bacia da Ribeira da Chaminé, próximo de Beja (Gonçalves, 1999; Rocha, 2001). Posteriormente, na mesma área efectuaram-se levantamentos de prospecção electromagnética no domínio frequência (FDEM) com o Geonics EM34 (Ramalho, 2007). O perfil típico de alteração representado na Fig. 2.23 serviu de base à correlação com os resultados da inversão 1D da SEV1, cujo centro geométrico se localiza na sondagem mecânica da Fig. 2.24 e que se encontra na Fig. 2.25 (à esquerda).

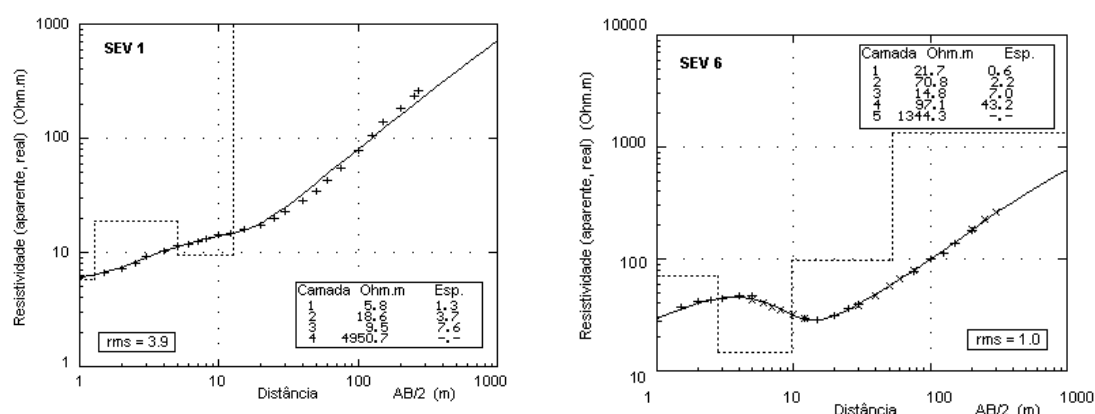


Fig. 2.25 – (Esquerda) Resultados da inversão 1D da SEV1 com o dispositivo de Schlumberger e $AB/2_{máx.} = 250$ m, cujo centro geométrico se localiza na sondagem da Fig. 2.24 – modelo de 5 camadas. (Direita) Resultados da inversão 1D da SEV6 com o dispositivo de Schlumberger e $AB/2_{máx.} = 250$ m, a 75 m do perfil da Fig. 2.26.

A utilização conjunta das diagrfias de resistividade eléctrica e de neutrões da sondagem mecânica e dos dados de resistividade eléctrica e espessuras das várias camadas indentificadas na SEV1 permite uma avaliação mais crítica dos valores obtidos e correlacionar as várias zonas de alteração e fractura com os valores de resistividade eléctrica. Esta correlação possibilitou a criação de um modelo conceptual de resistividade eléctrica de 5 camadas (Tabela 2.12) a partir do qual parâmetros hidrogeológicos como porosidade e permeabilidade foram calculados respectivamente com as eqs. (2.14) e (2.15).

Tabela 2.12 – Modelo criado a partir dos dados de resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade da modelação da SEV1 e de diagrfias efectuadas e estimadas na Fig. 2.24, relacionados com os dados de Rocha et al. (2003).

Profundidade (m)	Zona correspondente na Fig. 2.23	Resistividade aparente média (ohm.m)	Porosidade média (%)	Permeabilidade de Darcy
0 – 12	a,b	20	20	0,53
12 – 22	c	70	18	0,40
22 – 53	d	340	10	0,13
53 – 70	Zona fracturada	230	15	0,26
70 – 79	e	1300	6	0,07
79 – 86	Zona fracturada	75	18	0,40
86 – 96	d	150	10	0,13

A partir dos valores da resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade de Darcy estimados empiricamente nesta SEV1 distinguiram-se as 3 zonas diferentes da Fig. 2.23, uma vez que as zonas *a* e *b* de alteração foram atribuídas a uma zona única. De uma forma geral, atribuíram-se às diferentes zonas da Fig. 2.23 os valores resistividade eléctrica média, de porosidade média e permeabilidade de Darcy que constam da Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Relação entre as zonas de alteração referidas na Fig. 2.24 com limites de resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade de Darcy baseados nos dados das diagragias de Ramalho (1998) e SEVs de Gonçalves (1999) e Rocha (2001).

Zona	Resistividade eléctrica média (ohm.m)	Porosidade média (%)	Permeabilidade de Darcy
a	0-12	20	0,53
b	12-60	18	0,40
c	60-120	15	0,26
d	120-300	10	0,13
e	300-∞	6	0,07

Alguns anos depois, foi feita uma campanha de aquisição de dados FDEM com o Geonics EM34, na mesma zona, que cobriu a bacia hidrográfica da Ribeira da Chaminé. Esta envolveu a realização de vários perfis com espaçamentos de cabo de 10 e 20 m (frequências de cerca de 6,4 e 1,6 kHz, respectivamente), nos dipolos horizontal e vertical (Geonics, Ltd., 1990) e a sua inversão 2D através do *software* EM34-2D desenvolvido por Monteiro Santos (2004) (Ramalho, 2007). Apresenta-se aqui um dos perfis 2D realizados, com localização perpendicular à drenagem da Ribeira da Chaminé, o qual forneceu informação importante acerca do grau de alteração das formações gabro-dioríticas até uma profundidade de cerca de 30 m, que foi utilizado para a estimativa de porosidades utilizando a eq. (2.1). Estes resultados, baseados em relações empíricas, são uma boa aproximação, embora não devam ser encarados com a precisão de medições *in-situ* e devam, por isso, ser correlacionados sempre que possível com a informação existente.

A Fig. 2.26 mostra os modelos inversos de condutividade eléctrica e resistividade eléctricas deste perfil, o modelo de porosidade baseado na eqs. (2.1), o de permeabilidade a partir das Fig. 2.23 e Fig. 2.24 e a localização SEV6 de Gonçalves (1999) a uma distância de cerca de 75 m do perfil, à distância de 750 m do seu início. Esta SEV6 foi realizada no mês de Fevereiro, como tal, diminuindo as resistividades das zonas *a+b+c* e aumentando a espessura da camada de resistividade eléctrica atribuída à camada de alteração. Assim, esta indica uma camada com resistividade eléctrica muito baixa (97 ohm.m) com uma espessura de cerca de 55 m (zonas *a+b+c+d*). Esta camada está bem representada no modelo obtido pela inversão dos dados do Geonics EM34 com o *software* EM34-2D desenvolvido por Monteiro Santos (2004).

Os valores obtidos na Fig. 2.26, se bem que com base em equações empíricas cuja validade varia com o local, constituem no entanto bons indicadores espaciais e em profundidade da variação destes três parâmetros, que poderão ser tomados em consideração para uma gestão sustentável da bacia hidrográfica. São consistentes com as características geoelectricas das formações gabróicas (Telford et al., 1995) e as variações em profundidade também registam a ocorrência de zonas fracturadas de

pequena espessura, em que nos valores atribuídos para as zonas de alteração e fracturação da Tabela 2.12 se reflectem as zonas de maior de porosidade e de permeabilidade.

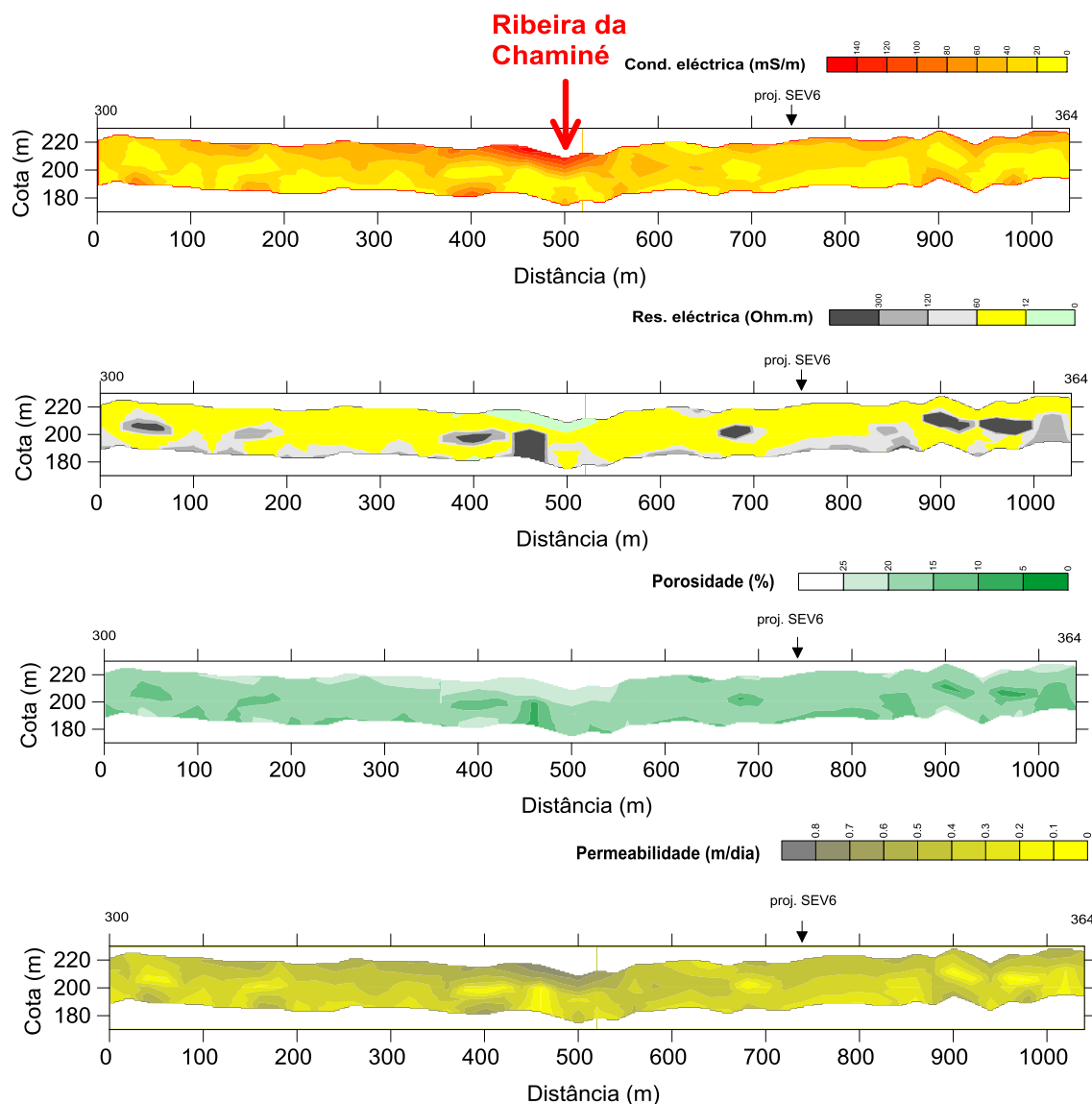


Fig. 2.26 – Modelos inversos de condutividade e resistividade eléctrica, porosidade e permeabilidade com os parâmetros referidos na Tabela 2.13 (Ramalho, 2007).

Este exemplo mostra que a utilização conjunta de diagrfias e métodos geofísicos de superfície na modelação das zonas de alteração poderá dar um bom conhecimento acerca da variação espacial da sua espessura e permite antever as consequências desta variação em alguns parâmetros hidrogeológicos das áreas estudadas, nomeadamente a nível de uma análise de vulnerabilidade à poluição difusa. A aplicação de modelação 3D quando em presença de uma malha de pontos suficientemente densa permite uma definição da estrutura geológica e geoelectrica 3D baseada em informação e critérios muito mais consistentes.

2.7.2. Aplicação de diagrfias eléctricas e nucleares, SEVs e GPR em aquíferos multicamada

Outras abordagens podem ser feitas à mesma temática, nomeadamente a estimativa de outros parâmetros hidráulicos dos aquíferos e caracterização química dos fluidos tendo como base as diagrfias eléctricas (SPR, RN16" e 64") e nucleares (Radiação Gama Natural) realizadas numa sondagem mecânica e em geofísica de superfície, como SEVs e GPR. Khalil et al. (2010) estimaram a diagrfia de Porosidade numa sondagem mecânica localizada no aquífero arenoso multicamada da Núbia, no Egipto, utilizando as diagrfias de RN16" e RN64" e com o recurso à Lei de Archie (eqs. 2.1), correlacionando a informação obtida a partir da aplicação sequencial de outros métodos (GPR e SEVs com o dispositivo Schlumberger). Aqui, a partir da Lei de Archie apresentada anteriormente para formações sem argila, Khalil et al. (2010) criaram a diagrfia Condutividade da Água para os troços permeáveis, com ou sem tubo-ralo (eqs. 2.1). A partir desta, foi estimada a diagrfia da Porosidade com a eq. (2.2) e a diagrfia do TSD estimada a partir da eq. (2.8), dando origem à Tabela 2.14.

A utilização das diagrfias eléctricas realizadas nesta sondagem e de um perfil de GPR (Fig. 2.28, em cima) permitiu estimar a constante dieléctrica e o conteúdo volumétrico em água a partir da velocidade das ondas electromagnéticas (Khalil et al., 2010). Uma SEV realizada nas proximidades foi ainda utilizada para estimar a saturação (Khalil et al., 2010) (Fig. 2.28, em baixo). A partir do conteúdo volumétrico em água e da saturação (Khalil et al., 2010) estimaram a porosidade do aquífero e a salinidade da água que foram cerca de 35% e 1152 mg/l, respectivamente. A observação das diagrfias de porosidade e TSD correspondentes indicam para os troços de tubo-ralo valores médios para os mesmos parâmetros igualmente da ordem de 40% e 950 mg/l, respectivamente (Tabela 2.14). Tendo em conta que a salinidade da água captada nas duas sondagens da zona é em média 970 mg/l, do ponto de vista geofísico é considerado bastante aceitável, na medida em que dá uma estimativa bastante aproximada deste parâmetro.

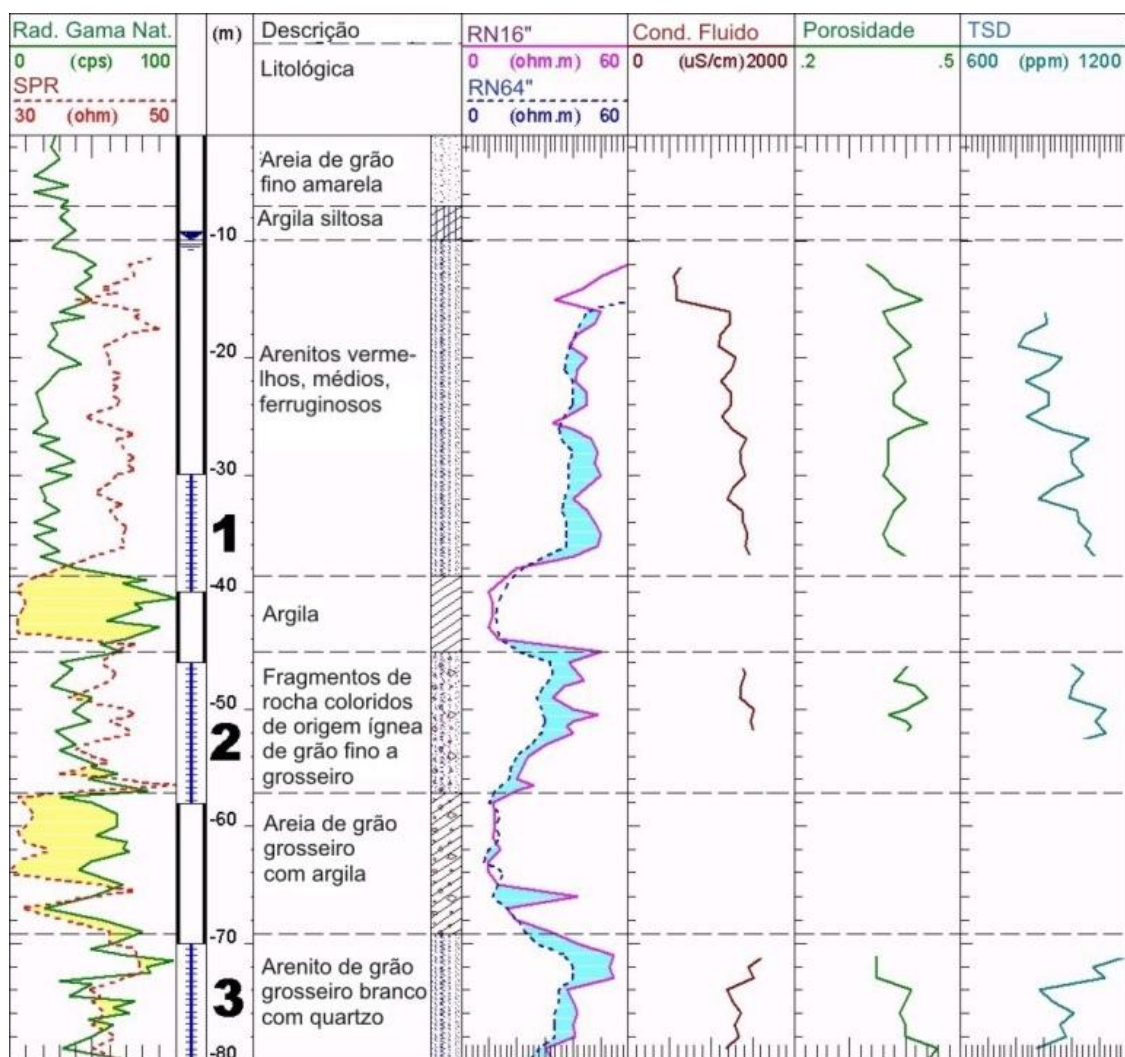


Fig. 2.27 – Diagramas de Radiação Gama Natural, do SPR e de Resistividade Normal 16" e 64 efectuadas numa sondagem mecânica do aquífero arenoso multicamada da Núbia, Egípto. Diagramas estimadas de Condutividade da Água, Porosidade e TSD a partir da aplicação das eq. (2.1) e (2.8). As áreas amarelas representam zonas argilosas interpretadas a partir das diagramas do SPR e da Radiação Gama Natural (adaptado de Khalil et al., 2010).

Tabela 2.14 – Parâmetros estimados, Factor de Formação (F), Resistividade da Água (R_w), Condutividade da Água σ_w , Porosidade total média (ϕ) e TSD para os três tubos-ralos da sondagem mecânica da Fig. 2.24 (Khalil et al., 2010).

Tubo-ralo	Prof. (m)	R_t (RN64") (ohm.m)	R_{xo} (RN16") (ohm.m)	R_{mf} (ohm.m)	F	R_w (ohm.m)	σ_w (μ S/cm)	a	m	ϕ	TSD (ppm)
1	30,0-40,0	38	48	10,30	4,66	8,15	1226	0,62	2,15	0,38	908
2	46,0-58,0	25	35	10,30	3,40	7,36	1359	0,62	2,15	0,45	1007
3	70,0-80,0	40	52	10,30	5,05	7,92	1262	0,62	2,15	0,38	935

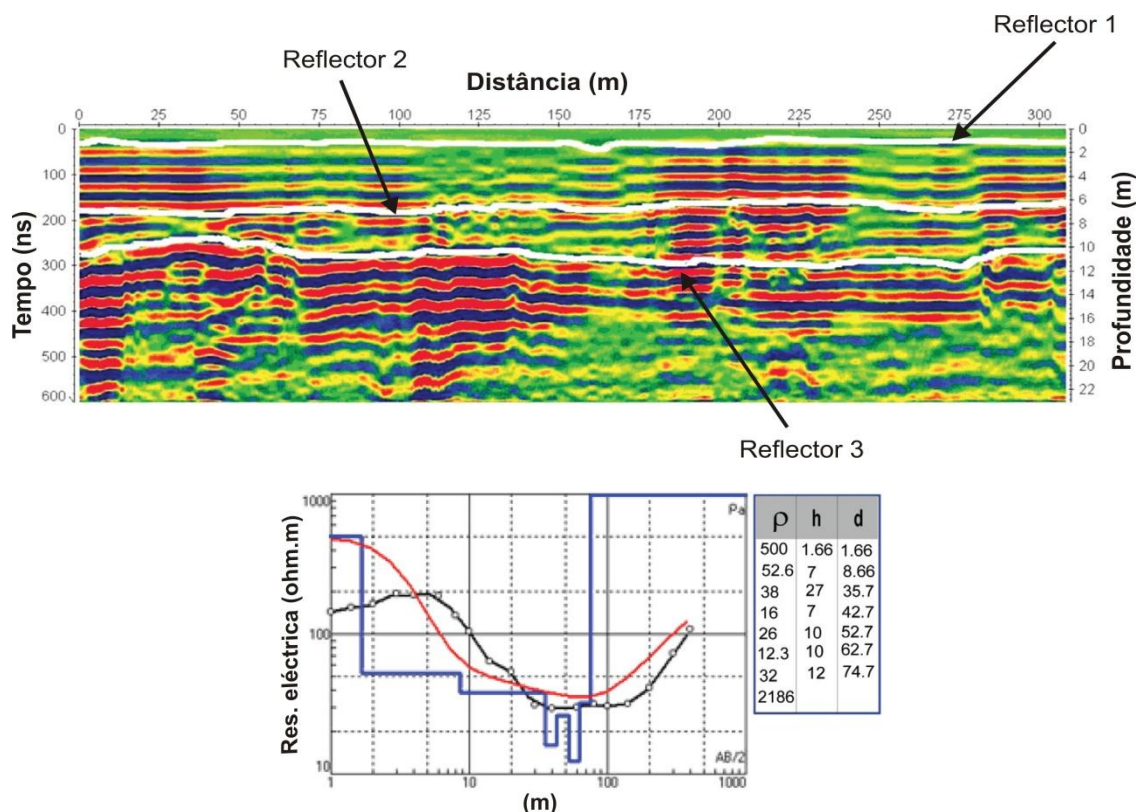


Fig. 2.28 – (Em cima) Perfil de GPR. Linhas brancas: Reflector 1 \cong 20 ns – superfície do terreno; Reflector 2 \cong 180 ns – topo da camada silto-argilosa; Reflector 3 \cong 280-300 ns – NHE. (Em baixo) Modelo final da resistividade a partir da interpretação da SEV realizada com o dispositivo de Schlumberger com AB/2 a variar de 1 a 400 m nas proximidades da sondagem mecânica da Fig. 2.24. A tabela ao lado corresponde aos parâmetros do modelo (Khalil et al., 2010).

As diferenças que ocorreram podem ser devidas a variações sazonais da qualidade da água, aumento dos caudais extraídos ou aumento da temperatura. Este método de Khalil et al. (2010) está contudo limitado a profundidades relativamente superficiais e à necessária ausência de argila nas formações aquíferas que permita a aplicação directa da Lei de Archie. É ainda necessário partir do princípio que os parâmetros petrofísicos estimados são válidos à escala regional.

2.8. Breve análise custos-benefícios da utilização de diagrfias em Hidrogeologia

Tal como já foi referido anteriormente, é imprescindível uma cuidada análise custo-benefício antes de cada campanha de diagrfias. Há sondas que medem em simultâneo uma quantidade apreciável de parâmetros como é o caso da sonda multi-paramétrica que mede SP, SPR, radiação gama natural, resistividades normais 8", 16", 32" e 64", condutividade do fluido e temperatura, enquanto outras medem apenas um único parâmetro, como é o caso da sonda de neutrões, bem como de uma avaliação cuidada das condições físicas da sondagem, sendo por isso importante uma análise custo-benefício. Por outro lado, mesmo a utilização da sonda multi-paramétrica acarretará custos de utilização mais consideráveis do que a utilização de uma sonda simples que meça apenas o SP, SPR e radiação gama natural. Embora esta análise custo benefício tenha que ser efectuada caso a caso e seja necessário ponderar cuidadosamente todos os factores em causa, designadamente, objectivos,

profundidade e condições físicas da sondagem, bem como o conhecimento prévio da sua geologia e hidrogeologia, é sempre difícil quantificar em concreto o benefício que a utilização de diagrfias poderá ter dado. Apenas a experiência de casos em que a não utilização ou má utilização serve para esta quantificação em termos absolutos e sempre pela negativa. Por isso é importante encarar a realização de diagrfias como a garantia de uma melhor qualidade técnica do resultado final da captação de água subterrânea.

Exploram-se aqui para exemplo os casos das Figs. 2.6 e 2.7, em que a análise de apenas duas diagrfias – SPR e Radiação Gama Natural – fizeram ou poderiam ter feito uma diferença significativa nos custos finais e qualidade da captação.

No caso da Fig. 2.6, a análise das diagrfias analógicas de Radiação Gama Natural e SPR de uma sondagem realizada em 1992 com 110 m de profundidade, levou à decisão de prolongar em profundidade até aos 130 m uma nova sondagem realizada em 2003, a 10 m de distância da primeira. Além disso, as diagrfias digitais de Radiação Gama Natural e SPR realizadas em 2003 foram analisadas com pormenor para a definição rigorosa do posicionamento dos tubos-ralos. Assim, tal como foi referido atrás, o caudal recomendado subiu de 72 m³/h na sondagem de 1992, para 84 m³/h na sondagem de 2003. Se se considerar o custo da água a 0,6 €/m³ e o preço médio de 1500 € para a realização e interpretação das diagrfias com a sonda que mede o SP, SPR e radiação gama natural e se esta captação operar durante 8 h/dia, a realização das mesmas terá sido amortizada em cerca de 35 dias, o que no tempo de vida útil expectável de uma captação de água subterrânea é bastante satisfatório.

Relativamente à situação da Fig. 2.7, se as diagrfias da Sondagem 2 tivessem sido alvo de uma análise cuidada para identificações e correlações estratigráficas, ter-se-ia prolongado a Sondagem 1 aquando da sua realização, que no entanto acabou por ficar com uma profundidade de 290 m. Não o tendo feito, a água captada pela Sondagem 1 revelou-se quimicamente de má qualidade (1190 µS/cm) e após o colapso da mesma, perfurou-se a Sondagem 3, a 12 m de distância da Sondagem 2, até à profundidade de 340 m, correlacionando as suas diagrfias com as diagrfias realizadas nas Sondagens 1 e 2. Obteve-se a condutividade eléctrica de 401 µS/cm para a água captada na Sondagem 3. Se esta análise de correlação estratigráfica com a Sondagem 2 tivesse sido realizada, ter-se-ia perfurado a Sondagem 1 com a profundidade e localização dos tubos-ralos da Sondagem 3 e esta última não teria sido necessária. Como resultado final, ter-se-ia poupado mais de 85% dos custos globais resultantes da necessária resolução deste problema, relacionados com o colapso da Sondagem 1 e posterior perfuração da Sondagem 3. Estando em causa as centenas de milhares de euros que por vezes envolvem a construção de uma captação de água subterrânea com esta profundidade, são valores verdadeiramente significativos, em especial numa época de crise como a que atravessamos.

A breve quantificação destes dois exemplos mostra bem a importância da utilização das diagrfias em estudos de Hidrogeologia e de como uma boa interpretação das mesmas poderá fazer com que os seus custos quase se tornem irrisórios face aos benefícios por vezes obtidos. Em casos extremos de necessidade da substituição de captações, podem ser poupados milhares de euros se um programa de diagrfias for

bem planeado, executado e interpretado, mantendo o orçamento disponível dentro de valores viáveis.

2.9. Artigos do SCI – justificação da sua inclusão e participação da autora

Neste capítulo e associados a esta temática foram incorporados dois artigos escritos em co-autoria e incorporados no SCI, designadamente (i) *Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of Nubian Sandstone aquifer in southern Egypt*, publicado no *Journal of Near Surface Geophysics* e (ii) *An approach to estimate porosity and groundwater salinity of shallow aquifers by combined application of GPR and VES: a case study in the Nubian sandstone aquifer*, igualmente publicado no *Journal of Near Surface Geophysics*. Justifica-se seguidamente a sua inclusão nesta dissertação com uma curta descrição dos mesmos, bem como se descreve sucintamente em que é que consistiu a participação da autora da dissertação em ambos os trabalhos.

2.9.1. Khalil, M., Ramalho, E. C. e Monteiro Santos (2011) – Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of Nubian Sandstone aquifer in southern Egypt. *Journal of Near Surface Geophysics*, v. 9, n. 4, pp.349-355.

O presente trabalho foi realizado na área de Khor-El-Ramlah, no aquífero arenoso da Núbia. Este aquífero está localizado na margem ocidental do Lago Nasser, no sul do Egipto. Encontra-se numa área tectonicamente activa e é atravessado por um conjunto de falhas regionais que se estende em direcção ao lago. Por esta razão, nesta área a recarga do aquífero arenoso da Núbia deverá ser feita fundamentalmente por grandes quantidades de água de infiltração proveniente do lago. Um importante parâmetro utilizado para quantificar a infiltração é a condutividade hidráulica. No entanto, uma vez que nesta área não há informações disponíveis sobre a condutividade hidráulica por meio de ensaios de bombagem ou análises laboratoriais de testemunhos de sondagens, procura-se neste estudo obter estimativas destes valores por métodos alternativos. Como tal, é feita uma tentativa para estimar a condutividade hidráulica utilizando os registos disponíveis de resistividade eléctrica pela aplicação do modelo Kozeny-Carman. O efeito da contaminação da argila na estimativa da porosidade é removido por meio de aplicação do modelo Waxman-Smits. Assim, a condutividade hidráulica foi estimada como sendo $9,5 \pm 2,5$ m/dia para o aquífero arenoso da Núbia nesta área, sendo este resultado consistente com os valores estimados e medidos de condutividade hidráulica para o mesmo aquífero em áreas próximas, e podendo como tal ser utilizado para estimar a infiltração nesta zona. A aplicação de diagrfias muitas vezes fornece ainda uma alternativa eficaz para estimar os parâmetros hidráulicos do aquífero. A análise das diagrfias efectuadas em sondagens da zona permitiu obter valores análogos.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Khalil et al. (2011) consistiu no processamento e análise de todas as diagrfias. Realizou igualmente todos cálculos e estimativas associadas às mesmas e colaborou na correlação dos

dados com a geofísica de superfície. Efectuou igualmente uma análise crítica da correlação dos dados obtidos com a geofísica de superfície.

2.9.2. Kahlil, M. A., Hafez, M. A, Monteiro Santos, F., Ramalho, E. C., Mesbah, H. S. e El-Gady, G. M. (2010) – An approach to estimate porosity and groundwater salinity of shallow aquifers by combined application of GPR and VES: a case study in the Nubian sandstone aquifer. *Journal of Near Surface Geophysics*, v.8, n. 3, pp.223-233.

Tendo em conta que a propagação do sinal de GPR é fortemente controlada pelo teor de água, este método pode ser empregue para a resolução de numerosos problemas hidrogeológicos, relacionados com estruturas geológicas ou com a estimativa de propriedades petrofísicas. No presente estudo, são analisados e combinados dados de diagrfias, GPR e SEVs para proceder a uma avaliação da salinidade da água subterrânea, e como tal, da sua qualidade.

Foram utilizadas diagrfias de resistividade eléctrica para corrigir o efeito de deslocamento estático sobre SEVs, bem como para correlacionar com os dados de superfície. A constante dieléctrica da água foi estimada através do GPR e foi utilizada na estimativa do conteúdo volumétrico em água. Por outro lado, foi utilizada uma SEV para estimar a saturação em água. Combinando os resultados obtidos por ambos os métodos, estimou-se a salinidade da água subterrânea de um aquífero superficial, livre de argila.

O método é aplicado a um conjunto de dados provenientes de um aquífero arenoso na área de Aswan, Egipto. Os resultados obtidos indicaram que a técnica é eficaz, uma vez que a salinidade da água subterrânea estimada foi de cerca de 1.152 mg/l, enquanto a salinidade da água subterrânea estimada a partir de análise de uma amostra de água é de cerca de 950 mg/l. Os valores obtidos pela análise das diagrfias nos troços de tubo-ralo também foram notavelmente semelhantes. O método tem como principal limitação a sua utilização encontrar-se restringida a profundidades relativamente pequenas, à necessária ausência de argila nas formações aquíferas que permita a aplicação directa da Lei de Archie e ao facto de ser necessário partir do princípio que os parâmetros petrofísicos estimados são válidos à escala regional.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Khalil et al. (2010) consistiu no processamento e análise de todas as diagrfias. Realizou igualmente todos cálculos e estimativas associadas às mesmas e colaborou na correlação dos dados com a geofísica de superfície. Efectuou igualmente uma análise crítica aos resultados obtidos.

2.10. Considerações finais

A realização de diagrfias em sondagens mecânicas para estudos de Hidrogeologia tem particular utilidade na execução de sondagens de captação de água, na medida em que estas permitem uma escolha mais criteriosa da localização de tubos-ralos nas

colunas definitivas de captações, ajudam a interpretação das informações litológicas fornecidas pelos sondadores e permitem, não só a caracterização das formações geológicas em profundidade, como também complementam a extrapolação de dados geofísicos obtidos à superfície.

As diagrfias, ao permitirem um registo contínuo de algumas propriedades das formações geológicas constituem informação mais fiável e de informação mais duradoura do que uma simples amostragem a diferentes profundidades escolhidas por vezes quase aleatoriamente. Por outro lado, no caso desta última ser necessária, proporcionam uma escolha mais criteriosa das profundidades a que ela deva ser realizada. No caso de existir um conjunto apreciável de sondas à disposição e o factor financeiro não for determinante, pode obter-se informação cientificamente muito relevante e cuja aquisição pode nem ser objectivo à partida. Pela unicidade da informação adquirida e para que esta possa ser efectivamente utilizada em pleno, será necessário efectuar o registo de informação auxiliar que aparentemente nem tenha grande aplicação, nem tenha importância para os objectivos iniciais da realização das diagrfias.

Neste capítulo mostrou-se o quanto uma campanha de diagrfias bem planeada, muitas vezes em conjunto com informação proveniente de geofísica de superfície, contribui para uma melhoria significativa da qualidade da informação geológica e hidrogeológica disponíveis e para a resolução de alguns problemas específicos. Descreveram-se também algumas das principais aplicações de diagrfias convencionais em estudos de Hidrogeologia e o modo como estas se efectuam, designadamente a nível de equipamento a utilizar e cuidados a ter na aquisição de dados e na interpretação dos mesmos, consoante os parâmetros a medir ou o ambiente geológico em que os trabalhos são feitos. A realização de diagrfias permite ainda a obtenção de parâmetros físicos *in-situ* das formações geológicas e dos fluidos atravessados pelas sondagens e estimar outros a partir destes. Exemplos disso são a resistividade eléctrica, parâmetro determinado directamente a partir de uma sonda com características específicas, e a porosidade, parâmetro estimado a partir dos dados de várias sondas, podendo estas ser eléctricas, nucleares ou acústicas. Estes parâmetros permitem por sua vez obter valores que vão dar informações importantes para a caracterização prévia a nível hidroquímico dos fluidos que a sondagem mecânica irá captar e dar indicações do modo como estes se comportam hidráulicamente no aquífero.

As aplicações mencionadas neste capítulo foram relacionadas com a experiência profissional da autora e ilustraram as potencialidades e limitações da utilização de diagrfias convencionais em diversas situações geologicamente distintas e com diferentes condições físicas da sondagem e da respectiva coluna de fluido. Para as situações referidas, foram descritos alguns objectivos fundamentais na sua utilização, tanto ao nível da decisão do entubamento das sondagens, como numa fase posterior de diagnóstico de situações que se revelaram complicadas e de difícil resolução. Além disso, foram discutidas as dificuldades de aplicação das várias sondas, bem como as vantagens da sua utilização em diferentes circunstâncias e o modo como esta deve ser feita. Este capítulo mostrou que dos resultados da aplicação das diagrfias em sondagens mecânicas de captação de água subterrânea se podem retirar boas informações acerca de várias características das formações geológicas e dos fluidos

que elas contêm e eventualmente utilizar esta informação para a estimativa de outros parâmetros de relevo em Hidrogeologia ou utilizá-la como informação adicional para correlação com dados de geofísica de superfície.

Tal acontece porque a utilização de algumas diagrfias permite extrapolações quer verticais quer horizontais de características e parâmetros físicos de formações geológicas atravessadas pelas sondagens, o que pode igualmente ajudar à localização para novas sondagens. Podem igualmente ser o único método para interpretar informação em sondagens antigas ou sem qualquer tipo de registo anterior e, por repetição, obter informações quanto à evolução no tempo de propriedades das formações, dos fluidos existentes nas sondagens e das próprias sondagens.

Dentre as utilizações das diagrfias em Hidrogeologia, tiveram especial destaque neste capítulo as identificações litológicas e correlações estratigráficas, identificação das zonas de alteração e fracturação, identificação de camadas aquíferas, detecção de fracturas, estimativa da qualidade da água nativa e estimativa de parâmetros hidráulicos de aquíferos. A qualidade e rigor dos resultados dependem do tipo de sondas utilizadas e dos parâmetros que elas medem, uma escolha ditada por motivos financeiros, pelas condições físicas da sondagem que restrinjam as aplicações de algumas sondas ou por disponibilidade momentânea de equipamento. Por isso, foram feitas abordagens distintas ao modo de interpretar os resultados de vários parâmetros consoante os objectivos pretendidos. Estas abordagens mostraram que, em algumas circunstâncias, mesmo a aquisição de um número reduzido de parâmetros pode fazer a diferença para uma captação de sucesso a nível de caudais extraídos e da qualidade química da sua água. Este facto é de considerável relevância no momento da crise financeira que o país atravessa, pois mostra-se aqui que em algumas circunstâncias mesmo a interpretação de um número reduzido de parâmetros poderá ser fundamental no sucesso final de uma captação de água. A análise custo-benefício em que foi possível quantificar este último devido à interpretação cuidada de diagrfias tecnicamente bem executadas, mostra bem estas potencialidades.

A partir da leitura deste capítulo, pela diversidade de situações abordadas e pelos diferentes modos de extrair informação a partir de diagrfias convencionais, facilmente se conclui que seria possível uma melhoria significativa da qualidade do serviço prestado pelas empresas de captação de água subterrânea especialmente em zonas sedimentares multicamada, caso fosse obrigatória por lei a realização de diagrfias. Como foi visto no presente capítulo, mesmo a utilização da sonda tecnologicamente mais simples que mede em simultâneo o SP, SPR e a radiação gama natural poderá ser uma mais-valia significativa na interpretação da sondagem e em última análise na preservação do aquífero como um todo, na medida em que não só se conseguiria informação acerca de zonas aquíferas mais favoráveis, como também acerca das zonas cuja água nativa possuísse melhores características. Esta informação poderá ser incorporada em modelos hidrogeológicos que ajudem a compreender o comportamento dos sistemas aquíferos. Em zonas compactas e cristalinas, as diagrfias também são importantes na localização de fracturas que contribuam para a produtividade de uma captação e na identificação das espessuras das zonas de alteração, onde muitas vezes se colocam os tubos-ralos. Desta forma, perante situações geológica e ambientalmente distintas, as diagrfias tornam possível a realização de uma escolha tecnicamente mais fundamentada para as profundidades

da colocação dos tubos-ralos e respectiva espessura, contribuindo para a preservação dos aquíferos, não só a nível extractivo, como também a nível ambiental, uma vez que ao caracterizar os vários tipos de fluido que a captação contém, permitem evitar pôr em contacto formações geológicas com água nativa de mineralizações significativamente diferentes.

3. Utilização de diagrfias na componente cartográfica da Geotermia

3.1. Objectivos do capítulo

Este capítulo tem como objectivo principal dar uma perspectiva global do modo como são utilizadas diagrfias de Temperatura em sondagens mecânicas no estudo de parâmetros geotérmicos e da forma como são aplicados os resultados das análises químicas efectuadas em água proveniente das mesmas no estudo das características térmicas da crosta. Neste trabalho, dá-se especial ênfase à componente cartográfica da Geotermia, bem como a toda a informação necessária para caracterizar a temperatura dos fluidos e das formações adjacentes das sondagens mecânicas, estimando a mesma para profundidades da ordem de quilómetros. Para se poder proceder à realização de mapas, é necessário estabelecer critérios de uniformidade para os vários parâmetros utilizados, uma vez que as fontes de informação são consideravelmente díspares, e, como tal, a qualidade da informação é também substancialmente diferente. Assim, neste capítulo é feito um resumo de toda a actividade de investigação em Geotermia ao logo dos últimos 30 anos, abordando os vários tipos de dados utilizados e é feita uma análise crítica da sua qualidade e da forma como transmitir essa informação inequivocamente à comunidade científica. É mostrada cartografia de Portugal Continental referente à densidade de fluxo de calor à superfície, temperaturas a 500, 1.000 e 2.000 m, importantes para estudos de geotermia à escala regional ou nacional. Para fins de estudos de climatização genéricos é feito um zonamento do país em unidades de fluxo de calor, dependendo dos valores médios deste e das características geológicas regionais. Além disso, com o exemplo de S. Pedro do Sul, é feita a análise de uma anomalia geotérmica local a nível destes parâmetros.

3.2. Introdução

A utilização de informação proveniente de diagrfias de Temperatura tem na Geotermia um campo de aplicação específico. Este tipo de diagrfias constitui uma base reconhecida para a obtenção de outros parâmetros geotérmicos relevantes para o conhecimento sistemático dos fluidos em profundidade e da estrutura interna da crosta, necessários à modelação geotérmica (Kappelmeyer e Haenel, 1974). Por sua vez, esta modelação geotérmica é necessária na realização de projectos de investigação relacionados com Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS) que requerem informação a profundidades da ordem de quilómetros, ou ainda em projectos de geotermia clássica de baixa e muito baixa entalpia, com profundidades de investigação bastante inferiores, localizados em zonas geotermicamente anómalas, como é o caso de Chaves (Duque et al., 1998) ou S. Pedro do Sul (Correia et al., 1997). Para se proceder à caracterização geotérmica de um local, a grandeza fundamental a estudar é a densidade de fluxo de calor à superfície (DFC). Esta é calculada multiplicando o gradiente geotérmico médio obtido numa sondagem mecânica (obtido através da realização de diagrfias de Temperatura com a sondagem em equilíbrio térmico) pela condutividade térmica efectiva das formações por ela atravessadas. A estimativa de temperaturas a profundidades específicas é feita a partir da extrapolação dos valores da temperatura medida em sondagens mecânicas para profundidades não atingidas por estas, onde a produção de calor das formações rochosas tem também um papel fundamental (Haenel e Staroste, 1988).

A qualidade da informação da DFC obtida ao longo de várias décadas não é toda igual. Alguma informação pode considerar-se rigorosa, outra é simplesmente obtida com valores retirados da literatura ou até com métodos alternativos. Mas, pela sua escassez, toda essa informação acaba por ser incorporada em bases de dados internacionais. Por isso, é necessário o estabelecimento de critérios de aceitação e rejeição de dados. Para tal, é preciso uma avaliação da sua qualidade quando estes são aceites, através de uma actualização da revisão da informação existente de DFC obtida através dos vários métodos geralmente utilizados. Assim, é feita uma revisão crítica dos dados de DFC obtidos pelo método tradicional consistindo na aplicação da equação de Fourier (Jessop, 1990), provenientes de sondagens mecânicas realizadas para geotecnia, pesquisa mineira, petróleo, água e ainda sondagens termométricas, relativamente aos dois parâmetros que compõem a equação. Um deles, o gradiente geotérmico, tal como já foi referido, é obtido a partir das diagrfias de Temperatura realizadas na coluna de fluido das sondagens mecânicas em equilíbrio térmico. O outro, consiste na condutividade térmica obtida a partir de ensaios em testemunhos das sondagens ou valores retirados da literatura. Nas zonas onde há escassez de informação adquirida com base em sondagens mecânicas, é possível a utilização do geotermómetro da sílica (Truesdell, 1976) aplicado a águas captadas em sondagens cujas características químicas permitem inferir a sua origem profunda. No entanto, e porque este é um método a utilizar apenas nos casos em que, por motivos que se prendem com a geologia da área, há escassez de sondagens mecânicas com características adequadas a este tipo de estudos, é feita uma análise crítica dos resultados obtidos. Apresenta-se neste capítulo a actualização do mapa da DFC à

superfície em Portugal Continental, sendo igualmente mapeada a qualidade de todos os dados considerados de acordo com os critérios de qualidade previamente mencionados. Com a informação da DFC e da produção de calor nas rochas determinada a partir de amostras de rocha ou de valores retirados da literatura é igualmente feita uma actualização dos mapas de temperaturas a diferentes profundidades. Nesta dissertação, escolheram-se as temperaturas às profundidades de 500, 1.000 e 2.000 m, por serem as que foram objecto de publicação à escala europeia nas várias edições dos Atlas de Recursos Geotérmicos (Heanel e Staroste, 1988; Hurter e Haenel, 2002), mas, de acordo com os objectivos, é possível elaborar mapas para profundidades superiores. Foi igualmente feito um zonamento de DFC para Portugal Continental baseado nos valores de DFC obtidos pelos diferentes métodos e características geológicas e estruturais do país para estudos relacionados com climatização.

3.3. O estudo da densidade de fluxo de calor (DFC) à superfície em Portugal

Os estudos com o objectivo de estimar a DFC e outras grandezas físicas a ela associadas, envolvendo a realização de diagrfias de Temperatura em sondagens mecânicas, tiveram o seu início em Portugal Continental nos finais da década de 1970. Desde então, apenas em alguns casos a informação proveniente de diagrfias de Temperatura e sondagens mecânicas foi direccionada desde o início especificamente para a Geotermia. Na maior parte dos casos, esta tem beneficiado de trabalhos investigação, prospecção ou pesquisa efectuados com outros objectivos. De início, os estudos realizados diziam essencialmente respeito a medições de temperatura e/ou determinação de gradientes geotérmicos em sondagens mecânicas mineiras, de água e de pesquisa de petróleo, designadamente realizadas por Correia et al. (1982), Camelo (1987a; 1987b), Almeida (1992), Duque (1991) e Duque e Mendes-Victor (1993). Até 1996, a exploração mineira facilitou o estudo geotérmico de uma quantidade relativamente grande de sondagens mecânicas, em especial na Zona Sul-Portuguesa, não só pela sua profundidade, mas também pelo facto da maioria dos seus testemunhos serem preservados pelas entidades que os realizaram e entregues para arquivo nas litotecas dos antigos Serviço de Fomento Mineiro (SFM) e Instituto Geológico e Mineiro (IGM), actualmente LNEG, localizadas em S. Mamede de Infesta, Alfragide e na Mina da Apariz. Este facto permitiu logo desde então a realização posterior de medidas de condutividade térmica das formações atravessadas pelas sondagens mecânicas em que só existam dados de temperaturas em profundidade (Camelo, 1987b, Duque, 1991; Almeida, 1993). Apenas em 1996 foram recuperadas duas sondagens mecânicas para serem estudadas exclusivamente com fins geotérmicos, passando por isso a denominar-se sondagens termométricas, uma delas localizada nas proximidades de Évora e outra em Ferreira do Alentejo (Ramalho, 1996). Mais recentemente, e dada a escassa densidade de sondagens mecânicas profundas no Maciço Hercínico, optou-se nesta zona por aplicar geotermómetros a águas de circulação comprovadamente profunda, pela sua temperatura de emergência ou pelo seu quimismo (Cruz et al., 1996), e incorporá-los na informação geral.

A Fig. 3.1 mostra a localização dos pontos onde foram efectuadas medições para estimativas de DFC em Portugal Continental, bem como a respectiva proveniência e sua distribuição geográfica nas unidades tectono-estratigráficas. Estes pontos ascendem a 209 e a sua proveniência divide-se em sondagens geotécnicas, mineiras, de água, de petróleo, termométricas e ocorrências termais.

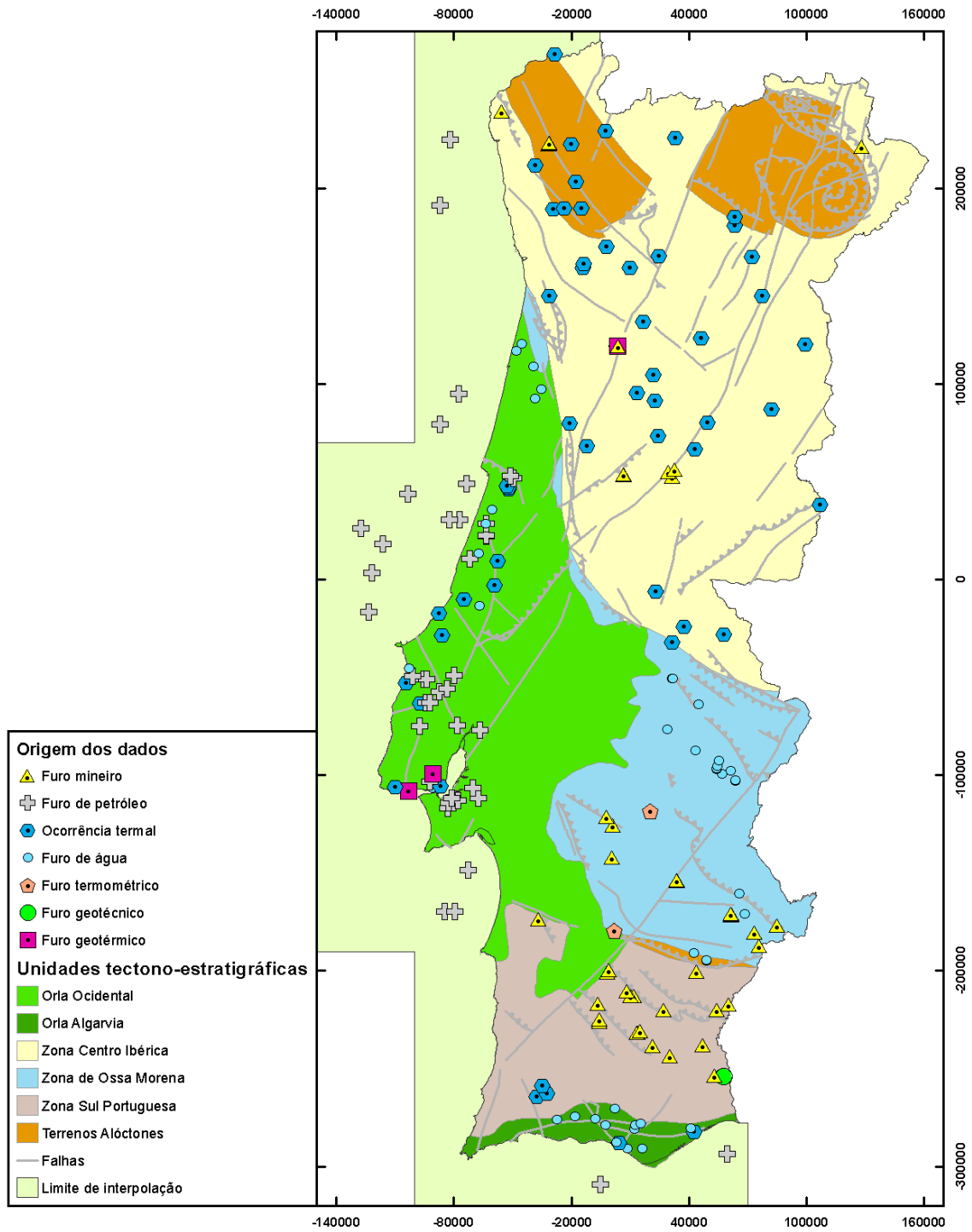


Fig. 3.1 – Localização dos 209 pontos onde foram efectuadas medidas para estimativas de DFC em Portugal Continental, respectiva proveniência e distribuição geográfica nas unidades tectono-estratigráficas.

A variedade das fontes dos dados de Geotermia, superior a 30, tornou necessária a sua homogeneização através de compilação, análise, processamento e apresentação, sob a forma de tabelas e mapas, dos dados geotérmicos reunidos até 1996 em publicações científicas ou relatórios internos de várias instituições portuguesas que se dedicam, ou dedicaram devido às suas competências institucionais e vocação científica, a estudos desta natureza. Estas instituições consistiram, numa primeira fase, apenas na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) e no ex-Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) e posteriormente a Universidade de Évora (UE) passou igualmente a trabalhar nessa área.

Finalmente em 1995, o ex-IGM passou a dedicar-se não só à aquisição de informação, como também ao trabalho de homogeneização dos dados das restantes instituições, mercê das competências institucionais que lhe foram atribuídas aquando da sua criação em 1992. Assim, na sequência da assinatura do contrato com o Niedersachsishes Landesamt für Bodenforschung (Geological Survey) Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (NLfB-GGA) de Hannover, para integrar a contribuição Portuguesa referente a Portugal Continental do “Atlas of Geothermal Resources in Europe” (Hurter e Haenel, 2002) foi possível uma análise integrada de toda a informação existente e dispersa, que tinha sido desenvolvida ao longo dos anos anteriores.

Este projecto obrigou a uma procura e revisão cuidadosa de todos os dados existentes de determinações de temperatura em profundidade em sondagens mecânicas e estimativas de DFC. A tarefa revestiu-se por vezes de grande dificuldade, pela multiplicidade de fontes com graus de rigor e informação de base variados. Em alguns casos, os dados originais das diagrfias de Temperatura, essenciais para a sua determinação, perderam-se e noutros a sua recuperação rigorosa era praticamente impossível. Além disso, as coordenadas eram por vezes vagas e sem rigor geográfico, não havendo qualquer referência ao sistema de coordenadas e *datum* utilizados. Estes factores implicam que esta informação apenas possa ser utilizada em estudos de carácter regional. Para investigações geotérmicas de carácter local a abordagem é obrigatoriamente diferente, mais rigorosa e com grau de detalhe superior, onde pelo menos não subsistam dúvidas acerca da localização geográfica das sondagens. Tornou-se então claro ser necessário iniciar e desenvolver uma base de dados geotérmicos para Portugal Continental (Ramalho, 1999), que contemplasse os dados já existentes, publicados e por publicar, de forma a reunir toda a informação disponível de diferente qualidade, que foi recolhida e tratada por vários autores, dando origem à tabela da Fig. 3.2, que inclui informação relativa aos dados de cada proveniência referidos na Fig. 3.1. Ao longo destes anos, têm sido várias as solicitações informais para a cedência e utilização dos dados coligidos, bem como explicações detalhadas acerca do modo como foram obtidos, analisados e processados. Estas solicitações têm tido origem em diversas áreas, como investigação em processos de climatização ambiental ou estudos ligados a Reologia. Em conformidade, a base de dados tem sido adaptada de forma a dar resposta às questões que têm sucessivamente vindo a ser colocadas. Além do mais, para a promoção de investimentos em projectos que visam

a construção de instalações geotérmicas em Portugal Continental é de todo interesse um conhecimento geotérmico do país actualizado e orientado para esse efeito.

FURO	TIPO	M	P	SIST./Datum	DATA FURO	PROF. FUR	INCLINAÇÃO	EMPRESA	COTA	C. MILITAR	LOCAL	REGIÃO	DATA MED	INTERVALO	Nº MEDIÇÃO	GRAD.	MED SD	MEDIOC
AC-5	água	-67150	13350				265 90°	A. Cavaco	100		284 Garcia	B. LITORAL	Nov. 96	40 a 220		37	13.0	26.7
JK-1	água	-63525	28375		?		231 90°	J. H. Keller	64		273 Envideira	B. LITORAL	Nov. 96	10 a 85		16	9.0	7.0
5RN	água	-39350	108625		Mar. 89		144 90°	DGRAH	42		185 Azurva	B. LITORAL	Nov. 96	55 a 73		5	9.0	11.9
RB1	água	-102796	-45465					INIMG	194		Batalha	ESTREMADI	Out. 90	160 a 400		25		
RB1	água	-102796	-45465					INIMG	194		Batalha	ESTREMADI	1987	10 a 400		40		
Capelas	água										Lourinhã	ESTREMADI	1987	10 a 310		30		
FM	água	-66894	-13624					?	130		Rio Maior	RIBATEJO	Out. 90	30 a 110		9	21.4	8.5
T7	geotecnica	57822	-253993		1984			DGRAH			Tunel de Bell	ALENTEJO	1987	10 a 110		15		
SDV2	geotérmico	4000	118879					SFM	177		138 S. P. do Sul	B. ALTA	Jun. 91	10 a 140		14	159.9	
SDM10	mineiro	61152	-170853		Ago. 88		541 90°	SFM	205		Enfermarias	ALENTEJO	Jun. 90	15 a 385		38		
SDM5	mineiro	61414	-171617		Jan. 88		504 90°	SFM	208		Enfermarias	ALENTEJO	Jun. 90	25 a 295		28		
SDM8	mineiro	61600	-171400		Abr. 88		469 90°	SFM	200		Enfermarias	ALENTEJO	Jun. 90	15 a 155		14		
SDSA2	mineiro	84986	-176872		Abr. 91		200 90°	SFM	280		514 Barrancos	ALENTEJO	Jun. 91	30 a 180		16	23.6	2.1
SDSA3	mineiro	84898	-176993		Mai. 91		294 90°	SFM	280		514 Barrancos	ALENTEJO	Jun. 91	70 a 290		23		
FS26	mineiro	-850	-199585		Jul. 85		560 85°	EDMA	170		Monte Azinh	ALENTEJO	Jul. 89	25 a 205		18	20.9	
FS25	mineiro	-1755	-201045		Jun. 85		340 87°	EDMA	187		Monte Russ	ALENTEJO	Jul. 89	55 a 265		22	19.5	6.0
CH1	mineiro	60036	-217415		Mai. 83		487 60° a 194° (v)	Billiton	117		Mértola	ALENTEJO	Jun. 90	35 a 285		26	24.3	7.1
OT1	mineiro	-5700	-224800		1982		354	Elf Aquitaine	227		Alperchina P	ALENTEJO	Jul. 89	25 a 345		33	26.9	7.6
AL1	mineiro	-5800	-226200		1982		432	Elf Aquitaine	230		Alperchina R	ALENTEJO	Jul. 89	15 a 155		15		
VC1	mineiro	47140	-238100		Mar. 86		660 90°	Billiton	165		Alcoutim	ALENTEJO	Jun. 90	35 a 385		36	21.7	5.0
PN2	mineiro	30120	-243660		Out. 85		866 90°	Billiton	250		Penedos - M	ALENTEJO	Jun. 90	75 a 485		42	21.3	5.0
NE26	mineiro	14797	-231136					Somincor	236		Lombador	ALENTEJO	Jun. 90	25 a 125		11	19.5	3.1
NE6	mineiro	13927	-231631		Out. 83		90°	Somincor	228		S. G. Padrão	ALENTEJO	Jun. 90	65 a 295		24	26.2	7.8
NE4'	mineiro	13876	-231700		Out. 85		522 90°	Somincor	226		S. G. Padrão	ALENTEJO	Jun. 90	55 a 145		10	25.5	9.2
CST1	mineiro	53000	-253720		Nov. 84		890	Billiton	110		Odeleite - C	ALENTEJO	Jun. 90	45 a 185		15	22.5	2.7

Fig. 3.2 – Excerto da base de dados de sondagens geotérmicas que pretende incluir toda a informação recolhida em Portugal Continental desde 1982, que actualmente contém 209 entradas.

Além da DFC e parâmetros relacionados, a base de dados inclui informação de relevo para tornar possível todo o processo de extrapolação de temperaturas para profundidades da ordem dos quilómetros, necessárias aos estudos de EGS ou de armazenamento de CO₂. Os campos principais que permitem a obtenção desses parâmetros encontram-se na Fig. 3.3 e são adaptados aos requisitos referidos em Jessop (1990).

A informação coligida, muito escassa de início, foi sendo sucessivamente publicada em Atlas de Recursos Geotérmicos Europeus actualizados com a informação existente na altura da elaboração da contribuição portuguesa para cada uma das edições (Haenel et al., 1980; Haenel e Staroste, 1988; Hurter e Haenel, 2002) e no Atlas Geotérmico da Europa (Hurtig et al., 1992), este último com a incorporação de 13 medidas de DFC. Como é fácil de verificar, o número de sondagens mecânicas estudadas foi aumentando sucessivamente a cada edição e o modo de seleccionar os dados de DFC foi progressivamente seguindo padrões mais bem definidos e rigorosos.

Assim, para a publicação de Correia et al. (2002) in Hurter e Haenel (2002) foi efectuada uma revisão exaustiva dos trabalhos efectuados por Haenel et al. (1980), Correia et al. (1982), Camelo (1987a; 1987b), Correia et al. (1988) in Haenel e Staroste (1988), Almeida (1992), Duque (1991), Duque e Mendes-Victor (1993) e Fernandèz et al. (1995). Essa revisão exaustiva, efectuada à escala Ibérica, foi publicada em Fernandèz et al. (1998) com a selecção de sondagens a seguir os mesmos critérios em Portugal e Espanha.

Nessa perspectiva, também desde a publicação do último Atlas (Hurter e Haenel, 2002), têm também vindo a ser feitas actualizações sucessivas aos dados de DFC e respectivas alterações nos correspondentes mapas (Correia e Ramalho, 2005; Correia e Ramalho, 2010) a partir dos dados de diagrfias de Temperatura. Foram igualmente

publicadas outras actualizações, incorporando estimativas de DFC a partir de geotermómetros da sílica aplicados a águas de circulação profunda, cujas características químicas sejam adequadas à estimativa de DFC (Correia e Ramalho, 2009).

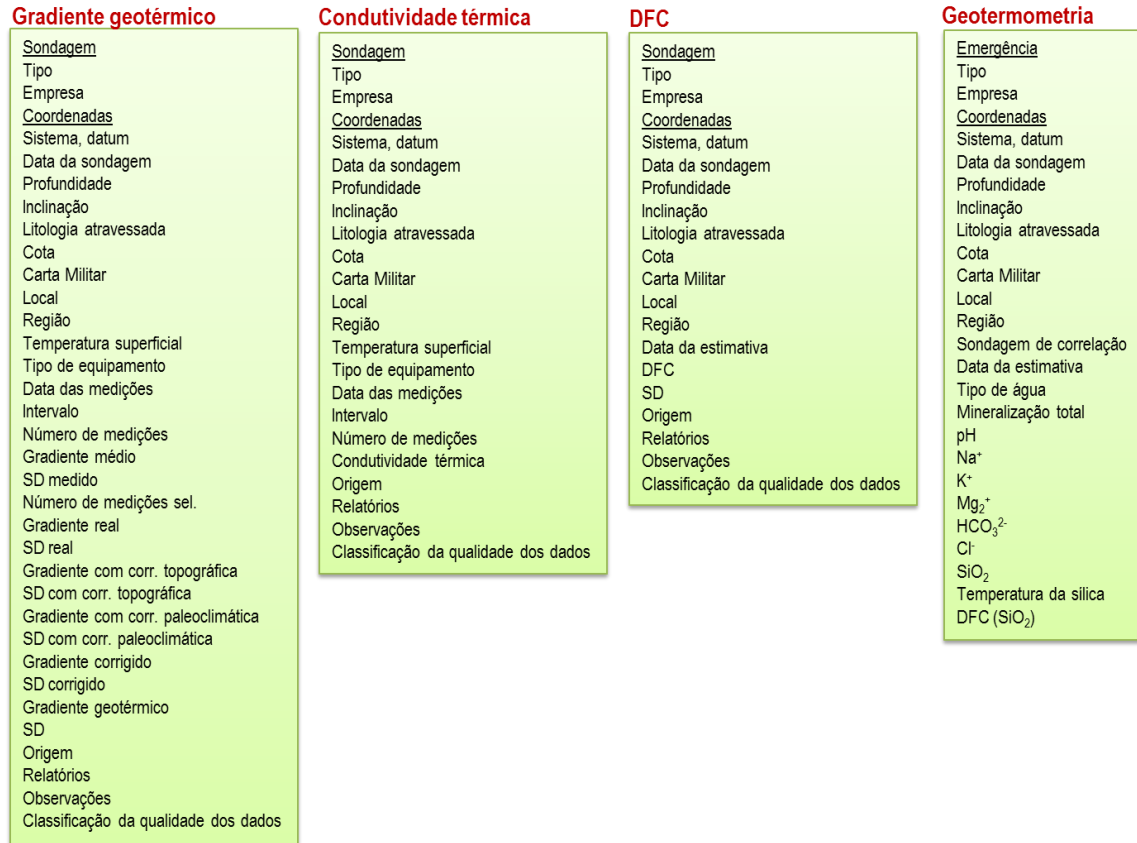


Fig. 3.3 – Campos da base de dados de Geotermia (Ramalho, 1999).

3.4. Estimativa do gradiente geotérmico

A extrapolação dos valores da temperatura medida em sondagens mecânicas para profundidades não atingidas por estas é feita recorrendo inicialmente a estes parâmetros. Por este motivo, a sua determinação ou estimativa reveste-se de grande importância, bem como a noção de qual o grau de rigor com que esta é efectuada.

Como já foi referido, em Geotermia, a grandeza fundamental a caracterizar é a DFC (q). Esta é calculada multiplicando o gradiente geotérmico médio (grad T) obtido numa sondagem mecânica pela condutividade térmica efectiva (k) das formações por ela atravessadas, de acordo com a equação Fourier (eq. 3.1) (Jessop, 1990)

$$q = - k \text{ grad } T \tag{3.1}$$

em que q é a DFC à superfície (Wm⁻²), k é a condutividade térmica das formações (Wm⁻¹K⁻¹) e grad T é o gradiente geotérmico médio (K/m ou °C/km).

O gradiente geotérmico, grad T, é uma medida da variação da temperatura com a profundidade. Ainda que no sistema internacional (SI) de unidades, a unidade seja K/m (kelvin por metro), normalmente, a unidade prática utilizada é °C/km (grau Celsius por quilómetro). De maneira geral, e em termos médios, na Terra a temperatura aumenta com a profundidade cerca de 1 °C por cada 30 metros (Jessop, 1990), valor que contudo varia de ponto para ponto. Devido a estas variações regionais e locais, a determinação do gradiente geotérmico médio é de grande importância na avaliação das potencialidades geotérmicas de qualquer região ou local, uma vez que o seu conhecimento permite o cálculo aproximado da profundidade dos reservatórios geotérmicos. O gradiente geotérmico reflecte, de maneira quantitativa, a variação da temperatura com a profundidade, a qual depende quer de factores locais (topografia, vegetação), quer do tipo de formações geológicas presentes, quer ainda da história geológica e do clima da região (Jessop, 1990).

Se o tempo que decorre entre a paragem da perfuração e a realização da diagrafia da Temperatura for suficientemente longo, as temperaturas medidas no fluido são representativas da temperatura das formações rochosas atravessadas pela sondagem mecânica. Nessa situação, as formações geológicas da sondagem atingem o equilíbrio térmico um período de repouso após a paragem da circulação das lamas, podendo este considerar-se representativo do gradiente geotérmico médio no local. Alguns autores referem 30 dias de repouso como o tempo suficiente para a estabilização completa de uma sondagem (Leblanc et al., 1981). No entanto, para efeitos de trabalho, tal é frequentemente inexequível, pelo que por vezes este não ultrapassa a 12 horas, o que é de evitar. Se o equilíbrio térmico é atingido no interior da sondagem, o gradiente geotérmico pode ser estimado recorrendo à diagrafia de temperatura através da eq. (3.2):

$$\text{grad. T (K/m)} = \frac{\Delta T}{\Delta z} = \frac{T_{z_i} - T_{z_{(i-x)}}}{x} = \frac{T_{z_i} - T_{z_{(i-x)}}}{z_i - z_{(i-x)}} \quad (3.2)$$

onde ΔT é a variação de temperatura medida no desnível Δz , T_{z_i} é a temperatura à profundidade z_i , $T_{z_{(i-x)}}$ é a temperatura à profundidade $z_{(i-x)}$ e x é a distância entre duas leituras de temperatura consecutivas.

3.4.1. Em sondagens mineiras, de água, termométricas e geotérmicas

O cálculo do gradiente geotérmico em sondagens mineiras e de água foi realizado com termistores calibrados através de medições de temperatura ao longo das mesmas, a profundidades bem definidas (Correia et al., 1982; Duque, 1987; Camelo, 1987b; Duque, 1991; Duque e Mendes-Victor, 1993) e resistências de platina (Almeida, 1992). Contudo, em algumas das sondagens (Correia et al., 1982; Almeida, 1992), mesmo com tempos de paragem longos, a distribuição dos valores da temperatura em profundidade indicia a existência de circulação de água subterrânea, a qual é traduzida por irregularidades acentuadas na distribuição vertical da temperatura nos troços medidos (Conaway, 1987).

Assim, seguindo uma metodologia comum em todos os dados da Península Ibérica, publicados posteriormente em Fernandèz et al. (1998), foram rejeitadas todas as sondagens mecânicas que apresentassem um erro relativo superior a 45% no cálculo do gradiente geotérmico médio, após exclusão dos valores de temperatura correspondentes a oscilações mais acentuadas na distribuição da temperatura com a profundidade, relacionados com a influência da temperatura superficial e muito especialmente com entradas e/ou saídas de água nas sondagens, muito localizadas. Por outro lado, desde que um troço da distribuição da temperatura em profundidade numa dada sondagem apresente um mínimo de 6 valores medidos ao longo pelo menos de 100 m e um erro relativo no cálculo do gradiente inferior a 45%, ele foi seleccionado como aceitável e o valor do grad. T foi utilizado para o cálculo da DFC. Nas sondagens inclinadas, a inclinação e em alguns casos, a respectiva variação foram tomadas em consideração no cálculo do gradiente geotérmico médio, para que as temperaturas medidas ao longo da sondagem fossem convertidas em temperaturas reais segundo a direcção vertical.

Aquando da interpretação das diagrfias de Temperatura é importante avaliar a possível existência de convecção térmica no interior da sondagem, a qual pode perturbar de maneira significativa e de uma forma irregular o gradiente geotérmico local. As diagrfias de Temperatura e do Gradiente Geotérmico poderão dar informação em escala detalhada acerca dos movimentos do fluido no interior de uma sondagem mecânica, incluindo os pontos de entrada e saída de água (Conaway, 1987; Förster e Merriam, 1999). Além disso, refere-se a existência de um gradiente geotérmico crítico, acima do qual é possível a existência de convecção térmica, que é afectado pelas propriedades do fluido e pelas características térmicas da formação, pela temperatura e pelo diâmetro da sondagem (Drury et al., 1984). Existe um gradiente geotérmico crítico que varia em função do raio da sondagem mecânica e da temperatura (Beck e Balling, 1988). As flutuações térmicas da ordem dos 0,01 °C na coluna de fluido podem originar movimentos no fluido com escalas que, normalmente, não excedem um pequeno número de vezes o diâmetro da sondagem (Gretner, 1967). Apesar de ser comum a existência de fluxo vertical, ascendente ou descendente, em que estas atravessam vários aquíferos ou fracturas que tenham diferentes potenciais hidráulicos, esta situação raras vezes dá origem a caudais suficientemente elevados para produzir uma diagrfia de temperatura constante (diagrfia isotérmica) (Keys, 1990) ao longo de toda a sondagem. Em zonas cársicas, no entanto, este efeito é muito comum, impossibilitando por vezes a sua utilização em áreas geográficas consideráveis, tal como pode ser verificado através de um exemplo de Ramalho et al. (2009) (Fig. 3.4), onde se vê ao longo de grande parte da sondagem um gradiente geotérmico próximo de zero.

O restabelecimento do equilíbrio térmico dentro de uma sondagem depende, igualmente, da condutividade térmica das formações por ela atravessadas. Uma comparação entre interpretação de diagrfias de Temperatura efectuadas em regime condutivo e convectivo encontra-se representada nas Figs. 3.5 e 3.6.

Actualmente têm-se temperaturas em profundidade obtidas em diagrfias de Temperatura em 94 sondagens mecânicas compiladas que satisfazem os critérios de

aceitação para as estimativas do gradiente geotérmico, o que pode considerar-se um considerável aumento em relação às 47 sondagens que foram integradas em Ramalho e Correia (2006), publicadas em Correia et al. (2002).

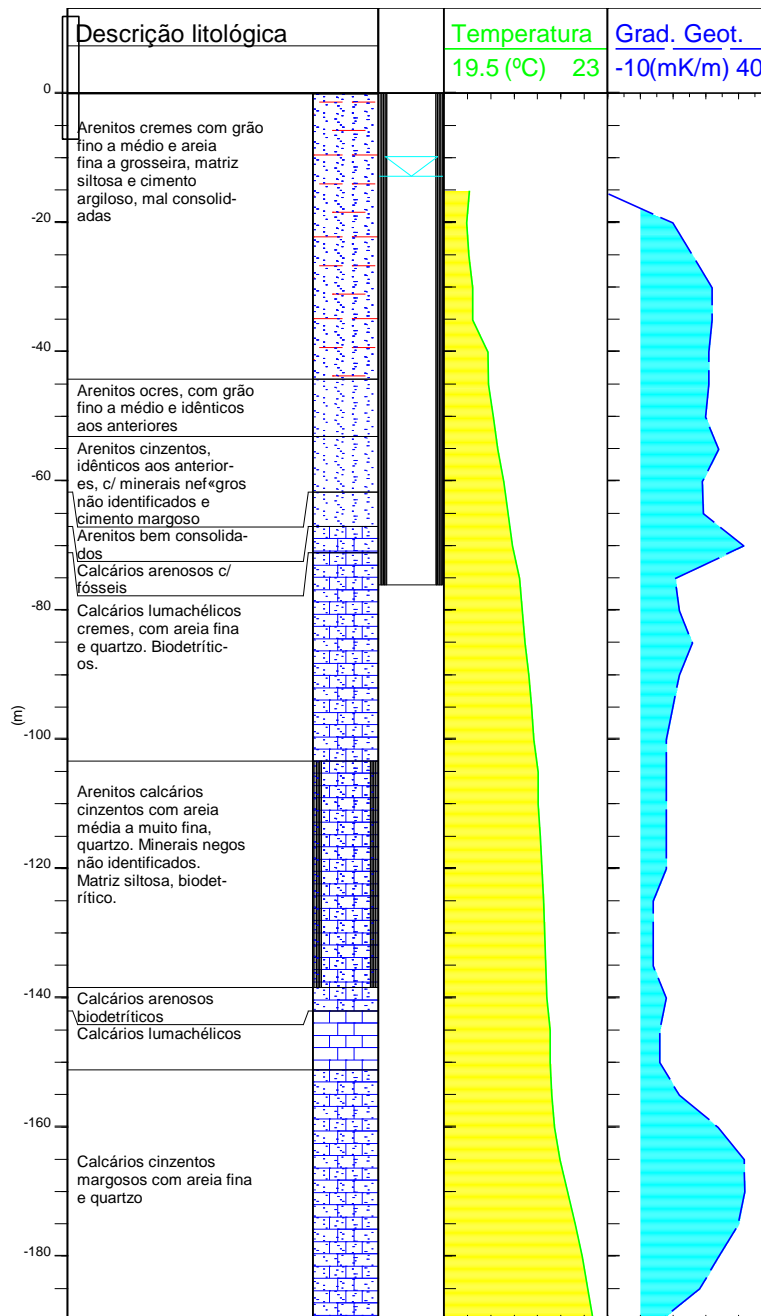


Fig. 3.4 – Diagramas de Temperatura e do Gradiente Geotérmico numa sondagem mecânica localizada no sistema aquífero da Campina de Faro (Ramalho et al., 2009). Até aos 70 m encontra-se a zona dominada por arenitos, com um gradiente geotérmico médio de cerca de 22 °C/km, estimado entre os 30 e os 70 m. A zona entre os 70 e 150 m apresenta circulação interna de água, motivo pelo qual o gradiente geotérmico desce para valores que, no troço entre os 125 e os 135 m, atingem próximo dos 0 °C/km, característico de zonas com intensa circulação de água, designadamente zonas cársicas, aumentando ligeiramente entre os 135 e os 150 m. Abaixo desta profundidade, está-se perante a coexistência de dois fenómenos. Por um lado, alterações na litologia fazem variar o declive da recta da temperatura em profundidade. Por outro lado, o facto de se estar próximo ao fundo da sondagem faz com que ocorram alterações na temperatura da coluna de fluido, resultantes de circunstâncias como, por exemplo, a existência de correntes de convecção térmica devidas à sua própria variação do diâmetro da sondagem.

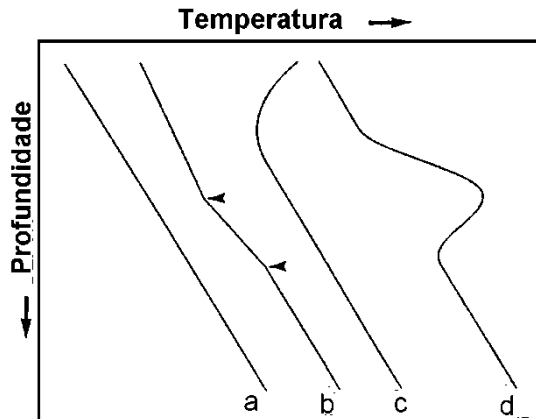


Fig. 3.5 – Diagramas ideais de temperatura em sondagens mecânicas em equilíbrio térmico (adaptado de Conaway, 1987).

Curva a – Distribuição de temperatura com a profundidade, sem qualquer tipo de perturbação. Neste caso, o gradiente geotérmico depende apenas da condutividade térmica da rocha.

Curva b – Sondagem mecânica que atravessa 3 formações diferentes com condutividades térmicas distintas.

Curva c – Efeito de uma fonte de calor superficial numa diagrama de Temperatura.

Curva d – Reacção exotérmica causada por cimentação do entubamento da sondagem.

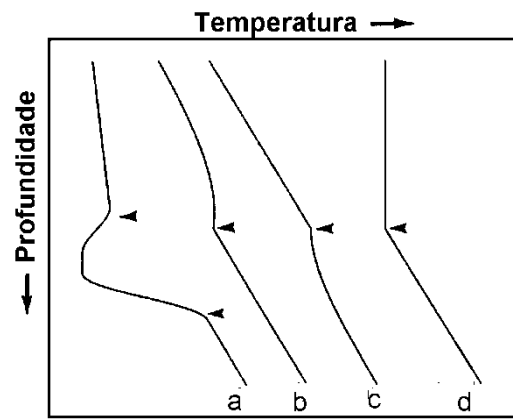


Fig. 3.6 – Diagramas ideais de temperatura em sondagens mecânicas que não se encontram em equilíbrio térmico (adaptado de Conaway, 1987).

Curva a – Zona permeável numa sondagem mecânica após um período de circulação de fluido a menor temperatura do que a água de formação.

Curva b – Efeito da entrada de líquido da formação numa sondagem, com circulação em sentido ascendente.

Curva c – Efeito da entrada de líquido da formação numa sondagem, com circulação em sentido descendente.

Curva d – Situação análoga à diagrama b, mas com o líquido da formação a fluir de maneira mais intensa.

Os critérios de aceitação ou rejeição de dados obtidos em cada uma das sondagens mecânicas na determinação do gradiente geotérmico, bem como o modo de estimativa da condutividade térmica das formações e da produção de calor são factores importantes para uma avaliação da qualidade da estimativa da DFC. Relativamente ao Gradiente Geotérmico, esta qualidade irá diferir de acordo com o tipo e número das medições de temperatura, bem como da detecção da existência ou não de circulação de água no interior da sondagem. São exemplos as sondagens referidas em Ferreira Gomes (2005) e Ferreira Gomes et al. (2008), localizadas em Penamacor, S. Pedro do Sul e Carvalhal e Gomes da Costa e Ferreira Gomes (2011), em Santa Comba Dão, realizadas em zonas de ocorrências termais concessionadas ou para concessionar, que no entanto não foram consideradas. Marrero Diaz (2012) estimou valores de DFC em sondagens profundas da zona de Lisboa, nomeadamente na sondagem geotérmica AC1-Balum, no Lumiar.

3.4.2. Em sondagens de pesquisa de petróleo

Nas bacias sedimentares portuguesas, o gradiente geotérmico foi determinado a partir de dados de temperatura de fundo de furo (*Bottom Hole Temperature, BHT*) obtidos em sondagens para pesquisa de petróleo. Estes foram recolhidos, analisados e

processados por Shell Prospex Portuguesa (1974), Camelo (1987a), Correia et al. (1988) e Duque (1991), utilizando o método proposto por Dowdle e Cobb (1975) quando existem vários valores de BHT para uma mesma profundidade com intervalo de algumas horas. Bernardes (2012) fez igualmente algumas estimativas na zona norte do *on-shore* da Bacia Lusitânica que não são aqui incluídas. Para corrigir as BHT é necessário que, para uma mesma profundidade, existam, pelo menos, dois valores de BHT (Dowdle e Cobb, 1975), o que nem sempre aconteceu. Na maior parte dos casos investigados por Camelo (1987a) apenas foi registado um valor de BHT, pelo que grande parte dos dados não foi incorporado na cartografia de DFC. Nas sondagens *off-shore*, a percentagem que foi utilizada por Camelo (1987a) para determinar o gradiente geotérmico médio foi de 42%. Neste trabalho, foram incorporados os dados de mais 17 sondagens *on-shore* e 14 sondagens *off-shore* que serviram de base ao relatório da Shell Prospex Portuguesa (1974), cujos cálculos originais foram gentilmente cedidos pelo Dr. João Telo Pacheco. Salienta-se que os gradientes obtidos por Camelo (1987a) e Shell Prospex Portuguesa (1974) para 7 sondagens *off-shore* medidos por ambos os autores são idênticos. Actualmente têm-se os dados de 38 sondagens petrolíferas.

Em algumas sondagens (Campelos-1, Benfeito-1, Sobral-1, Monsanto-1 e Barreiro-4) o gradiente geotérmico médio foi calculado por regressão linear, após interpolação entre valores de temperatura medidos a diferentes profundidades (Haenel et al., 1980). Mas tanto em Camelo (1987a) como em Shell Prospex Portuguesa (1974), o gradiente geotérmico foi estimado através do gráfico semi-logarítmico com origem na eq. (3.3)

$$T(t_e) = T_f + A^* \log \left(\frac{t_c + t_e}{t_e} \right) \quad (3.3)$$

em que T_f é a temperatura na zona não perturbada ($^{\circ}\text{C}$), t_c o tempo de circulação (h), t_e o tempo após paragem da circulação (h) e A^* é uma constante.

3.5. Condutividade Térmica

A condutividade térmica (k) é uma propriedade dos materiais que traduz a maior ou menor capacidade que eles têm de transmitir a energia calorífica por condução. No sistema SI a unidade é $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ sendo, contudo, frequente o uso da unidade prática $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$. No que diz respeito à sua determinação nas formações da sondagem, esta é feita de acordo com valores determinados analiticamente ou, na sua ausência, com recurso a tabelas publicadas (Cermak e Rybach, 1982). A ausência de dados das litologias atravessadas pelas sondagens é, no caso das sondagens hidrogeológicas, mais frequente do que seria desejável, pois no caso de sondagens antigas, a não obrigatoriedade de apresentação de relatórios imposta por legislação eliminava por completo toda e qualquer possibilidade de uma descrição litológica fidedigna.

A condutividade térmica dos materiais rochosos depende ainda de outros factores como sejam a composição mineralógica, a porosidade, o tipo de fluido que preenche os poros e a temperatura, para citar os mais importantes (Jessop, 1990). A

determinação de k é feita laboratorialmente. Por este motivo, em sondagens mecânicas realizadas com métodos de perfuração destrutivos, sem recuperação de testemunho, para estimar a condutividade térmica das formações rochosas atravessadas recorre-se, muitas vezes, a tabelas de valores de condutividade térmica de rochas do mesmo tipo das sondagens e para as quais há determinações laboratoriais de condutividade térmica (Cermak e Rybach, 1982). Esta metodologia origina, necessariamente, uma incerteza nos dados da condutividade térmica e consequentemente da DFC calculada a partir deles. É, contudo, frequente não ser possível, para muitas sondagens, obter testemunhos para realizar determinações laboratoriais daquela grandeza. Assim, em termos práticos, quando para uma sondagem não é possível obter valores da condutividade térmica medidos em testemunhos da própria sondagem, é hábito assumir que as formações por ela atravessadas apresentam condutividades térmicas idênticas às de rochas semelhantes que se encontrem relativamente perto da sondagem e para as quais existem valores experimentais da condutividade térmica. Para essa sondagem, essas condutividades térmicas recebem o nome de condutividades térmicas assumidas e esta será a designação adoptada neste trabalho.

Como foi referido anteriormente, para o cálculo da DFC é também comum utilizar a chamada condutividade térmica efectiva. Esta é calculada através de uma ponderação da condutividade térmica (laboratorial ou assumida) de cada uma das litologias atravessadas pela sondagem com as suas espessuras. A condutividade térmica efectiva, k , é calculada através da eq. (3.4)

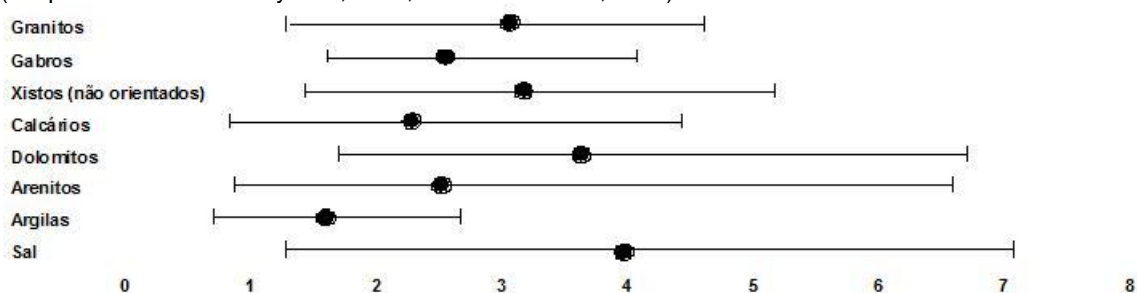
$$k_{\text{efectiva}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{k_i}} \quad (3.4)$$

onde o índice i corresponde aos diferentes materiais rochosos que a sondagem mecânica atravessa, Δz_i (m) é espessura da camada i , e k_i ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) é condutividade térmica do material dessa camada.

A determinação da condutividade térmica em testemunhos de sondagem foi feita com condutímetro da marca Showa Denko, modelo QTM-D2 e as medidas foram efectuadas em testemunhos provenientes de 12 sondagens (Correia et al., 1982; Camelo, 1987b; Duque, 1991; Almeida, 1993) e encontram-se em Ramalho e Correia (2006). Na ausência de dados para a determinação da condutividade térmica efectiva em bacias sedimentares, Haenel et al. (1980) recomendam a utilização do valor de $2,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Estas condutividades foram, assim, assumidas como representativas das formações geológicas portuguesas para as quais ainda não há determinações laboratoriais de condutividade térmica, especialmente no caso de sondagens petrolíferas das bacias sedimentares, ou estimativas de condutividade térmica efectuadas a partir de dados litológicos da própria sondagem e da literatura. Para as

sondagens mecânicas cujas colunas litológicas não se encontravam disponíveis, consideraram-se as condutividades térmicas assumidas utilizadas por Fernandèz et al. (1995) e aplicadas posteriormente em Fernandèz et al. (1998), seguindo o princípio de idênticos critérios de processamento para toda a Península Ibérica. A condutividade térmica efectiva atribuída a cada um das sondagens mecânicas foi calculada através da eq. (3.4). A pequena quantidade de medidas laboratoriais da condutividade térmica em testemunhos em sondagens com diagrfias de Temperatura efectuadas (Correia et al., 1982; Camelo, 1987a; Duque, 1991; Almeida, 1993) obrigou a que, na maioria das sondagens mineiras e de água utilizadas, o cálculo da condutividade térmica fosse realizado somente a partir das colunas litológicas e recorrendo a tabelas publicadas (Cermak e Rybach, 1982), a partir das quais Ramalho et al. (2009) simplificaram para a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condutividades térmicas médias e gamas de variação de algumas rochas mais comuns (adaptado de Cermak e Rybach, 1982, in Ramalho et al., 2009). Unidades em $Wm^{-1}K^{-1}$.



Para cada uma das sondagens, o cálculo da condutividade térmica consistiu sempre que necessário, na atribuição às diferentes litologias do valor médio da condutividade térmica medida em amostras de formações rochosas análogas, provenientes de sondagens mecânicas existentes nas proximidades. Assim, para a condutividade térmica de uma dada formação rochosa atravessada por uma sondagem mecânica utilizou-se ou (i) um valor medido laboratorialmente num testemunho obtido nessa sondagem mecânica ou (ii) o valor médio das condutividades térmicas medidas laboratorialmente em testemunhos de formações rochosas análogas atravessadas por outras sondagens portuguesas. As condutividades térmicas determinadas em algumas amostras de rocha portuguesas cujos valores foram usados nas estimativas de DFC encontram-se na Tabela 3.2.

Para as formações geológicas portuguesas para as quais não há qualquer valor laboratorial de condutividade térmica, utilizaram-se valores médios para rochas semelhantes obtidos a partir das tabelas de propriedades físicas de rochas (Cermak e Rybach, 1982). A qualidade desta informação incorporada na base de dados da Fig. 3.2 encontra-se dividida em condutividade efectiva medida em amostras de rocha (2), condutividade efectiva baseada em logs de sondagens (1) e condutividade assumida (0).

Tabela 3.2 – Condutividades térmicas em algumas amostras de rocha portuguesas (Almeida, 1993), cujos valores foram usados nas estimativas de DFC. Foram calculadas através de medidas laboratoriais da condutividade térmica de testemunhos de sondagem obtidos das sondagens OT1, AL1, FS25, FS26, S32 (respectivamente os números 113, 111, 119, 120 e 101 da Fig. 3.8) e ainda SDV-2, localizada em S. Pedro do Sul, cuja diagrfia de Temperatura não tornou possível a estimativa do gradiente geotérmico (ver Fig. 3.16). O valor médio corresponde à média aritmética dos valores obtidos em cada sondagem para a mesma formação (Ramalho e Correia, 2006).

Material	Número total de amostras medidas	Número de sondagens	Valor médio (W/mK)
Xistos e grauvaques	22	3	3,69
Xistos	2	1	3,03
Xistos negros carbonosos piritosos	1	1	4,16
Xistos com níveis de manganês	12	2	4,29
Rocha intrusiva básica	7	1	3,31
Complexo de tufitos violetas, verdes e xistos tufáceos cinzentos	4	1	5,41
Tufitos verdes	4	3	4,29
Tufos cinzento-esverdeados	11	1	3,65
Tufos cinzentos esverdeados muito silicificados	4	1	3,17
Tufos cinzentos-esverdeados, silicificados, cloritizados	1	1	3,29
Grauvaques	6	1	3,48
Filonetes de quartzo	1	1	3,07
Granito	1	1	3,40
Calcários dolomíticos	5	6	3,83
Dolomias mineralizadas	4	1	3,88
Calcários	3	1	3,42
Calcoxistos	2	1	3,56

3.6. Estimativa da Densidade de Fluxo de Calor à Superfície (DFC)

Na determinação da DFC em sondagens mineiras, de água ou termométricas admite-se que as formações por elas 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. Como já foi referido, em Geotermia, a DFC (q) é estimada multiplicando o gradiente geotérmico médio ($\text{grad } T$) obtido numa sondagem mecânica pela condutividade térmica efectiva ou assumida (k) das formações por ela atravessadas, de acordo com a equação Fourier (eq. 3.1) (Jessop, 1990) e varia com factores como idade tectónica, transição entre províncias de fluxo de calor, radioactividade crustal, alterações climáticas, microclimas, topografia, hidrologia e estrutura geológica.

A revisão actual da informação, após rejeição de dados com os critérios que se indicam de seguida, aponta para a distribuição das origens dos 131 pontos que se encontra na Fig. 3.7. A localização dos 131 pontos onde se estimou a DFC que se encontra na Fig. 3.8.

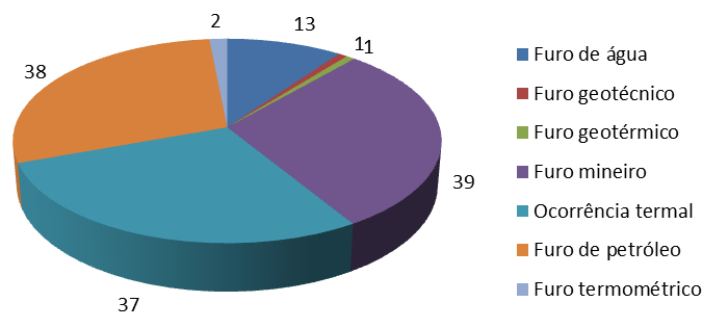


Fig. 3.7 – Distribuição das origens dos 131 pontos utilizados para estimativa de DFC.

No presente caso, a DFC foi calculada apenas para as sondagens mineiras, de água ou termométricas que se consideraram estar em equilíbrio térmico e sem evidência de circulação de água. As medidas contínuas de gradiente geotérmico permitem que eventuais medições de condutividade térmica estejam relacionadas com gradientes geotérmicos precisos, o que leva à realização de um grande número de estimativas de DFC a poderem ser feitas numa única sondagem e desta forma poder utilizar-se uma média ponderada para a sondagem na íntegra (Förster e Merriam, 1999). Além disso, uma vez que a DFC seja estimada numa sondagem, pode ser utilizada em zonas intermédias para a obtenção de uma melhor estimativa da condutividade térmica (Förster e Merriam, 1999).

Contudo, foram também consideradas como sondagens mecânicas adequadas para calcular a DFC, todas aquelas cuja variação da DFC fosse inferior a 5% quando efectuada a correcção de fluxo vertical de água, mesmo não tendo qualquer informação acerca dos valores de temperatura em profundidade. Por esse motivo, das sondagens provenientes de Duque (1991) e Duque e Mendes-Victor (1993), apenas foram seleccionadas as sondagens CD1, CV, NG1 e CVH1 (Correia et al., 2002), respectivamente números 107, 114, 122 e 126 na Fig. 3.8.

Das 47 sondagens mecânicas seleccionadas por Ramalho e Correia (2006) e publicadas em Correia et al. (2002) para a determinação da DFC, 30 eram sondagens de água ou de prospecção mineira, e 17 eram de pesquisa de petróleo. Houve, pois, desde então um aumento significativo da quantidade de dados disponível.

3.6.1. Em sondagens mineiras, de água, termométricas e geotérmicas

Em todas as sondagens mecânicas mineiras, de água, termométricas e geotérmicas, o valor da DFC foi calculado através da eq. (3.2) a partir dos gradientes geotérmicos médios e das condutividades térmicas efectivas ou assumidas e para o conjunto de dados, varia entre 42 e 115 mW/m². Nestes trabalhos, com os critérios de selecção de sondagens referidos anteriormente, os valores de DFC obtidos são consideravelmente

inferiores aos valores publicados em Duque (1991) e Duque e Mendes-Victor (1993), que atingia 219 mW/m² na sondagem mineira SDFA-1 (nº110, Fig. 3.8, Tabela 3.5), em Ferreira do Alentejo (Fig. 3.9, à esquerda) devido ao valor de gradiente geotérmico anormalmente elevado de 92 °C/km.

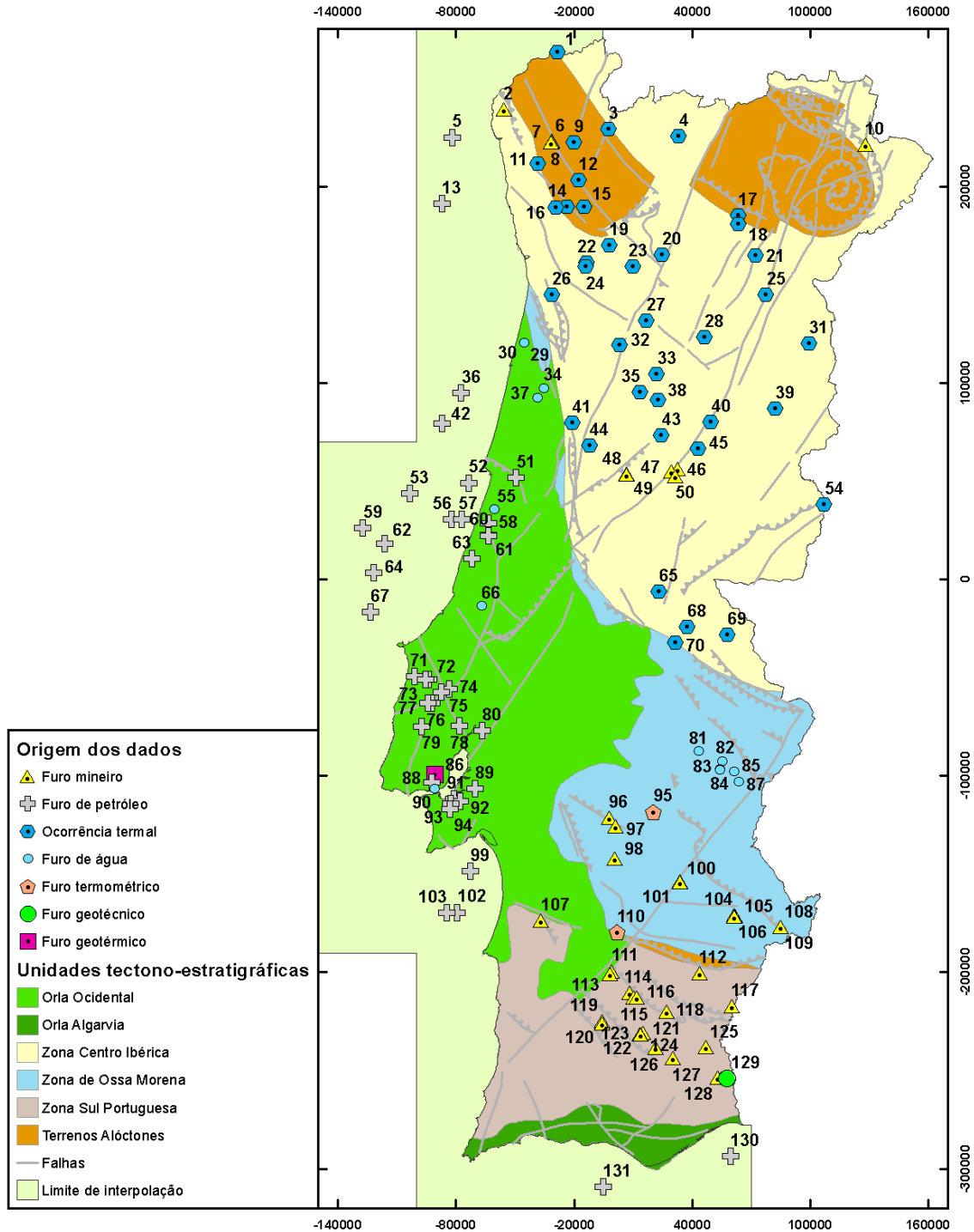


Fig. 3.8 – Localização dos 131 pontos de estimativa de DFC e respectiva proveniência.

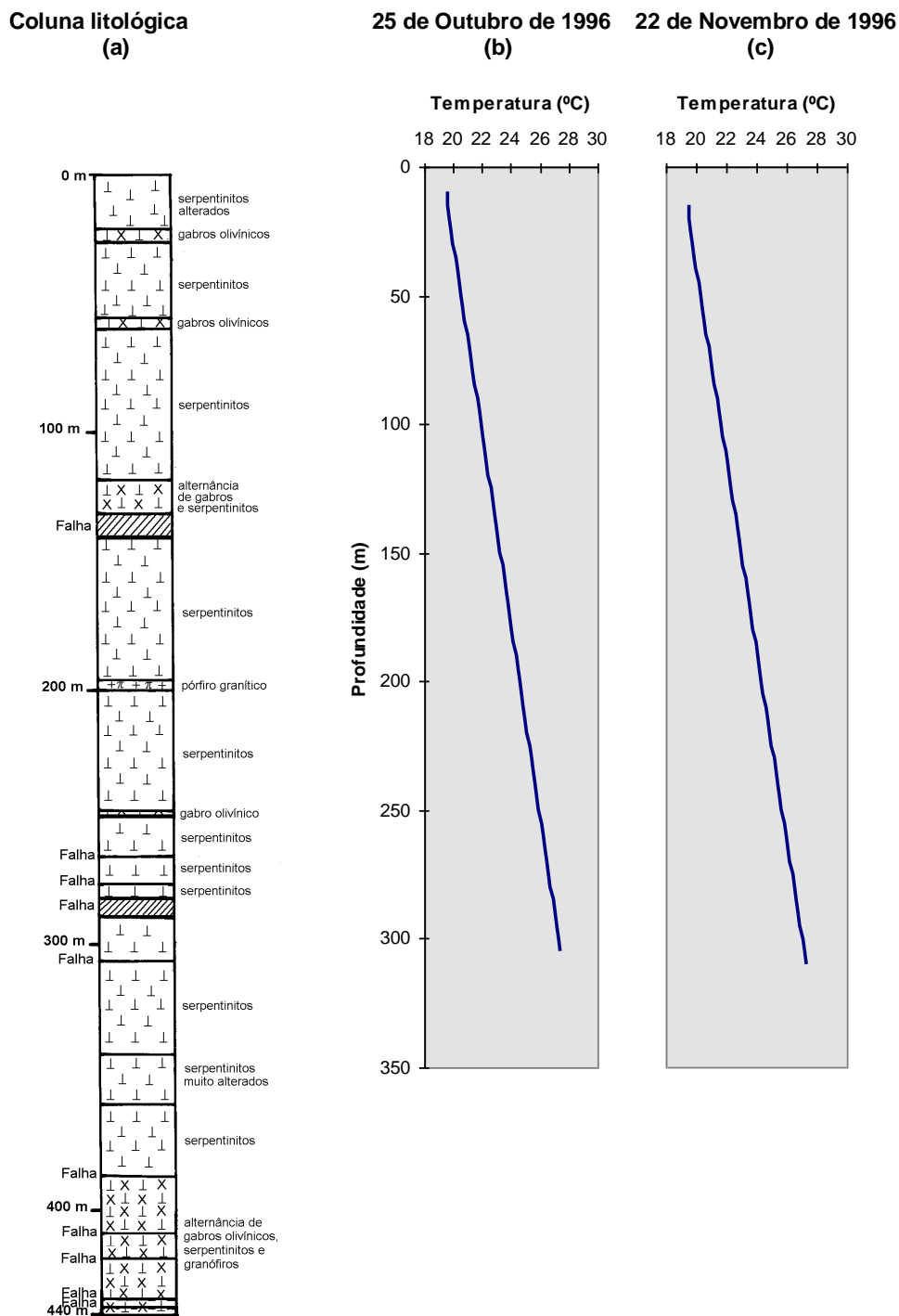


Fig. 3.9 – (a) Coluna litológica simplificada da sondagem mecânica SDA-1 (modificado de Direcção Geral de Geologia e Minas, 1982). (b) Diagrama de Temperatura da sondagem SDA-1 (campanha de 25 de Outubro de 1996). (c) Diagrama de Temperatura da sondagem SDA-1 (campanha de 22 de Novembro de 1996). O gradiente geotérmico médio calculado em todas as 3 campanhas termométricas realizadas (a 3ª campanha teve lugar em Março de 1997) foi de 27 °C/km, A condutividade térmica efectiva utilizada para o cálculo da DFC foi calculada com medidas de condutividade térmica realizadas em testemunhos de sondagem do furo SDA-1 por Duque (1991) e o valor obtido para esta última foi de 2,44 Wm⁻¹K⁻¹. Com estas novas determinações de temperatura na sondagem SDA-1, a sua DFC é de 66 mW/m².

Este valor não se reflectia, no entanto, em qualquer tipo de manifestações geotérmicas à superfície ou em profundidade, coincidindo até com uma zona de resistividades eléctricas mais elevadas (Correia et al., 1993; Correia, 1994; Correia e Jones, 1997). A transformação da sondagem mineira SDFA-1 numa sondagem termométrica com os 440 m de profundidade originais permitiu a aquisição de dados em várias campanhas termométricas sucessivas que confirmassem ou não aquele valor (Ramalho, 1996). Assim, com o objectivo de garantir que o fluido da sondagem estaria em equilíbrio térmico com as formações adjacentes, realizaram-se três campanhas de medições termométricas ao longo de 6 meses (Fig. 3.9), para garantir a consistência dos valores obtidos. A Fig. 3.9 mostra a coluna litológica e as diagrfias de Temperatura de duas das três campanhas termométricas na sondagem mineira SDFA-1, bem como os dados nela obtidos. O valor de 66 W/m^2 obtido em todas as campanhas não confirma os dados anteriormente publicados (Correia e Ramalho, 1998). A corroborar a informação obtida, na zona da sondagem mecânica, o último evento tectonotérmico teve lugar no Paleozóico Superior, o que significa que seria expectável um valor de DFC de $60 \pm 15 \text{ mW/m}^2$ (Vitorello e Pollack, 1980), que se aproxima dos valores de DFC obtidos por Correia e Ramalho (1998).

No cálculo da estimativa da DFC à superfície não foram feitas correcções topográficas e paleoclimáticas. Na Fig. 3.10 estão representados de uma forma esquemática os critérios utilizados para a aceitação ou rejeição de dados na estimativa da DFC para os vários tipos de sondagens mecânicas, designadamente de água, mineiras, termométricas ou geotérmicas.

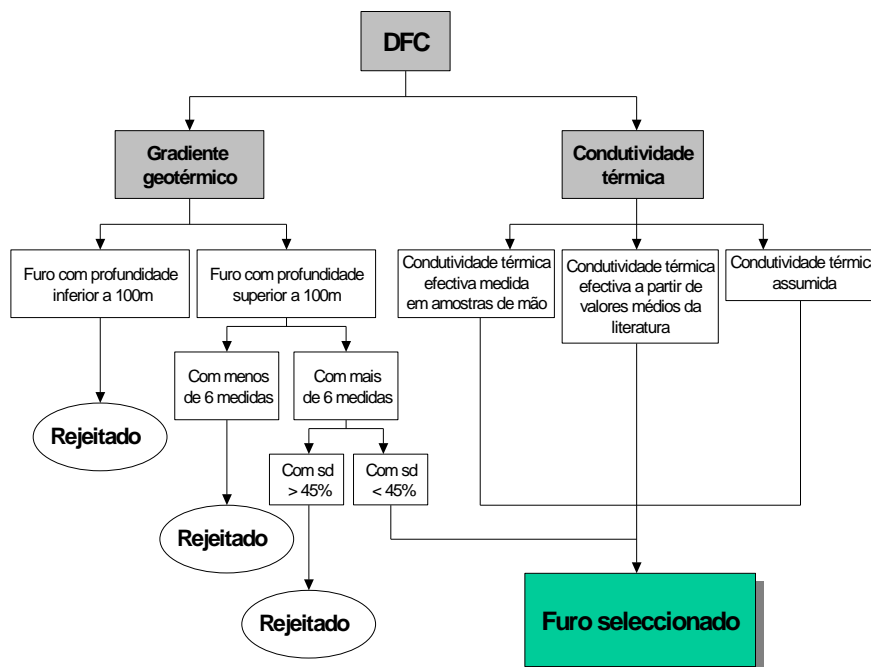


Fig. 3.10 – Esquema dos critérios utilizados para a aceitação ou rejeição de dados na estimativa da DFC para os vários tipos de sondagens mecânicas com diagrfias de Temperatura designadamente de água, mineiras, termométricas ou geotérmicas (Ramalho e Correia, 2006). sd – desvio padrão.

Este esquema esboça um método expedito para a classificação da qualidade das estimativas da DFC, baseada na qualidade dos dados de base dos parâmetros intervenientes para o seu cálculo, quer ao nível dos dados disponíveis, quer ao nível da qualidade da aquisição dos mesmos.

Tabela 3.3 – Classificações parcelares da qualidade dos dados de DFC estimados, em que a classificação final pode assumir valores entre 0 (mínimo, implicando a impossibilidade de estimar a DFC, face à fraca qualidade dos parâmetros envolvidos na sua estimativa) e 4 (máximo) baseada no tipo e qualidade de cada um dos parâmetros envolvidos. *sd* é o desvio-padrão.

Gradiente geotérmico	Classificação Parcelar	Condutividade térmica	Classificação parcelar
$sd > 45\%$	0	Assumida	0
$15\% < sd < 45\%$	1	Efectiva a partir de valores médios da literatura	1
$sd < 15\%$	2	Efectiva medida em amostras de mão	2

De acordo com este critério, a classificação final da qualidade dos dados estimados de DFC para cada sondagem mecânica corresponderá à soma da classificação parcelar correspondente ao gradiente geotérmico com a classificação parcelar correspondente à condutividade térmica. Desta forma, se a sua classificação acompanhar o resultado de DFC, o utilizador dos dados que não os processou terá uma ideia mais clara da qualidade da informação que está a utilizar. Poderá assim, consoante o rigor exigido pelo trabalho, optar pela não inclusão dos dados ou pela sua inclusão com ou sem reservas. No caso da estimativa da DFC por geotermómetros, esta análise não é feita.

A qualidade dos dados, de acordo com a classificação da Tabela 3.3 encontra-se visualizada no mapa da classificação da qualidade dos dados de DFC de Portugal Continental, representado na Fig. 3.11. Uma vez mais, é de ressaltar que é na Zona Sul-Portuguesa, onde se encontra um grande número de sondagens mineiras, que a qualidade dos dados de DFC é em geral mais elevada, pelos motivos já expostos atrás.

3.6.2. Através da utilização de geotermómetros

Em Portugal Continental, as estimativas de DFC utilizando o método tradicional da aplicação da equação de Fourier a partir de gradientes geotérmicos e condutividades térmicas, são de difícil obtenção na zona norte do Maciço Hercínico devido à composição das formações geológicas desta unidade tectónica, maioritariamente granitóides e rochas metamórficas. Por isso, as sondagens mecânicas para captação de água são geralmente muito pouco profundas e as sondagens mecânicas profundas para prospecção mineira são escassas e geograficamente distribuídas de uma forma irregular (Correia e Ramalho, 2009).

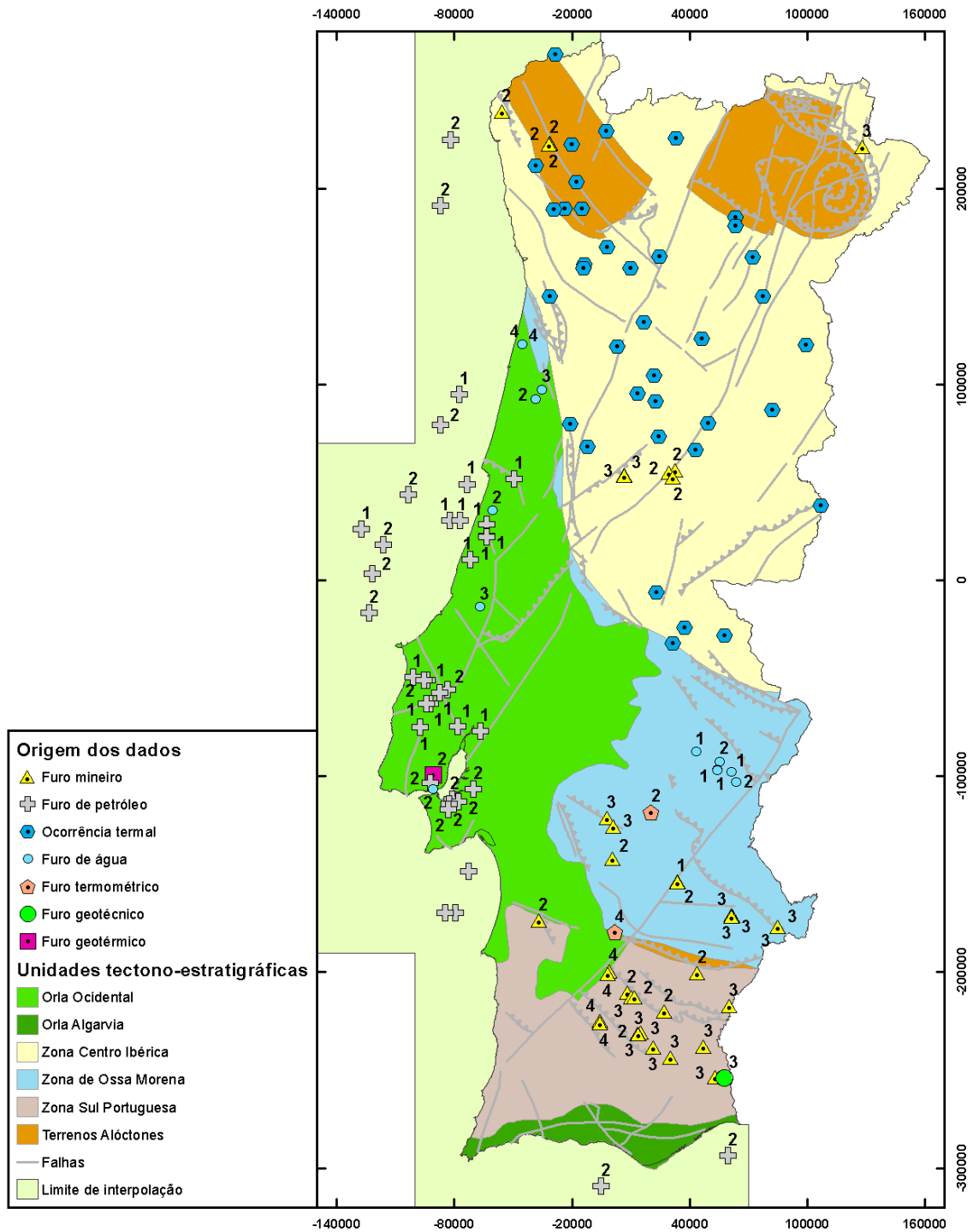


Fig. 3.11 – Mapa com a classificação da qualidade dos dados de DFC em Portugal Continental, baseada nos critérios mostrados na Fig. 3.10 e na Tabela 3.3. Devido à impossibilidade de estimar o gradiente geotérmico com a aplicação simples de geotermómetros, os pontos correspondentes às ocorrências termais encontram-se sem classificação.

Além disso, nesta área, as estimativas de DFC utilizando dados de diagrfias de Temperatura (Almeida, 1992; Duque et al., 1998) e condutividade térmica (Almeida, 1993; Duque et al., 1998) são escassas e a sua distribuição geográfica é ainda muito irregular (Fig. 3.12).

Com esta quantidade de dados não é possível, contudo, obter um mapa de gradiente geotérmico representativo desta zona. Todos estes factores levam a que um mapa de DFC desta região deva ser obtido com a ajuda da utilização de métodos alternativos, tais como a geotermometria da sílica (SiO_2) aplicada a águas de circulação profunda do maciço (Fig. 3.12, Tabela 3.4).

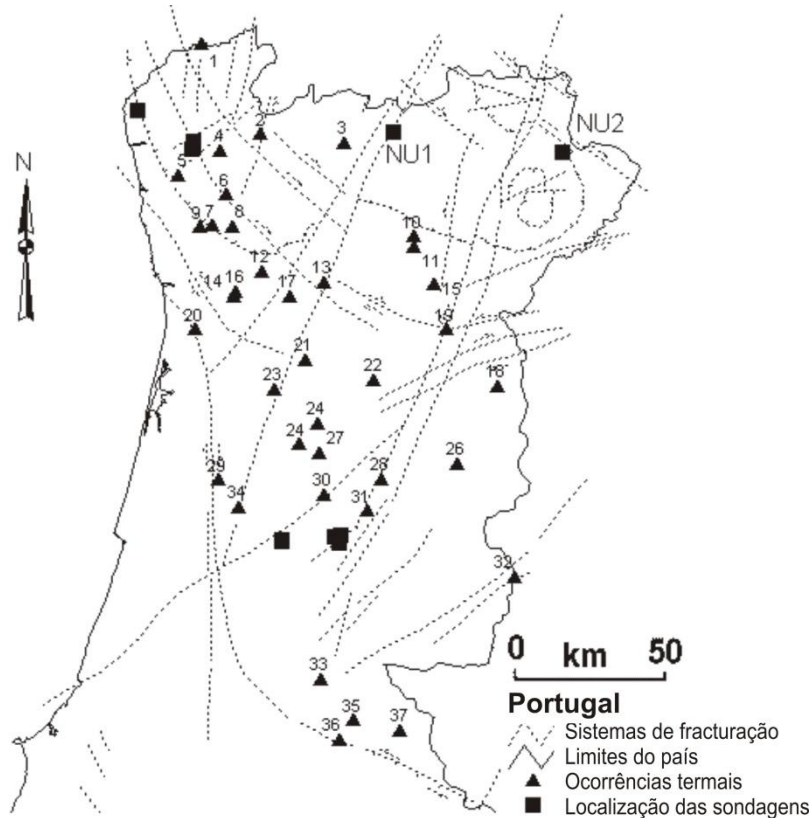


Fig. 3.12 – Ocorrências de água mineral natural e sondagens mecânicas com estimativas de DFC na parte norte do Maciço Hercínico.

Sob condições específicas, o uso de geotermómetros da SiO_2 em águas minerais naturais (águas de comprovada circulação profunda contendo elementos traço classificadas como tal pelo D.L. nº86/90, de 16 de Março), para estimar a DFC tem sido um modo alternativo de compreender e estabelecer o regime térmico em áreas com um escasso número de estimativas convencionais de DFC. Uma vez que as temperaturas obtidas com a geotermometria da SiO_2 estão relacionadas com as condições térmicas em profundidade de cada área e com o equilíbrio químico água-rocha, pode efectuar-se uma análise regional de DFC utilizando estas temperaturas. O geotermómetro da SiO_2 desenvolvido por A. Truesdell em 1976 apresentou bons resultados para pequenas concentrações de SiO_2 , o que é o caso da zona norte do Maciço Hercínico e foi aplicado a mais de 30 amostras de ocorrências de águas minerais aqui registadas (Tabela 3.4 e Fig. 3.12). Este número, ainda que reduzido, é consideravelmente superior e melhor distribuído do que as estimativas convencionais de DFC para a mesma área (Fig. 3.1).

Tabela 3.4 – Emergências termais de água mineral natural localizadas no Maciço Hercínico e respectiva temperatura de emergência, características químicas, concentração em SiO₂ e temperatura obtida aplicando o geotermómetro da SiO₂ da eq. (3.5). A localização dos números atribuídos às emergências corresponde à da Fig. 3.12.

Nº	Nome	Temperatura de emergência (°C)	Características químicas	SiO ₂ (ppm)	Temperatura SiO ₂ (°C)
1	Caldas de Monção	50	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	86	129
2	Caldas do Gerês	47	HCO ₃ , Na, F, S ₂ O ₃	65	114
3	Carvalhelhos	22	HCO ₃ , Na, F	25	73
4	Caldelas	33	HCO ₃ , Ca, F	39	91
5	Quinta do Eirogo	25	H ₂ S, Cl, HCO ₃ , Na	59	110
6	Caldas das Taipas	32	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	35	87
7	S. Miguel das Aves	22	H ₂ S, HCO ₃ , Na	28	77
8	Caldas de Vizela	62	H ₂ S, HCO ₃ , F, Na	58	109
9	Caldinhas	30	H ₂ S, Cl, Na, F	86	129
10	Caldas do Carlão	29	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	60	111
11	Sao Lourenço	30	H ₂ S, HCO ₃ , Na, K	58	109
12	Caldas de Canaveses	30	H ₂ S, F, HCO ₃ , Na	41	93
13	Caldas do Moledo	45	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	34	84
14	Entre-os-Rios	19	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	43	95
15	Fonte Santa do Seixo	21	H ₂ S, HCO ₃ , Na	25	71
16	Sao Vicente	19	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	70	118
17	Caldas de Aregos	62	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	53	105
18	Fonte Sta de Almeida	19	H ₂ S, HCO ₃ , Na	37	89
19	Longroiva	34	H ₂ S, HCO ₃ , Na	68	116
20	Caldas de S. Jorge	23	H ₂ S, Cl, Na	56	107
21	Termas do Carvalhal	41	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	53	105
22	Caldas da Cavaca	28	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	54	105
23	S. Pedro do Sul	69	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	66	115
24	Banho de Alcafache	48	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	54	106
24	Caldas de Sangemil	50	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	82	126
26	Caldas do Cró	23	H ₂ S, HCO ₃ , Na	48	100
27	Felgueira	36	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	47	99
28	Caldas e Fonte Santa	48	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	33	83
29	Luso	27	SiO ₂ , Cl, Na, K	11	44
30	Caldas de S. Paulo	23	H ₂ S, HCO ₃ , Na	100	137
31	Unhais da Serra	37	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	48	100
32	Monfortinho	28	SiO ₂ , Cl, Na, K	18	60
33	Ladeira de Envendos	22	SiO ₂ , Cl, Na, K	11	41
34	Caldas de Penacova	19	SiO ₂ , Cl, Na, K	9	37
35	Fadagosa de Nisa	19	H ₂ S, HCO ₃ , Na, F	32	83
36	Monte da Pedra	20	H ₂ S, HCO ₃ , Na	30	80
37	Castelo de Vide	16	HCO ₃ , Na, Ca	16	55

Este geotermómetro da SiO₂ (Truesdell, 1976) obteve bons resultados para baixas concentrações de SiO₂, inferiores a 400 ppm (Prol-Ledesma e Juarez, 1986), o que é o caso da maioria das águas minerais naturais portuguesas que ocorrem no Maciço Hercínico (eq. 3.5):

$$T_{\text{SiO}_2} = \frac{1315}{5,205 - \log \text{SiO}_2} - 273,15 \quad (3.5)$$

em que SiO_2 é a concentração em sílica (ppm), aplicada onde não ocorrem perdas de vapor, o que é o caso das ocorrências de águas minerais do Maciço Hercínico, com baixas temperaturas que permitem a aplicação directa do geotermómetro.

A aplicação do geotermómetro da SiO_2 à zona norte do Maciço Hercínico mostra um ligeiro zonamento de temperaturas com as ocorrências perto do limite ocidental do Maciço mostram temperaturas do reservatório claramente mais baixas, oscilando de 45 °C no limite SW a mais de 120 °C na direcção do seu limite N. A distribuição da temperatura do reservatório da SiO_2 obtida através da aplicação directa do geotermómetro da sílica (Truesdell, 1976) às ocorrências de água mineral natural da Fig. 3.12 e Tabela 3.4 é a que se encontra na Fig. 3.13.

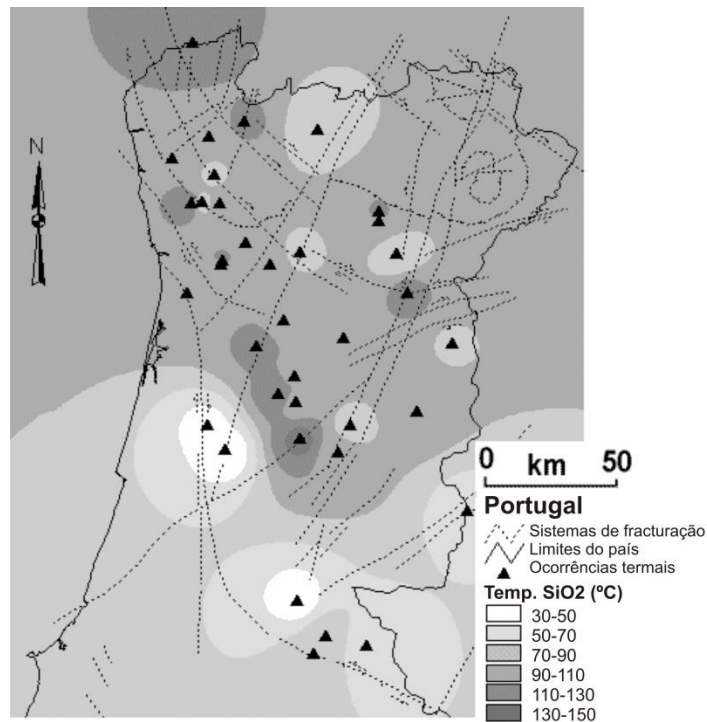


Fig. 3.13 – Temperatura do reservatório (°C) obtida através da aplicação directa do geotermómetro da sílica (Truesdell, 1976) às ocorrências de água mineral natural seleccionadas da Fig. 3.12 e Tabela 3.4.

A relação entre as temperaturas obtidas e as condições térmicas em profundidade para cada área pode ser estabelecida numa base empírica e, nos Estados Unidos, onde ambos os parâmetros são bem conhecidos, foi obtida uma equação linear do 1º grau empírica (Swanberg e Morgan, 1979; Haenel et al., 1988). À semelhança de Prol-Ledesma e Juarez (1986), a DFC foi empiricamente estimada em cada ponto com a equação de Swanberg e Morgan (1979; 1980) (eq. 3.6)

$$T_{\text{SiO}_2} = m q + b \quad (3.6)$$

Em que m e b estão respectivamente relacionados com águas de circulação profunda e com a temperatura média anual e q é a DFC em mW/m^2 . Estas constantes foram determinadas através da análise estatística de dados de mais de 100.000 amostras, obtendo valores médios para as províncias geotérmicas de $m=670 m^2W^{-1}$ e $b=13,2 ^\circ C$ e para áreas de $1^\circ \times 1^\circ$ com $m=680 m^2W^{-1}$ e $b=12,4 ^\circ C$ (Swanberg e Morgan, 1980).

Para estas estimativas eliminaram-se as águas gasocarbónicas que ocorrem na região NE do país, nomeadamente as de Pedras Salgadas e as Águas de Bem-Saúde. Machado (1994) mostrou que a aplicação do geotermómetro de sílica não é adequada para este tipo de águas. Como tal, tendo como base as características químicas das águas seleccionadas, sobretudo águas sulfúreas bicarbonatadas de baixa mineralização (Cruz et al., 1996), as estimativas de DFC com geotermómetros, recorrendo à sua relação com os dados de diagrfias de Temperatura efectuadas por Almeida (1992) e Duque et al. (1998) (Fig. 3.13), resumiram-se às ocorrências de água mineral natural referidas na Tabela 3.4.

A maior parte das sondagens mecânicas utilizadas para a estimativa da DFC no Maciço Hercínico (Fig. 3.12) não tem medições de condutividades térmicas nos testemunhos. Por isso, se bem que alguns valores provenham de medições efectuadas por Almeida (1993), a maior parte destes valores foram retirados da literatura (por exemplo, Cermak e Ryback, 1982).

Estas sondagens da Fig. 3.14 atingem profundidades muito distintas; a maior parte atinge profundidades inferiores a 120 m, mas para este objectivo, todas foram consideradas como suficientemente profundas para atingir o equilíbrio térmico. Por isso, algumas das estimativas de DFC para esta área não foram utilizadas no cálculo a recta de regressão da Fig. 3.15, nomeadamente aquelas com características particulares das ocorrências termiais relacionadas com condições geológicas ou localizados demasiado longe de uma ocorrência termal.

Seria conveniente a existência de outras estimativas de DFC para melhorar a calibração da linha de regressão para estimar os valores de DFC a partir de concentrações da SiO_2 . No entanto, e apesar de existirem novas sondagens profundas realizadas no maciço (Ferreira Gomes, 2005; Ferreira Gomes et al., 2008; Gomes da Costa e Ferreira Gomes, 2011) localizadas em zonas termiais, as suas diagrfias de Temperatura apresentam circulação de água, pelo que não se podem correlacionar com os valores de DFC estimados por geotermómetros. Por este motivo, o método deve ser encarado com reservas e a regressão linear que serve de base à estimativa da DFC deve procurar ser actualizada numa base regular para que os mapas da DFC produzidos sejam igualmente actualizados.

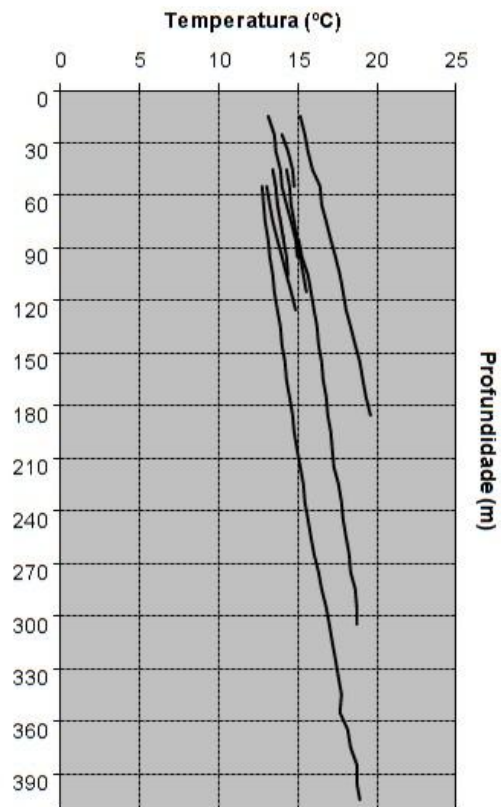


Fig. 3.14 – Medidas precisas de temperatura em profundidade (Almeida, 1992; Duque et al., 1998) na zona N do Maciço Hercínico a partir das sondagens representadas na Fig. 3.10.

A recta de regressão para a T_{SiO_2} e a DFC para o Maciço Hercínico Português tem neste momento a eq. (3.7) (Fig. 3.15):

$$T_{SiO_2} = 0,647 q + 66,804, \text{ com } R^2 = 0,4338 \quad (3.7)$$

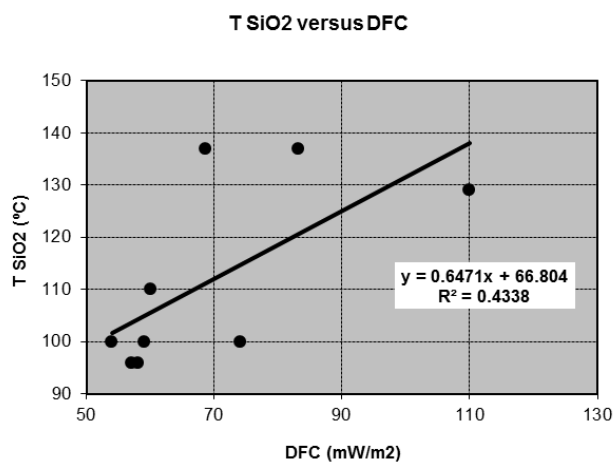


Fig. 3.15 – Temperatura da sílica (°C) em ocorrências de água mineral natural em função de estimativas da DFC (mW/m^2) (q) das sondagens seleccionadas da Fig. 3.12.

O valor de R^2 (coeficiente de determinação) de 0,4338 para a eq. (3.7) é considerado bastante baixo. Uma vez que o coeficiente de determinação compara os valores de y estimados e reais, e oscila entre 0 e 1 (1 significa uma correlação perfeita entre o valor estimado e o valor real). No outro extremo, se o coeficiente de determinação for 0, a equação de regressão não é útil na previsão de um valor de y . Este valor significa que com os dados actuais, o valor de DFC apenas se pode considerar indicativo e a sua melhoria deverá ser objectivo.

O caso do campo geotérmico de baixa entalpia de S. Pedro do Sul, onde existe uma anomalia geotérmica local, localizada nos granitos radioactivos de S. Pedro do Sul (Pereira e Ferreira, 1985) torna difícil a existência de sondagens mecânicas com a profundidade mínima pretendida com diagrfias de Temperatura. Apenas foi possível fazê-lo numa das três sondagens geotérmicas realizadas em S. Pedro do Sul (Almeida, 1992), que no entanto apresenta uma elevada circulação dos fluidos, como se pode verificar pela Fig. 3.16. Esta sondagem, realizada no âmbito de um projecto geotérmico levado a cabo pela ex-Direcção Geral de Geologia e Minas (DGGM) (Lemos et al., 1992) captou água com temperatura de 61 °C à boca da sondagem e que tem sido utilizada no fornecimento de energia a um conjunto de estufas privadas que produz frutos tropicais há mais de 20 anos. Além disso, esta diagrfia é típica de uma zona geotermicamente anómala, onde não foi possível aplicar a eq. (3.1). Para ultrapassar esta situação foi aplicada a esta sondagem a relação linear entre a DFC e a temperatura utilizando o geotermómetro da sílica através da relação empírica desenvolvida por Swanberg e Morgan (1980)

$$q = 1,48 (T_0 - T_z) \quad (3.8)$$

em que T_0 é a temperatura superficial média (°C) e T_z é a temperatura à profundidade z (°C). Neste caso, significa que DFC local estimada para a zona do Vau de S. Pedro do Sul é de 170 mW/m².

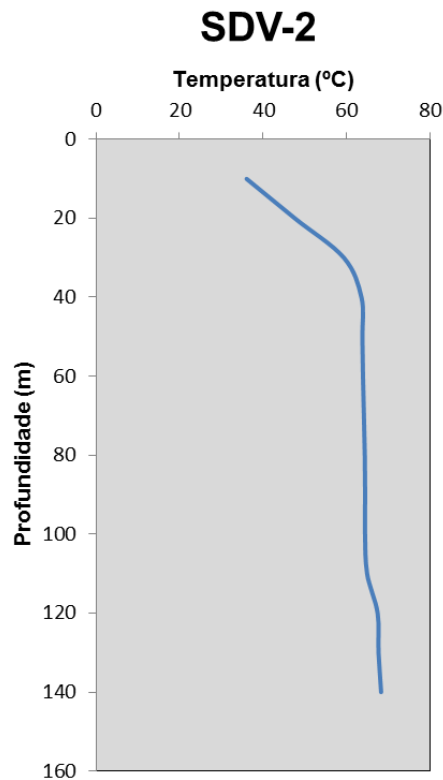


Fig. 3.16 – Diagrama de Temperatura na sondagem SDV-2, na zona do Vau de S. Pedro do Sul (Almeida, 1992). Campanha efectuada em Junho de 1991, com temperatura superficial de 19 °C (Almeida, 1992).

3.6.3. Em sondagens de pesquisa de petróleo

No que diz respeito às sondagens para a pesquisa de petróleo referidas em Camelo (1987a), a DFC foi calculada a partir da eq. (3.9)

$$q = \frac{T_i - T_0}{\sum_{j=1}^n H_{ij} \frac{1}{k_j}} \quad (3.9)$$

onde n é o número total de camadas, H_{ij} são os coeficientes correspondentes à espessura da camada j desde a superfície até à profundidade Z_i , k_j é a condutividade térmica da camada j, T_i é a temperatura na base da camada Z_i (°C) e T_0 é temperatura à superfície (°C).

Mais recentemente, para complemento da informação de Camelo (1987a) incorporou-se a informação de Shell Prospex Portuguesa (1974) na base de dados. Esta consistiu em informação de BHT e respectivo cálculo do gradiente geotérmico em 17 sondagens *on-shore* e 14 sondagens *off-shore*, prefazendo um total de 31 sondagens de pesquisa de petróleo.

3.6.4. Cartografia da DFC

São vários os níveis de detalhe que constituem a componente cartográfica regional dos dados geotérmicos. A tentativa de uniformização dos dados a nível mundial toma corpo em alguns mapas que mostram as variações das características geotérmicas da crosta à escala global. É o que se mostra no mapa da Fig. 3.17, elaborado com base em mais de 24.000 medidas de campo *on-shore* e *off-shore* (HFDC Commission, 2012), complementada por estimativas de DFC em regiões sem medidas, baseadas em valores empíricos característicos de DFC em vários ambientes tectónicos e geológicos. A realização de vários Atlas à escala continental constitui o resultado desta uniformização através da integração dos dados produzidos individualmente por cada país seguindo critérios razoavelmente semelhantes (Fig. 3.18) emitidos nas pelos editores dos sucessivos Atlas (Haenel et al., 1980; Haenel e Staroste, 1988, Hurter e Haenel, 2002). Pela escala resultante, estes Atlas não substituem a cartografia individual de cada país e muito menos a investigação local necessária a efectuar nas zonas que serão objecto de estudo detalhado. Servem no entanto, como guia para a definição de prioridades em investimentos futuros e constituem um contributo para o estabelecimento de estratégias a nível nacional no que diz respeito à exploração de energia geotérmica, não fornecendo contudo informação fundamental relativamente à existência de potenciais consumidores, nomeadamente a nível de cidades mais ou menos populosas (Hurter e Schellschmidt, 2003). Aqui, os SIG desempenham posteriormente um papel fundamental, uma vez que permitem o cruzamento de informação de relevo para a avaliação da viabilidade técnica e económica de cada projecto industrial.

As informações fornecidas nos vários Atlas (Haenel et al., 1980; Haenel e Staroste, 1988, Hurter e Haenel, 2002) são dispostas de tal forma que os vários níveis de decisores sem conhecimentos de relevo nesta área possam facilmente compreender os condicionalismos subjacentes e o interesse potencial de um estudo local mais detalhado.

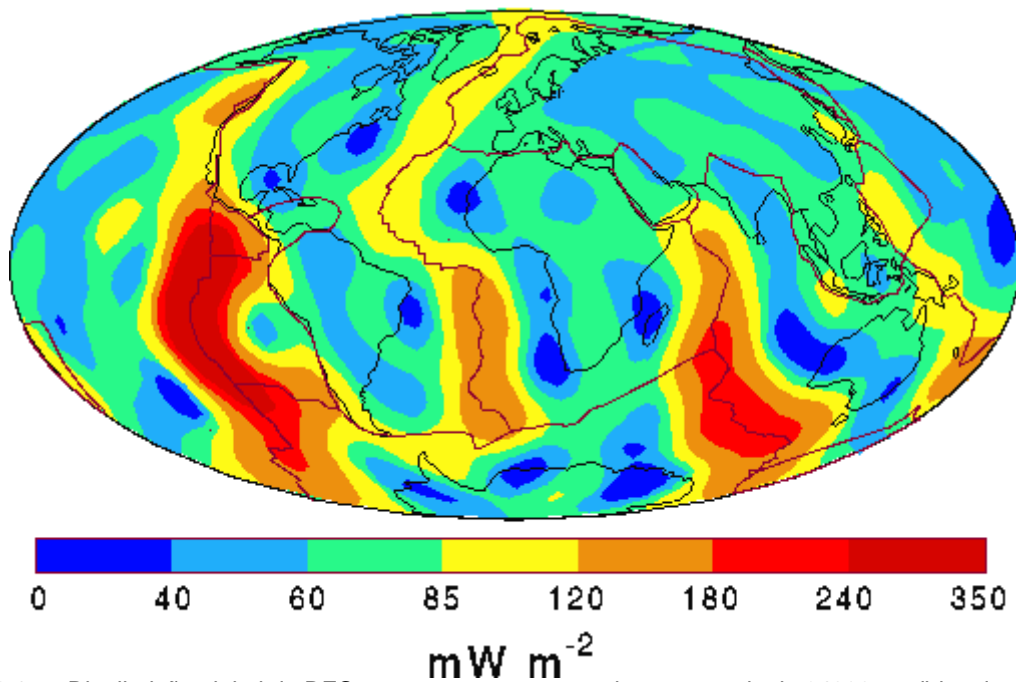


Fig. 3.17 – Distribuição global da DFC na crosta terrestre com base em mais de 24000 medidas de campo *on-shore* e *off-shore*, complementada por estimativas de DFC em regiões sem medidas, baseadas em valores empíricos característicos de DFC em vários ambientes tectônicos e geológicos. São mostrados no mapa os limites das placas tectônicas principais e o contorno dos continentes (IHFD Commission, 2012).

A listagem das sondagens mecânicas incorporadas no Atlas de Recursos Geotérmicos da Europa (Hurter e Heanel, 2002) encontra-se neste e em Fernández et al. (1998), bem como as respectivas coordenadas e os valores dos parâmetros utilizados para a DFC com os respectivos erros. Fernández et al. (1998) explicam como foram obtidos os valores de DFC, usando os mesmos critérios em toda a Península Ibérica. Por sua vez, toda esta informação e aquela que foi entretanto adquirida encontra-se na base de dados da Fig. 3.2.

Com a informação de DFC obtida pelo método de Fourier e a partir da aplicação de geotermómetros, foi elaborado um mapa de DFC para Portugal Continental incluindo informação das sondagens de pesquisa de petróleo *on-shore* e *off-shore* (Fig. 3.19).

Densidade de Fluxo de Calor

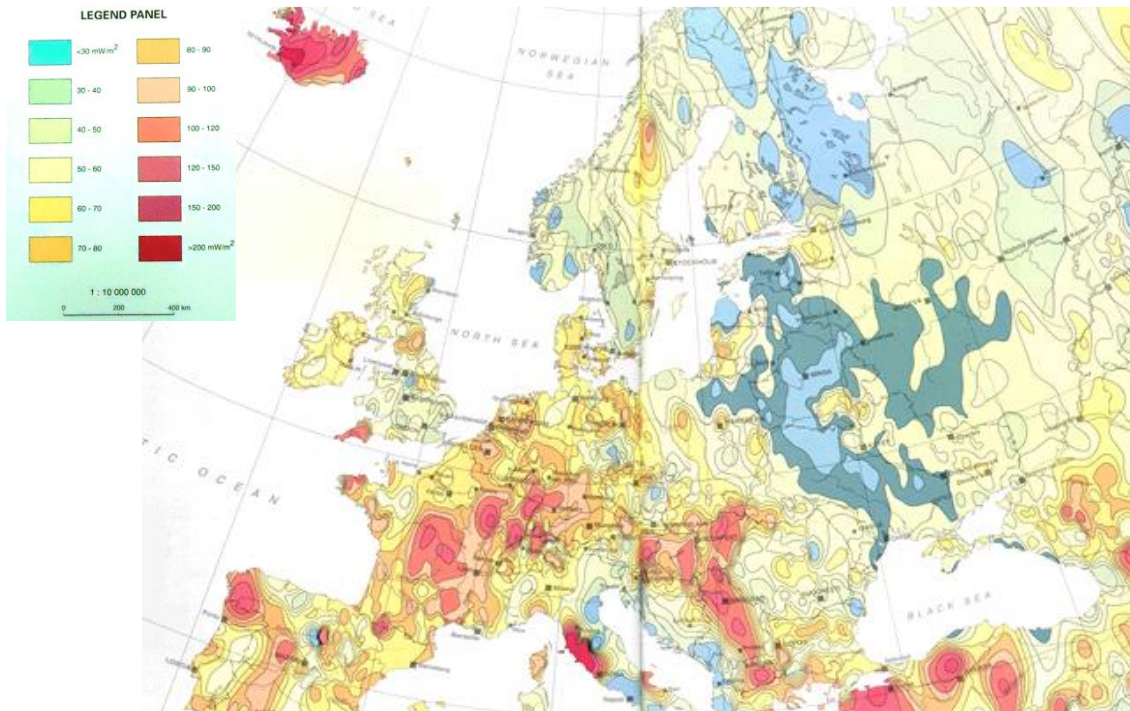


Fig. 3.18 – Mapa da distribuição da DFC à superfície na Europa (Hurter e Haenel, 2002).

Assim, de acordo com o mapa da Fig. 3.19, os valores de DFC para Portugal Continental variam de aproximadamente 40 mW/m^2 a 115 mW/m^2 , com um valor médio de cerca de 75 mW/m^2 . Os valores de DFC da Zona Centro-Ibérica do Maciço Hercínico oscilam entre os 65 mW/m^2 e os 80 mW/m^2 . Na parte N do maciço há a registar um aumento de DFC, o que é compatível com a informação proveniente de Espanha incluída em Fernandèz et al. (1998).

Na Zona Sul Portuguesa, contudo, os valores regionais de DFC atingem cerca de 90 mW/m^2 , enquanto na Zona de Ossa Morena estes valores decrescem para cerca de 60 mW/m^2 , o que é semelhante a outras regiões hercínicas na Europa (Fernandèz et al., 1998). Nas bacias sedimentares, os valores regionais de DFC oscilam entre 40 mW/m^2 e 90 mW/m^2 , de uma forma geral e têm variações mais irregulares.

A inclusão dos dados de DFC recorrendo a estimativas de temperatura nos reservatórios com geotermómetros da sílica na zona Norte do Maciço Hercínico mostra que, para esta área, estes se situam entre os 65 mWm^{-2} e os 80 mWm^{-2} , com um aumento na zona N (Correia e Ramalho, 2009). Este resultado vem ao encontro de Fernandèz et al. (1998) através da comparação dos resultados com alguns valores de DFC da parte N do Maciço Hercínico em Espanha, próximos da fronteira portuguesa, calculados com a equação de Fourier.

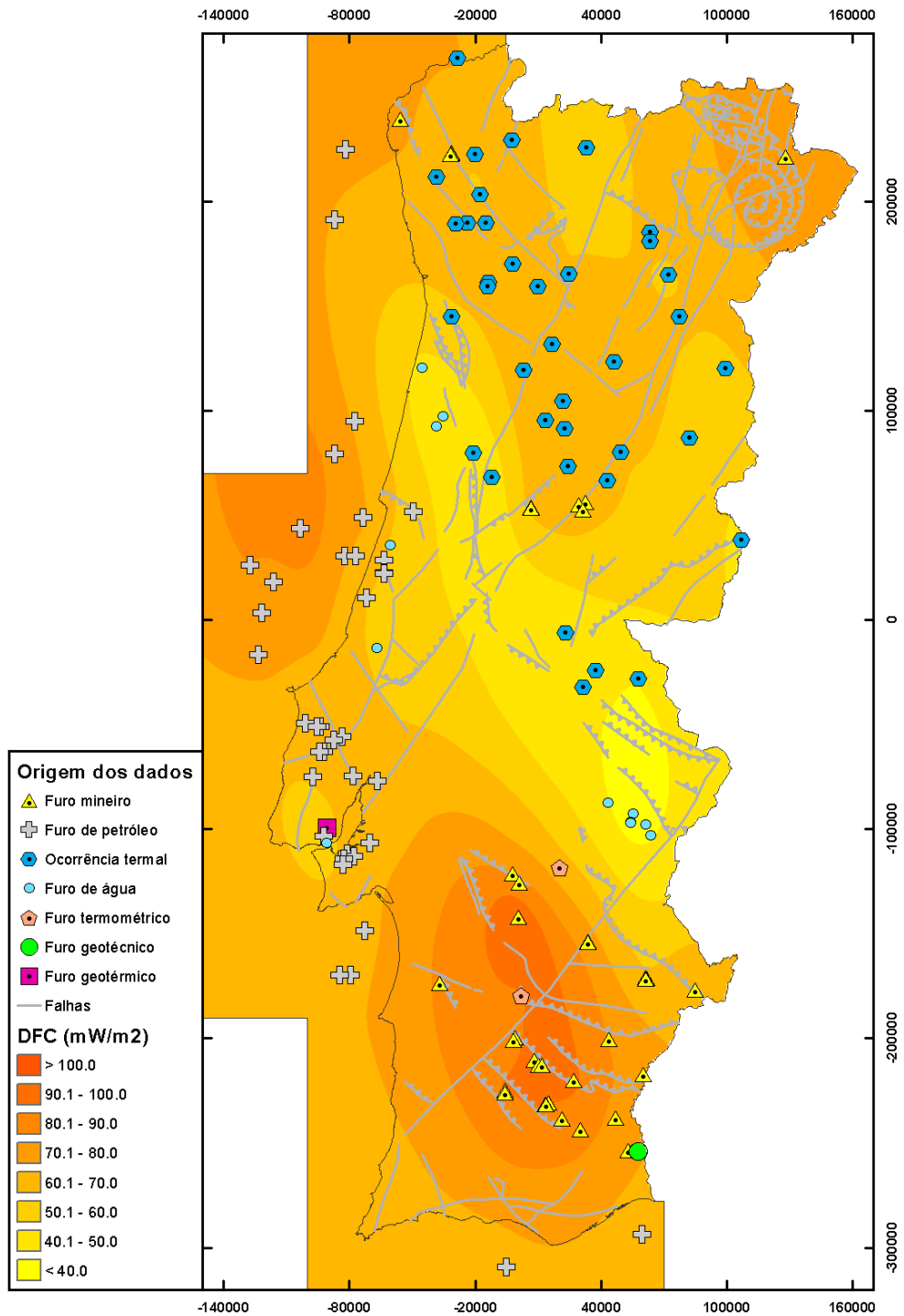


Fig. 3.19 – Dados de DFC *off-shore* e *on-shore* tendo em conta 1) sondagens mecânicas mineiras e de água, 2) sondagens mecânicas dos petróleos, 3) sondagens mecânicas termométricas e 4) geotermómetros aplicados a águas de circulação profunda.

Com base nesta informação geológica e geotérmica foi proposto em 2005 um mapa-síntese com a informação zonada de DFC para ser utilizada em projectos que requeiram informação acerca da DFC de uma forma mais generalista, como é o caso de projectos ligados a climatizações (Correia e Ramalho, 2005) (Fig. 3.20). Neste

mapa, foram distinguidas 4 zonas genéricas de DFC, cujos valores atribuídos têm diferentes graus de rigor. Os valores mais a norte são menos rigorosos devido à falta de informação espacial relacionada com sondagens mecânicas profundas onde possa ser aplicada a eq. (3.1). Este mapa foi a origem do mapa publicado em Carvalho (2004), para aplicação a geotermia de muito baixa entalpia para fins de aquecimento ambiental.

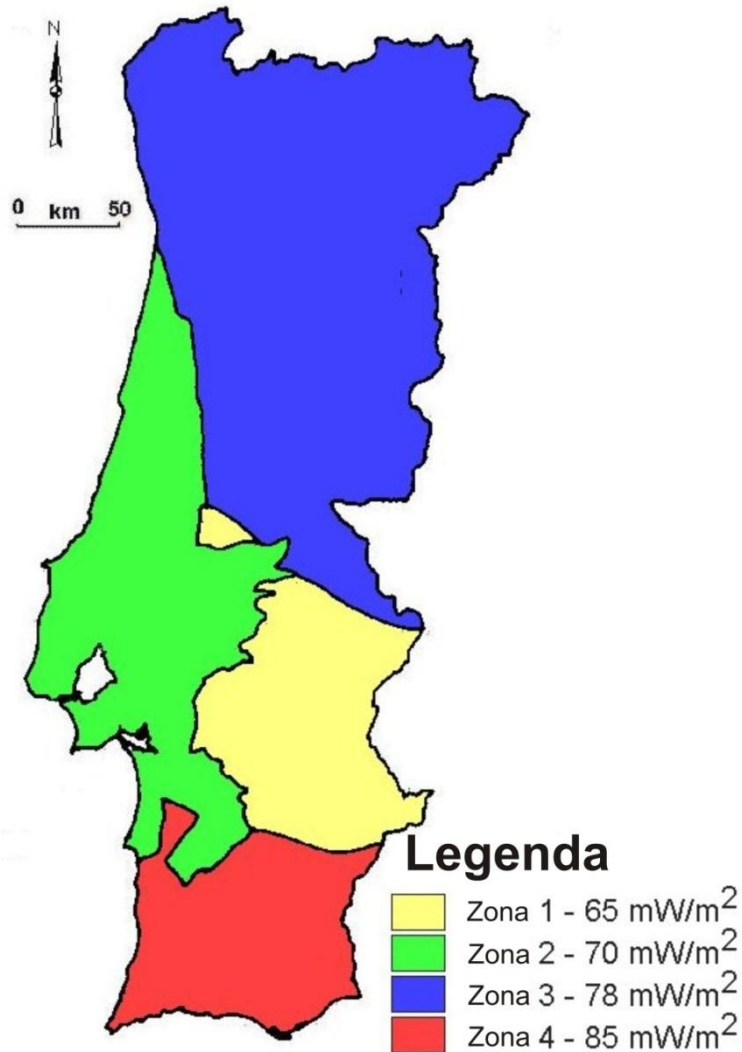


Fig. 3.20 – Zonamento de DFC para Portugal Continental baseado em valores de DFC e características geológicas e estruturais (Correia e Ramalho, 2005).

3.7. Produção de calor em rochas

Mais de 98% do calor produzido actualmente em rochas tem origem nas séries de decaimento do ²³⁸U e ²³²Th e do decaimento simples do ⁴⁰K (Jessop, 1990). Por isso, é importante introduzir um valor plausível de produção de calor radiogénico aquando da estimativa da temperatura a profundidades da ordem de vários quilómetros, quando não há qualquer informação a profundidades maiores, como é o caso das sondagens mineiras e de água. Os valores de produção de calor por unidade de volume (A)

utilizados no cálculo da temperatura a diferentes profundidades integrados na base de dados da Fig. 3.2 referem-se aos valores médios obtidos através da determinação laboratorial em amostras rochosas recolhidas em formações geológicas do território de Portugal Continental (Correia et al., 1993; Correia, 1995; Correia e Jones, 1997; Fernandéz et al., 1998) e em tabelas de propriedades físicas de rochas de Rybach e Cermak (1982). A produção de calor em rochas (A) foi calculada com o recurso à fórmula (Ryback, 1976; 1988):

$$A = \rho (9,52 C_U + 2,56 C_{Th} + 3,48 C_K) \times 10^{-5} \quad (3.10)$$

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

Os modelos de distribuição vertical para a DFC a variar de acordo com A são tais que:

$$q = q_0 + Ab \quad (3.11)$$

1. Modelo em degrau

$$A(z) = A_0, 0 \leq z \leq b$$

2. Modelo Linear

$$A(z) = A_0, \left[1 - \frac{z}{2b}\right], 0 \leq z \leq 2b$$

3. Modelo Exponencial

$$A(z) = A_0 e^{-z/b}, 0 \leq z \leq 40 \text{ km}$$

Em geral, por uma questão de simplificação de cálculo, é utilizado o modelo em degrau.

No caso específico do campo geotérmico de baixa entalpia de S. Pedro do Sul a existência de 15 análises químicas de U e Th realizadas nos granitos radioactivos de S. Pedro do Sul permitiu a estimativa de A. As concentrações muito elevadas de U e Th (Basham et al., 1983) permitiram que em S. Pedro do Sul se estimasse A eliminando o termo correspondente ao K na eq. (3.10), e, como consequência, subestimando a estimativa de DFC. Utilizando um valor para a densidade de $2670 \text{ kg}/\text{m}^3$ e médias pesadas de 12,5 ppm e 108 ppm para as concentrações de urânio e tório, respectivamente, o valor estimado para A no granito de S. Pedro do Sul é $11 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Correia et al., 1997). A utilização de espectrometria de radiação gama nos canais do U, Th e K permite ainda a cartografia de detalhe de zonas radiogenicamente anómalas relacionadas com geotermia, como é o caso da Fig. 3.21 (Saraiva et al, 1997), que representa o resultado de um levantamento espectrométrico de radiação gama natural nos canais do U, Th e K na zona do Granito Radioactivo de S. Pedro do Sul.

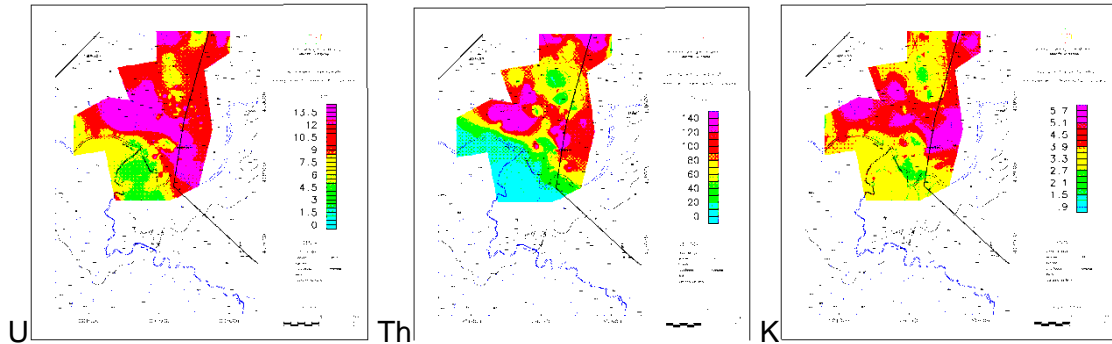


Fig. 3. 21 – Levantamento espectrométrico de radiação gama natural nos canais do U, Th e K na zona do Granito Radioactivo de S. Pedro do Sul (Saraiva et al., 1997).

Por outro lado, é possível também correlacionar a informação de A a partir dos valores das contagens totais das cartas radiométricas da Taxa de Exposição Natural realizadas pelo ex-Instituto Geológico e Mineiro (Torres, 1997), cuja actualização está a ser feita pelo LNEG (Batista et al., in press), compreendendo mais de 840.000 pontos homogeneizados adquiridos ao longo de décadas, por meio de espectrometria auto e aeroportada e cintilometria.

3.8. Estimativa de temperaturas a diferentes profundidades

Os mapas de temperatura a várias profundidades obtidos através da cartografia geotérmica indicam que tipo de aplicação poderá ter mais interesse em cada local. Em simultâneo, a informação da espessura, transmissividade e características químicas dos aquíferos em profundidade terá uma importância significativa em todo o processo de avaliação das áreas que mereçam uma avaliação mais detalhada para a investigação em geotermia, quer seja estimulada ou convencional.

A determinação da temperatura a diferentes profundidades é um dos objectivos principais dos estudos de Geotermia clássica ou EGS e de armazenamento de CO₂. Com o objectivo de estimar a distribuição espacial da temperatura nas zonas mais superficiais da crosta, estimaram-se as temperaturas às profundidades de 500, 1.000 e 2.000 metros a partir de duas aproximações diferentes.

A determinação da temperatura a diferentes profundidades é feita a partir dos valores da DFC obtidos à superfície. Assim, conhecendo a geologia da região onde a sondagem se encontra, e podendo estimar a condutividade térmica média assumida ou efectiva e a produção de calor média para essa litologia, é possível estimar o valor da temperatura para qualquer profundidade a partir da equação (Haenel et al., 1980), utilizando o modelo mais comum, o modelo em degrau

$$T(z) - T_0 = \frac{qz}{k} - \frac{Az^2}{2k} \quad (3.12)$$

em que $T(z)$ é a temperatura à profundidade z ($^{\circ}\text{C}$), T_0 é a temperatura à superfície da Terra ($^{\circ}\text{C}$), z é a profundidade (m), A é a produção de calor por unidade de volume (W/m^3) e k é a condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Sempre que possível, a temperatura considerada foi a temperatura medida ou interpolada entre duas temperaturas medidas, como é o caso do gradiente geotérmico estimado em algumas sondagens de petróleo *on-shore* e *off-shore*. Caso estas não existissem, as temperaturas foram extrapoladas para profundidades maiores a partir de temperaturas medidas mais à superfície.

Apenas algumas sondagens mecânicas para pesquisa de petróleo foram alvo do primeiro tipo de aproximação, após correcção das BHT para perturbações térmicas causadas pela perfuração (Haenel et al., 1980).

No caso da estimativa das temperaturas a diferentes profundidades, não foi utilizada a informação de DFC proveniente dos geotermómetros. Para que tal aconteça, são necessárias informações físicas das captações das ocorrências termais em causa, para que se possa fazer uma estimativa ainda que assumida de k e de A . Estas informações poderão ser possíveis de obter mediante acordo com a DGEG e os concessionários das termas. Estes novos dados poderão trazer informação de carácter regional (se as ocorrências de água mineral natural forem de água fria) ou local, caso sejam ocorrências de baixa ou média entalpia.

O mapa da distribuição da temperatura a 500 m de profundidade em Portugal Continental encontra-se na Fig. 3.22.

Verifica-se uma zona de temperaturas que atingem cerca de 35°C na Bacia Lusitaniana e destacam-se a Zona de Ossa-Morena e o Maciço Hercínico no geral como zonas de menor temperatura em profundidade. No geral, é na Bacia Lusitaniana e na Zona Sul-Portuguesa que as temperaturas em profundidade são mais elevadas.

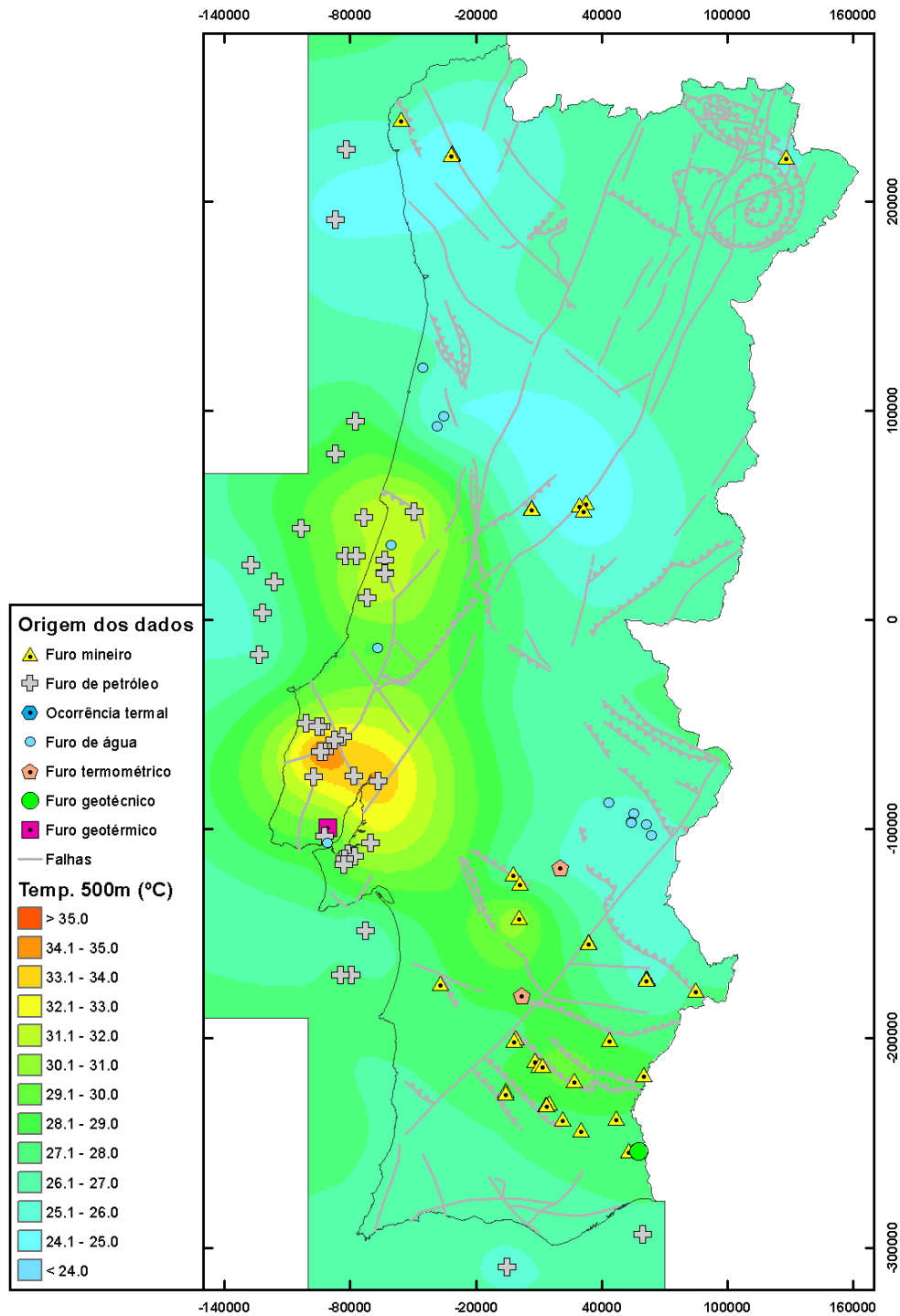


Fig. 3. 22 – Mapa da distribuição da temperatura a 500 m de profundidade em Portugal Continental.

O mapa da distribuição da temperatura a 1.000 m de profundidade na Europa (Hurter e Haenel, 2002) encontra-se na Fig. 3.23.

Temperatura a 1000 m de profundidade



Fig. 3. 23 – Mapa da distribuição da temperatura a 1.000 m de profundidade na Europa (Hurter e Haenel, 2002).

O mapa da distribuição da temperatura a 1.000 m de profundidade em Portugal Continental encontra-se na Fig. 3.24.

Tal como no mapa da Fig. 3.22, é visível uma zona de temperaturas mais elevadas na zona central da Bacia Lusitânica, atingindo a esta profundidade cerca de 50 °C e igualmente de uma forma genérica em toda a Zona Sul-Portuguesa.

O mapa da distribuição da temperatura a 2.000 m de profundidade na Europa (Hurter e Haenel, 2002) encontra-se na Fig. 3.25. O mapa da distribuição da temperatura a 2000 m de profundidade em Portugal Continental encontra-se na Fig. 3.26.

No caso da temperatura a 2.000 m de profundidade, encontram-se valores mais elevados de temperatura nas mesmas zonas dos mapas das Fis. 3.22 e 3.24, podendo atingir os 75 °C na Bacia Lusitânica, e é mais visível a existência de uma faixa de temperaturas mais elevadas que se prolonga pela Zona Sul-Portuguesa. Por outro lado, há zonas do Maciço Hercínico, cujas temperaturas regionais a 2.000 m de profundidade são bastante baixas, existindo como é óbvio anomalias geotérmicas locais nas zonas de ocorrências termais (Cruz et al., 1996).

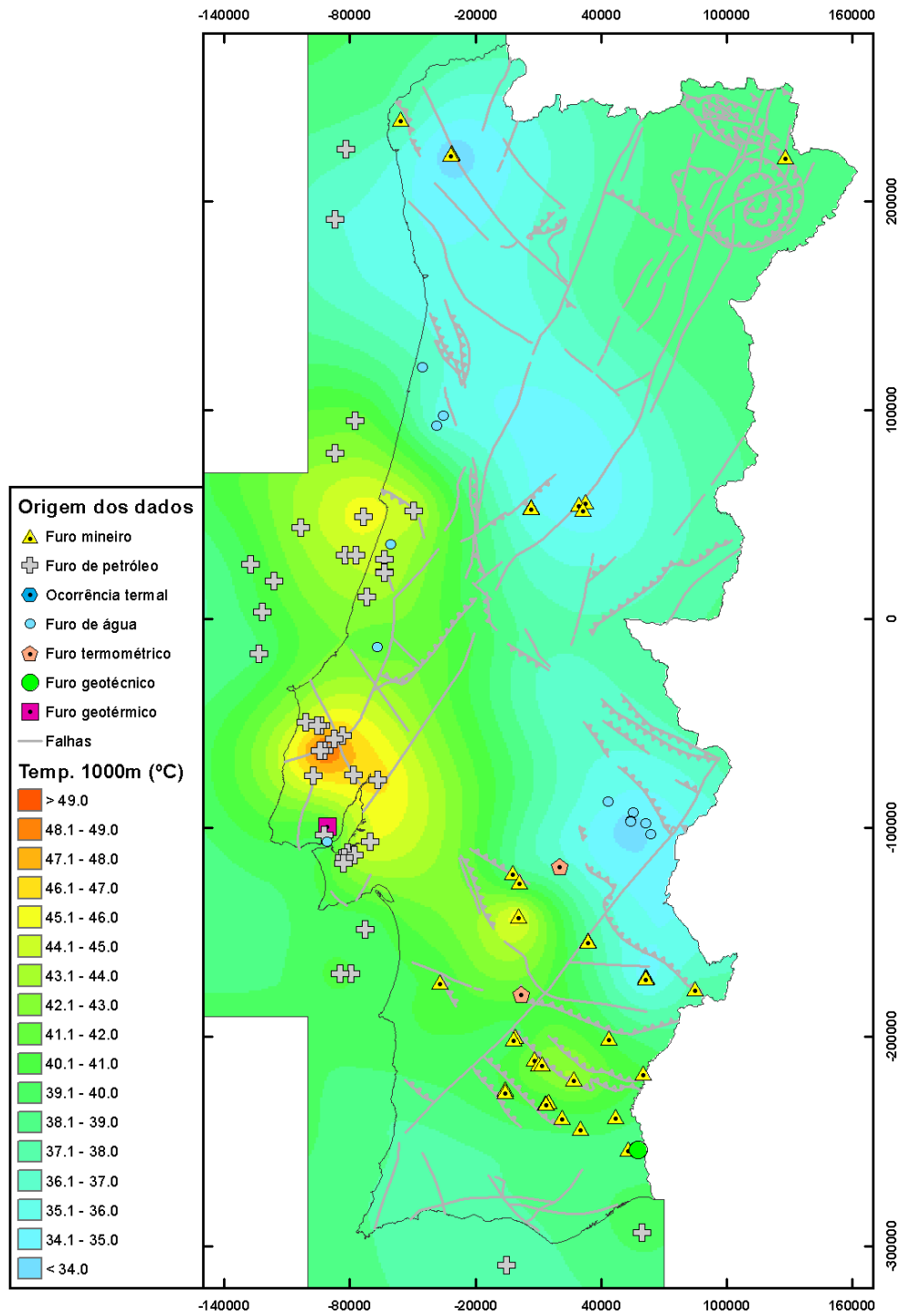


Fig. 3. 24 – Mapa da distribuição da temperatura a 1.000 m de profundidade em Portugal Continental.

Temperatura a 2000 m de profundidade



Fig. 3. 25 – Mapa da distribuição da temperatura a 2.000 m de profundidade na Europa (Hurter e Haenel, 2002).

Na anomalia geotérmica local do batólito granítico de S. Pedro do Sul, assumindo uma condutividade térmica de $3,4\text{ W/mK}$ (Almeida, 1993) e que um modelo em degrau para a produção de calor é válido para os quilómetros mais superficiais, a temperatura a várias profundidades pode ser calculada usando a eq. (3.12), obtendo-se as temperaturas de 67 , 121 e $180\text{ }^\circ\text{C}$ para as profundidades de 1.000 , 2.000 e 3.000 m respectivamente. A partir do exposto acima conclui-se que, se os pressupostos assumidos estão correctos, o reservatório está localizado a uma profundidade média de 2.000 m , ou pelo menos a máxima profundidade atingida pelo circuito hidromineral será de cerca de 2.000 m (Correia et al., 1997). Se o modelo for apropriado, o gradiente geotérmico no batólito granítico de S. Pedro do Sul será cerca de $54\text{ }^\circ\text{C/km}$. Além disso, a partir das análises químicas em amostras do granito de SPS, admite-se que a fonte de calor para a zona geotermicamente anómala será a elevada produção de calor radiogénico das rochas graníticas da área, especialmente o granito de SPS. A utilização de um conjunto de diagrfias convencionais na sondagem mecânica que deu origem a esta diagrafia de Temperatura permitiria uma melhor compreensão das características físicas do maciço granítico em profundidade.

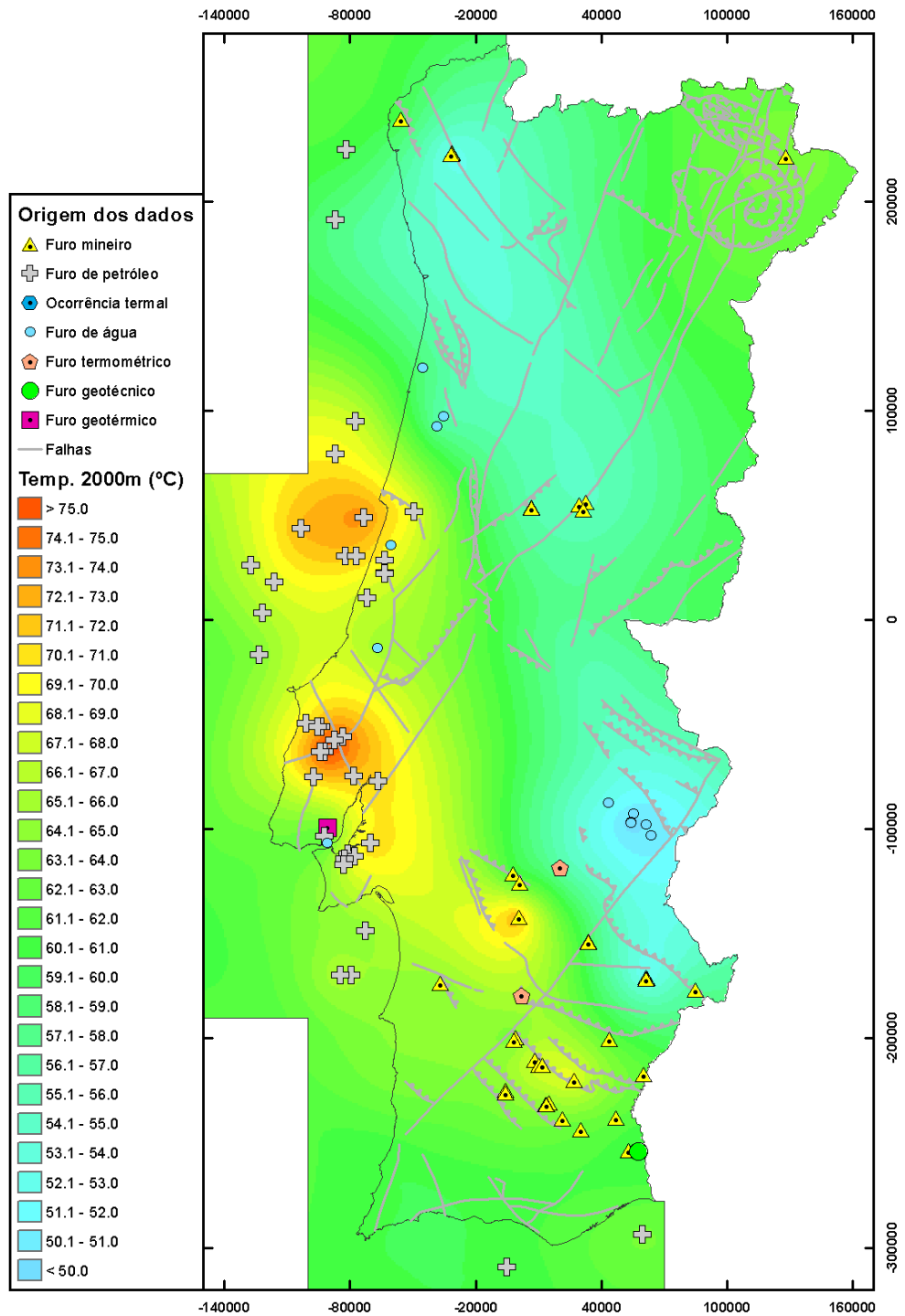


Fig. 3. 26 – Mapa da distribuição da temperatura a 2.000 m de profundidade em Portugal Continental.

Na Tabela 3.5 encontra-se um resumo da informação aqui descrita, nomeadamente no que diz respeito à caracterização da fonte dos dados, a DFC estimada, a temperatura a 500, 1.000 e 2.000 m de profundidade para os 131 pontos da Fig. 3.8.

Tabela 3.5 - Resumo da informação descrita neste capítulo, nomeadamente no que diz respeito à caracterização da fonte dos dados, a DFC estimada e à temperatura a 500, 1.000 e 2.000 m de profundidade para os 131 pontos da Fig. 3.8. Não foram estimadas as temperaturas a 500, 1.000 e 2.000 m de profundidade nas ocorrências termais. Para tal, é necessário um estudo mais detalhado das características das captações de cada ocorrência, o que terá que ser feito em colaboração com a DGEG.

Número	Nome	Tipo	DFC	Classificação DFC	Temperatura 500m	Temperatura 1.000m	Temperatura 2.000m
1	Caldas de Monção	ocorrência termal	81	–	–	–	–
2	SD27	mineiro	83	2	28	41	68
3	Caldas do Gerês	ocorrência termal	71	–	–	–	–
4	Carvalhos	ocorrência termal	43	–	–	–	–
5	Cavala-4	petróleo	78	2	25	38	63
6	SV6 (S6)	mineiro	50	2	23	31	47
7	SV3 (S3)	mineiro	62	2	23	32	49
8	SV4 (S4)	mineiro	51	2	23	31	48
9	Caldelas	ocorrência termal	55	–	–	–	–
10	S4A	mineiro	86	3	25	39	66
11	Quinta do Eirogo	ocorrência termal	68	–	–	–	–
12	Caldas das Taipas	ocorrência termal	53	–	–	–	–
13	5A-1	petróleo	71	2	23	34	55
14	S. Miguel das Aves	ocorrência termal	46	–	–	–	–
15	Caldas de Vizela	ocorrência termal	68	–	–	–	–
16	Caldinhas	ocorrência termal	81	–	–	–	–
17	Caldas do Carlão	ocorrência termal	69	–	–	–	–
18	Sao Lourenço	ocorrência termal	68	–	–	–	–
19	Caldas de Canaveses	ocorrência termal	57	–	–	–	–
20	Caldas do Moledo	ocorrência termal	51	–	–	–	–
21	Fonte Santa do Seixo	ocorrência termal	42	–	–	–	–
22	Sao Vicente	ocorrência termal	74	–	–	–	–
23	Caldas de Aregos	ocorrência termal	65	–	–	–	–
24	Entre-os-Rios	ocorrência termal	58	–	–	–	–
25	Longroiva	ocorrência termal	72	–	–	–	–
26	Caldas de S. Jorge	ocorrência termal	66	–	–	–	–
27	Termas do Carvalhal	ocorrência termal	65	–	–	–	–
28	Caldas da Cavaca	ocorrência termal	65	–	–	–	–
29	ACCP5	água	42	4	27	38	60
30	ACCP4	água	42	4	27	38	60
31	Fonte Sta de Almeida	ocorrência termal	54	–	–	–	–
32	S. Pedro do Sul	ocorrência termal	72	–	–	–	–
33	Banho de Alcafache	ocorrência termal	66	–	–	–	–
34	6RN	água	34	3	23	32	48
35	Caldas de Sangemil	ocorrência termal	79	–	–	–	–
36	Carapau-1	petróleo	70	1	30	44	72
37	7RN	água	34	2	23	32	48
38	Felgueira	ocorrência termal	61	–	–	–	–
39	Caldas do Cró	ocorrência termal	62	–	–	–	–
40	Caldas e Fonte Santa	ocorrência termal	50	–	–	–	–
41	Luso	ocorrência termal	24	–	–	–	–
42	Dourada-1	petróleo	84	2	26	40	68
43	Caldas de S. Paulo	ocorrência termal	86	–	–	–	–

Número	Nome	Tipo	DFC	Classificação DFC	Temperatura 500m	Temperatura 1000m	Temperatura 2000m
44	Caldas de Penacova	ocorrência termal	19	–	–	–	–
45	Unhais da Serra	ocorrência termal	62	–	–	–	–
46	MP	mineiro	54	2	22	31	49
47	CP7	mineiro	74	2	26	38	62
48	S7	mineiro	83	3	26	37	60
49	S13	mineiro	69	3	23	31	49
50	CP6	mineiro	59	2	23	32	51
51	Vermoil-1	petróleo	70	1	37	51	79
52	Moreia-1	petróleo	88	1	33	51	86
53	13C-1	petróleo	107	2	29	45	78
54	Monfortinho	ocorrência termal	35	–	–	–	–
55	AC4	água	52	2	28	41	66
56	14A-2	petróleo	70	1	29	43	71
57	14A-1	petróleo	70	1	31	45	73
58	Monte Real W-1	petróleo	70	1	30	44	72
59	14C-1A	petróleo	90	1	26	39	64
60	Monte Real W-9	petróleo	60	1	34	46	70
61	Monte Real W1,5,8,9	petróleo	50	1	35	45	65
62	Faneca-1	petróleo	59	2	28	42	71
63	S. Pedro de Muel-2	petróleo	50	1	34	44	64
64	16A-1	petróleo	80	2	26	40	66
65	Ladeira de Envendos	ocorrência termal	22	–	–	–	–
66	FM	água	42	3	25	36	56
67	17C-1	petróleo	82	2	24	36	58
68	Fadagosa de Nisa	ocorrência termal	50	–	–	–	–
69	Castelo de Vide (Ribeirinho)	ocorrência termal	31	–	–	–	–
70	Monte da Pedra	ocorrência termal	48	–	–	–	–
71	Lourinhã-1	petróleo	58	1	29	41	64
72	Ramalhal-1	petróleo	60	1	35	47	71
73	Campelos-1	petróleo	54	2	28	42	68
74	Benfeito-1	petróleo	58	2	29	44	72
75	Aldeia Grande-2	petróleo	105	1	32	53	95
76	Abadia Wells	petróleo	103	1	43	64	105
77	Matacões N-1	petróleo	38	1	43	51	66
78	Arruda-1	petróleo	60	1	32	44	68
79	Sobral-1	petróleo	62	1	31	47	77
80	Samora 1-1A	petróleo	55	1	40	51	73
81	SDH-10	água	40	1	27	37	56
82	SDH-9	água	40	2	27	37	56
83	SDH-4	água	21	1	23	28	38
84	SDH-5	água	29	1	25	32	45
85	SDH-1	água	34	1	26	34	49
86	AC1-Balum	geotérmico	44.8	2	24	32	47
87	SDH-7	água	36	2	26	35	52
88	Monsanto-1	petróleo	53	2	36	47	68
89	Montijo-1	petróleo	70	2	34	48	76
90	AC1-Sidul	água	27	2	21	26	35
91	Barreiro-2	petróleo	73	2	28	43	72

Número	Nome	Tipo	DFC	Classificação DFC	Temperatura 500m	Temperatura 1000m	Temperatura 2000m
92	Barreiro-4	petróleo	90	2	34	52	88
93	Barreiro-1	petróleo	65	2	30	43	69
94	Barreiro-3	petróleo	58	2	30	42	65
95	TGQC-1	termométrico	58	2	25	34	50
96	TI54	mineiro	53	3	23	32	48
97	TI14	mineiro	64	3	25	35	55
98	VA	mineiro	184	2	40	64	111
99	Pescada-1	petróleo	63	–	23	34	55
100	S31	mineiro	59	1	25	35	54
101	S32	mineiro	102	2	28	41	65
102	Pescada-1	petróleo	53	–	27	38	59
103	Golfinho-1	petróleo	95	–	30	48	83
104	SDM10	mineiro	56	3	25	33	48
105	SDM8	mineiro	52	3	24	31	44
106	SDM5	mineiro	53	3	24	31	45
107	CD1	mineiro	80	2	27	38	59
108	SDSA2	mineiro	80	3	29	41	63
109	SDSA3	mineiro	77	3	27	37	57
110	SDFA-1	termométrico	66	4	29	42	67
111	FS26	mineiro	66	4	25	34	53
112	SB7	mineiro	73	2	27	38	59
113	FS25	mineiro	73	4	26	36	56
114	CV	mineiro	92	2	31	46	75
115	SO14	mineiro	140	3	30	45	75
116	SA14	mineiro	94	2	29	43	71
117	CH1	mineiro	92	3	30	42	66
118	CG	mineiro	112	2	33	52	88
119	OT1	mineiro	115	4	29	42	68
120	AL1	mineiro	82	4	27	38	59
121	NE26	mineiro	72	3	25	35	54
122	NG1	mineiro	96	2	29	42	67
123	NE6	mineiro	97	3	29	42	67
124	NE4'	mineiro	92	3	28	41	66
125	VC1	mineiro	72	3	28	39	60
126	CVH1	mineiro	86	3	27	38	61
127	PN2	mineiro	79	3	27	38	59
128	CST1	mineiro	77	3	29	40	61
129	T7	geotecnia	61	3	25	35	53
130	Algarve-1	petróleo	56	2	27	41	68
131	Ruivo-1	petróleo	62	2	25	36	59

3.9. Artigos do SCI – justificação da sua inclusão e participação da autora

Neste capítulo e associados à temática da Geotermia foram incorporados dois artigos escritos em co-autoria em revistas de circulação internacional com arbitragem científica com factor de impacto definido pelo Science Citation Index, sendo eles: (i) *Heat flow and lithospheric regime in the Iberian Peninsula*, publicado em 1998 na *Tectonophysics*, tendo até à data 97 citações registadas no Scopus e (ii) *New heat*

flow density determinations in Southern Portugal: a geothermal anomaly revisited, publicado igualmente na *Tectonophysics*, com 6 citações no Scopus.

Justifica-se seguidamente a sua inclusão nesta dissertação com uma curta descrição dos mesmos e descreve-se sucintamente em que é que consistiu a participação da autora em ambos.

3.9.1. Fernandèz, M., Marzan, I., Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – Heat flow and lithospheric regime in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, nº 291, pp.29-53.

Este trabalho apresenta os primeiros cálculos de densidade de fluxo de calor à superfície e de produção de calor realizados para a Península Ibérica e suas margens, utilizando dados previamente adquiridos. Neste trabalho, o mapa de densidade de fluxo de calor à superfície inclui 553 determinações estimadas em sondagens de exploração mineira e de água, de petróleo e sondagens *off-shore*. A densidade de fluxo de calor à superfície varia notavelmente do interior da Península Ibérica ($6 \pm 10 \text{ mWm}^{-2}$) para as margens do Atlântico e do Mediterrâneo, onde o fluxo de calor atinge valores de cerca de $40\text{-}50 \text{ mWm}^{-2}$ e $80\text{-}100 \text{ mWm}^{-2}$, respectivamente. O mapa de produção de calor consiste em 664 determinações realizadas em amostras de rocha de Maciço Ibérico Varisco e das Béticas. Os valores mais elevados foram obtidos para as rochas graníticas ($2,5\text{-}3,5 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$), enquanto que em metassedimentos e rochas básicas atingem valores de $1\text{-}2,5 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$ a quase zero, respectivamente. A estrutura litosférica atribuída à Península Ibérica através da combinação do fluxo de calor, produção de calor e dados de elevação indica que a maior parte da Península Ibérica é caracterizada por uma espessura litosférica de $110 \pm 4\text{-}5 \text{ km}$. Este valor é constante na Margem Ocidente do Atlântico, enquanto para a margem do Mediterrâneo a espessura da litosfera diminui até $60\text{-}40 \text{ km}$. Este trabalho também sugere que a produção de calor na zona sul do Maciço Ibérico Varisco deva ser notavelmente mais elevada ($3,7 \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}^{-3}$) do que nas restantes áreas, para que os dados obtidos se ajustem às medidas de fluxo de calor, espessura da crosta terrestre e dados de elevação.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Fernandèz et al. (1998) consistiu na análise e compilação de toda a informação geotérmica existente em Portugal Continental até 1996, ao nível do gradiente geotérmico, condutividade térmica, produção de calor para a elaboração dos mapas ibéricos de DFC e integração dos dados com os colegas espanhóis.

3.9.2. Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – New heat flow density determinations in Southern Portugal: a geothermal anomaly revisited. *Tectonophysics*, nº 291, pp.55-62.

Trabalhos de investigação geotérmica anteriores indicaram a existência de uma anomalia geotérmica no sul de Portugal com valores de densidade de fluxo de calor superiores 200 mW/m^2 . Outros dados geológicos e geofísicos da área não mostram no entanto nenhuma evidência de tal anomalia. Para determinar se existe ou não uma anomalia geotérmica a ocorrer aí, os dados de Geotermia publicados foram reprocessados bem como alguns novos dados de temperatura obtidos a partir de sondagens entretanto disponíveis e/ou publicados, tomando em consideração critérios de equilíbrio térmico e hidrodinâmico. Assim, foram rejeitadas algumas das sondagens anteriormente utilizadas para elaborar o mapa de densidade de fluxo de calor à superfície. O reprocessamento dos dados, juntamente com a existência de novas medições termométricas entretanto realizadas, indicam que tal anomalia geotérmica não existe de facto na área, e que esta é uma zona geotermicamente normal, com valores de densidade de fluxo de calor a variar entre 50 e 90 mW/m^2 , valores esses semelhantes aos obtidos para outras regiões hercínicas na Europa.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Correia e Ramalho (1999) consistiu no acompanhamento da recuperação da sondagem termométrica SDFA-1, realização das várias campanhas termométricas, no processamento e análise dos dados. Elaborou uma primeira versão do trabalho escrito e efectuou igualmente uma análise crítica da informação final.

3.10. Considerações finais

Os valores de DFC e, conseqüentemente, das temperaturas obtidas para diferentes profundidades, que foram sendo publicados ao longo dos anos são consideravelmente diferentes dos valores apresentados no “*Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland*” (Haenel et al., 1988), o que resulta de actualmente se recorrer à utilização de critérios mais apertados de avaliação da qualidade dos dados geotérmicos. Este trabalho resume esses critérios de selecção que foram utilizados no processamento dos dados geotérmicos incluídos na última edição do Atlas dos Recursos Geotérmicos da Europa (Hurter e Haenel, 2002). Apesar da eliminação de alguns valores anómalos ter acontecido com base em dados recolhidos em sondagens mecânicas medidas anteriormente a 1996 e recuperados com fins geotérmicos, a sua publicação foi posterior a essa data (Correia e Ramalho, 1998; Fernández et al., 1998). Este facto permitiu concluir que o processamento aqui descrito se revelou positivo e que os critérios estabelecidos para a selecção de sondagens mecânicas se revelaram adequados, passando desde então e até hoje a ser utilizados conjuntamente para a Península Ibérica. No entanto, os dados rejeitados segundo aqueles critérios poderão – e deverão – ser objecto de uma reavaliação à medida for sendo obtida mais informação geotérmica acerca dessas sondagens mecânicas. Esta é também uma justificação para a manutenção e desenvolvimento da

base de dados em permanente actualização no LNEG, que foi iniciada no tempo antigo IGM, que permite ir preenchendo as lacunas de informação referentes às sondagens mecânicas existentes e adicionar informação acerca de novas sondagens mecânicas que, entretanto, for sendo recolhida. A base de dados seguiu o formato descrito em Ramalho (1999) e cumpre tanto quanto possível os padrões preconizados pela IHFD Commission (Jessop, 1990), pretendendo incluir todos os dados de interesse para Geotermia de cada uma das sondagens medidas em Portugal Continental com este fim e estando igualmente disponível para todos os que pretendam utilizar esses dados para fins científicos. Da mesma forma, a incorporação na mesma de dados provenientes de outros projectos e instituições constitui um factor de valorização que simultaneamente pretende unificar a informação existente e incentivar a partilha de informação inter-institucional.

Finalmente, um outro aspecto aqui descrito que se afigura de importância para a comunidade científica em geral consiste na elaboração de um esboço de classificação da qualidade das estimativas de DFC. Com esta sugestão de classificação, baseada nos critérios de rejeição de sondagens mecânicas utilizadas, um possível utilizador da DFC estimada por outros, poderá, assim, considerar individualmente cada valor estimado, tendo uma noção da sua qualidade e optar por incluí-lo ou não no seu trabalho, consoante o rigor pretendido.

4. Utilização de métodos geofísicos em problemas ambientais

4.1. Objectivos do capítulo

Este capítulo tem como objectivo principal dar uma perspectiva global das vantagens da utilização de métodos geofísicos de superfície e a sua relação com sondagens mecânicas e contribuição das mesmas na avaliação e resolução de um conjunto diversificado de problemas ambientais. Estes problemas ambientais estão relacionados com contaminações por aterros controlados e monitorização de processos de selagem de lixeiras a céu aberto e evolução temporal das respectivas plumas de contaminação, influência das estruturas geológicas na envolvente de antigas explorações mineiras de materiais radioactivos, dispersão de contaminantes em zonas aquíferas cuja geometria foi determinada a partir de métodos geofísicos e na preservação de aquíferos fissurados termais. Para cada uma das situações, é abordada a utilização de vários métodos geofísicos, escolhidos e utilizados de acordo com o ambiente geológico presente e com os objectivos a atingir, utilizando exemplos da experiência profissional da autora da presente dissertação. Em cada caso, é feita uma análise crítica dos resultados obtidos, bem como das vantagens de cada método utilizado nas situações e ambientes geológicos abordados, incertezas a eles associadas e consequências nos resultados e conclusões finais.

4.2. Introdução

O diagnóstico e avaliação de problemas ambientais ao nível de solos e águas subterrâneas faz-se recorrendo com frequência aos métodos de prospecção geofísica para complementar espacialmente e em profundidade a restante informação existente. De facto, as características não destrutivas e os baixos custos envolvidos relativamente à geofísica de superfície e a possibilidade de uma cobertura geográfica

que pode ser apreciável tornam-nos ferramentas quase indispensáveis em trabalhos de investigação nestes domínios. As suas potencialidades aumentam significativamente quando existem dados de sondagens mecânicas que possam servir de referência e para correlação com os resultados. No entanto, consoante as características do meio geológico envolvente e os métodos geofísicos utilizados, o tipo de informação obtida varia. Se, por um lado, estes métodos, pela sua diversidade, permitem estimar um conjunto apreciável de propriedades físicas das formações geológicas, por outro possibilitam uma caracterização preliminar dos fluidos e do modo como estes ocorrem, o que torna com frequência possível a determinação da origem de problemas ambientais e uma contribuição importante para a sua resolução.

Mostram-se alguns trabalhos de investigação em que a caracterização dos fluidos teve um contributo significativo dado pela utilização de métodos geofísicos de superfície em conjunto com a informação proveniente de sondagens mecânicas, quer na prevenção de eventuais futuros problemas ambientais, quer no diagnóstico e mitigação de problemas já existentes e cuja premência de resolução seja flagrante e urgente. São aqui apresentados, interpretados e discutidos os resultados obtidos em locais críticos cuja avaliação, diagnóstico ou prevenção da contaminação sejam factores prioritários. São focados ambientes sedimentares e cristalinos e o contributo individual dos métodos geofísicos e das sondagens mecânicas em situações distintas. Estes trabalhos de investigação passam pelo estudo de plumas de contaminação, características de fluidos e das formações aquíferas e evolução em profundidade de estruturas hidraulicamente condutoras. São apresentados cinco exemplos de situações, ambiental e geologicamente diferentes, em que tanto a aplicação de métodos geofísicos como a utilização sondagens mecânicas serviram objectivos distintos na caracterização de fluidos.

Dentro destes exemplos, é feita uma abordagem às vantagens técnicas da realização de estudos 4D na caracterização de plumas de contaminação numa lixeira a céu aberto localizada próximo de Ovar (Senos Matias et al., 1994), que foi entretanto selada. Este trabalho envolveu a utilização de métodos multidisciplinares, com um intervalo de quase 10 anos, em que inicialmente a prospecção geofísica serviu de base para a definição da geometria da pluma de contaminação e dos locais de implementação de piezómetros de monitorização para numa fase posterior avaliar a sua evolução. Pelas características sedimentares do terreno, foram utilizados métodos de prospecção electromagnética no domínio frequência (FDEM) numa primeira fase dos levantamentos, seguidos pela realização de prospecção eléctrica consistindo em sondagens eléctricas verticais (SEVs). Após a selagem da lixeira, a monitorização da pluma de contaminação foi realizada com o recurso aos mesmos métodos utilizados na fase de diagnóstico e ainda polarização induzida (IP).

A contrastar com esta primeira situação, contemplando um estudo inicial detalhado e sustentado, faz-se a caracterização de lixiviados numa lixeira localizada próximo de Óbidos, que foi selada sem a realização de estudos de detalhe a envolver informação geológica, hidrogeológica e geofísica, referindo os danos financeiros e ambientais que poderiam ter sido evitados, caso estes tivessem sido feitos. Aqui, pela complexidade da situação, foi necessário utilizar um leque mais vasto de métodos geofísicos para

complementar a restante informação, englobando métodos electromagnéticos FDEM (RF-EM e EM34), potencial espontâneo (SP), métodos eléctricos (através da realização de SEVs) e magnéticos, e aproveitando os meios existentes (Ramalho et al., 2012a). Para isso, as sondagens mecânicas aqui utilizadas consistiram em piezómetros construídos anteriormente ao aterro e nos tubos de biogás construídos aquando do mesmo.

Um outro assunto abordado neste capítulo constitui no estudo da dispersão de contaminantes em antigas áreas mineiras radioactivas, a partir de modelos hidrogeológicos parametrizados com base na interpretação dos dados de espessura da zona alterada num aquífero livre semi-cristalino, modelação 3D de FDEM e com informação de espectrometria de radiação gama. Estes dados serviram de base para a construção posterior de um modelo hidrogeológico em regime estacionário para a visualização do modo como se dispersam as partículas de urânio com origem no desmonte experimental do depósito de urânio de Maria Dias, em Nisa, na bacia hidrográfica onde este se localiza (Ramalho et al., 2012b).

A recuperação de zonas de risco ambiental é igualmente um aspecto importante a referir, que não foi esquecido neste capítulo. Em zonas cristalinas, a abordagem difere das zonas sedimentares excepto nos casos em que o seu funcionamento hidráulico, pela elevada alteração superficial das formações, se possa considerar análogo. Aqui, na identificação de fracturas eventualmente produtivas para caracterização da envolvente da antiga mina de urânio da Quinta do Bispo, a heterogeneidade estrutural característica deste tipo de formações implica a necessidade de um conhecimento do modo como as fracturas evoluem em profundidade. Assim, a par da informação a este respeito existente nos *logs* dos piezómetros existentes, foram efectuadas SEVs, FDEM e sísmica de reflexão e refração, no sentido de identificar zonas de potencial circulação de fluidos ao longo de perfis cuja localização foi escolhida de forma a rodear a zona da antiga mina (Ramalho et al., 2009b).

Finalmente, este capítulo aborda a preservação de aquíferos e prevenção de eventuais futuros problemas ambientais no decurso da sua exploração. Aqui, mostram-se os critérios que presidiram à escolha do local mais adequado para a realização de uma sondagem profunda para a captação de água quente no aquífero termal que fornece as Caldas de Monção, de forma a preservá-lo de contaminações antrópicas e do Rio Minho, localizado nas proximidades. Neste capítulo, a par de toda a informação previamente existente relacionada com captações de água termal relativamente profundas e de prospecção eléctrica (dispositivos dipolo-dipolo e rectângulo), foram efectuadas novas SEVs e sísmica de reflexão, no sentido de compreender a estrutura 3D do aquífero termal fissurado. Com esta informação, foi possível seleccionar os melhores locais para a implantação de uma captação profunda, que foi realizada com sucesso (Ramalho et al., 2012c).

Estes exemplos encontram-se descritos em detalhe nos artigos publicados em revistas de circulação internacional com arbitragem científica que se apresentam em anexo.

4.3. Utilização de métodos geofísicos em estudos ambientais

A aprovação em 1997 do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU I), seguindo a Directiva 75/442/CEE (PERSU, 1997), modificou o modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em Portugal, o que conduziu ao fim da existência das cerca de 300 lixeiras municipais, à reorganização das entidades gestoras e procedeu à construção de infra-estruturas e meios adequados para uma gestão sustentável dos mesmos.

Da mesma forma, o encerramento de antigas áreas mineiras e posterior monitorização da evolução das consequências ambientais da sua exploração desordenada durante décadas e posterior abandono foram igualmente levados a cabo por entidades competentes designadas pelo Estado para o efeito, nomeadamente a ex-EXMIN (Exmin, 2000-2001) e posteriormente a Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM). Desde o ano de 2003 que a ex-EXMIN desenvolveu estudos de caracterização e projectos de remediação para antigas áreas mineiras cujas características e condições as colocassem na classificação de prioritárias a nível ambiental (Exmin, 2002-2003). Alguns destes trabalhos, pela sua importância estratégica ou complexidade geológica ou geográfica requereram informação adicional para além dos estudos geológicos e hidrogeológicos tradicionais, quer a nível da extensão da contaminação, quer a nível da profundidade. Foi assim necessária uma avaliação mais exacta do modo como os fluidos percolam na envolvente de antigas minas e proceder ao diagnóstico da situação de referência, para posterior elaboração do projecto de engenharia tendente à recuperação ambiental da cada zona e prevenção das suas consequências ambientais a médio e longo prazo.

A eficácia dos métodos geofísicos é tanto maior quanto maior for o contraste entre os diversos meios envolvidos (Reynolds, 1997), pelo que a sua reconhecida utilização em situações ambientalmente susceptíveis de constituírem um factor acrescido de desequilíbrio dos ecossistemas, sustenta-se no facto de em geral proporcionarem contrastes entre as propriedades físicas dos meios envolventes que por vezes são largamente superiores aos dos ambientes naturais. O facto dos métodos geofísicos possibilitarem, de uma forma relativamente económica (Pereira e Lima, 2007), uma investigação do solo em extensão e profundidade que pode ser correlacionada com dados analíticos, permite estender a informação disponível muito para além da análise pontual e dispendiosa das águas e solos e extrapolar com bastante mais segurança para locais onde não existe informação. Além disso, a dificuldade e inconveniência de acesso ao subsolo que por vezes se verificam em zonas onde existem problemas de carácter ambiental tornam desejável, tanto quanto possível, a utilização destes métodos, pois permitem a aquisição de informação em profundidade de uma forma não invasiva, que não arrisque o contacto e a contaminação entre diferentes aquíferos (Senos Matias, 2001). Por isso, a sua utilização traz grandes vantagens, uma vez que permite obter informações sobre zonas onde é claramente desaconselhável uma intervenção em profundidade numa fase de diagnóstico para levar a cabo uma análise detalhada dos parâmetros referidos em Nazari et al. (2011). Trabalhos de prospecção geofísica de superfície relacionados com Ambiente abrangendo áreas como intrusões salinas (Greenwood et al., 2006; Oliveira et al., 2011), contaminações ambientais

(Frohlich et al., 1994; Ramalho et al., 2002; Senos Matias et al., 2000; Figueiredo et al., 2011) ou ainda caracterização geológica de locais ambientalmente sensíveis (Bahaa-eldin et al., 2010) utilizando métodos eléctricos, electromagnéticos, sísmicos e radiométricos, constituem uma base de trabalho para a caracterização espacial que complementa a informação pontual obtida a partir de sondagens mecânicas ou sondagens individuais. A Fig. 4.1 mostra alguns desses objectivos e utilização de métodos geofísicos de superfície com fins ambientais.

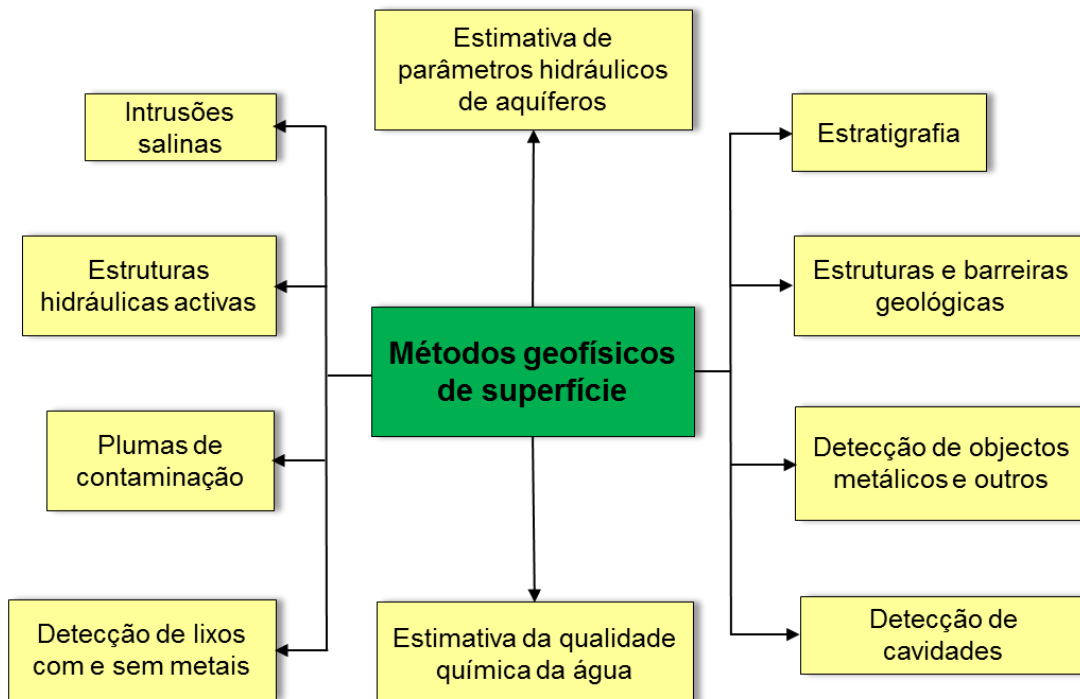


Fig. 4.1 – Objectivos e utilização de métodos geofísicos de superfície com fins ambientais.

Em particular, em algumas situações ambientalmente críticas, os métodos geofísicos de superfície dão um contributo importante para a sua avaliação (Sharma, 1997):

1. Localização de estruturas geológicas (falhas, fissuras, zonas de deformação, contactos geológicos, etc.) sob lixeiras existentes e locais de deposição de resíduos.
2. Detecção e localização de resíduos enterrados, em particular a sua delimitação e caracterização física.
3. Exploração de novos locais em localidades sísmica e tectonicamente estáveis com estruturas que protejam a rocha e a água subterrânea da contaminação para cada tipo de resíduo.
4. Diagnóstico das situações de referência para execução de projectos de recuperação tecnicamente sustentados.

Dependendo das características dos problemas a analisar, estes métodos cobrem por vezes áreas consideráveis. Como tal, a utilização de um método geofísico inicial que permita cobrir toda a área de uma forma expedita, conduz numa primeira fase a um diagnóstico preliminar e à definição de sub-áreas a prospectar com malha mais apertada ou com outros métodos com maior capacidade de resolução horizontal ou vertical (Senos Matias, 2001), atingindo no seu todo profundidades de investigação que se venham a revelar mais adequadas ao problema em questão ou cujas propriedades medidas vão de encontro a uma resolução mais eficaz do mesmo. Tal como Senos Matias (2001) refere, a metodologia de trabalho para estudos de problemas ambientais é em tudo semelhante à prospecção mineira, porém com uma escala de trabalho substancialmente diferente.

Embora esta informação esteja associada a um certo grau de incerteza, complementa de uma forma muito útil os dados obtidos por análises pontuais, e que, regra geral são em pequena quantidade. Para ultrapassar possíveis problemas na incerteza da interpretação dos resultados, e caso seja possível, é aconselhável a utilização conjunta de mais do que um método geofísico (Senos Matias, 2001). Por outro lado, devido à existência de anomalias que possam de alguma forma ser erradamente interpretadas, devido às características dos fluidos ou dos ambientes geológicos em geral consideravelmente heterogéneos, é essencial um bom conhecimento geológico da zona e desejável que sejam utilizados vários métodos em simultâneo, uma vez que cada método responde a diferentes propriedades do solo (Telford et al., 1995). Estes métodos, designadamente prospecção eléctrica, electromagnética, *ground-penetrating radar* (GPR), sísmica de refração e reflexão ou radiometria, entre outros de utilização menos comum, serão escolhidos de consoante os parâmetros medidos sirvam ou não os objectivos dos trabalhos.

As antigas pedreiras desactivadas constituíram locais preferenciais para a instalação de aterros sanitários, como é o caso do aterro de Laveiras, no Concelho de Oeiras; em alternativa, foram locais preparados especialmente para o efeito, como é o caso dos aterros de Outeiro da Cabeça, em Torres Vedras ou o de Braga (Mota, 2008) ou foram implantados nos locais das anteriores lixeiras que se limitaram a ser seladas na sua superfície, como foi o caso de Maceda ou das Gaeiras. Em qualquer dos casos, sejam lixeiras encerradas ou aterros sanitários, é necessário proceder-se a uma monitorização constante ou periódica, uma vez que estas estruturas podem constituir uma potencial fonte de poluição e contaminação dos aquíferos. Esta monitorização poderá ser feita com o auxílio de modelação geofísica 1D, 1,5D, 2D e 3D; nestes casos, a visualização 4D dos problemas ambientais e contaminações permite uma avaliação temporal do modo como estes evoluem. Como tal, a realização de várias campanhas geofísicas nos mesmos locais e com os mesmos métodos ou métodos análogos introduzindo o factor tempo, permite comparar os mesmos dados entre si e com parâmetros hidrogeológicos regionais (Senos Matias, 2001) e assim ter uma ideia bastante clara do modo como evoluiu a contaminação.

No que respeita ao estudo de locais de resíduos perigosos ou não perigosos, os métodos geofísicos podem ser usados para a localização e delimitação de plumas de contaminação, estabelecer os seus fluxos e respectivas direcções de propagação, a

localização de locais de resíduos enterrados e a investigação da qualidade da água subterrânea (Martinho, 2003). Além disso, pode estimar-se a profundidade dos locais de depósito de resíduos enterrados e do substrato rochoso sob a base das lixeiras.

A utilização de métodos geofísicos de superfície na caracterização de fluidos com a ajuda de informação proveniente de sondagens mecânicas é outra forma de aferir os dados geofísicos, pelo que a sua exploração criteriosa e estruturada conduz geralmente a resultados interessantes e à melhoria da qualidade dos resultados obtidos. Em particular, as diagrfias constituem uma fonte de informação que mede em simultâneo várias propriedades físicas a profundidades bem definidas e sem a incerteza que acompanha os *logs* litológicos quando as sondagens são realizadas com métodos destrutivos. Kahlil et al. (2010) correlacionaram métodos geofísicos de superfície (GPR e SEVs) com informação proveniente de sondagens mecânicas, designadamente os respectivos *logs* e as diagrfias efectuadas, para caracterizar hidraulicamente um aquífero superficial multicamada localizado na Núbia, Egipto. Combinando os resultados obtidos pelos vários métodos, foram determinadas a salinidade da água e a porosidade, a partir do conteúdo volumétrico em água e da saturação em água estimados a partir de uma SEV e de um perfil de GPR, respectivamente. A realização de testes de aferição da sensibilidade dos modelos 1D, 1,5D, 2D e 3D obtidos permite uma boa avaliação da qualidade dos mesmos (Hermozilha et al., 2010).

A aplicação dos métodos geofísicos, em especial dos métodos eléctricos ou electromagnéticos, é particularmente eficaz em zonas sedimentares porosas, em que as variações da resistividade obtidas estão fundamentalmente relacionadas com variações na litologia e/ou na condutividade da água subterrânea. As SEVs podem estimar variações da espessura da profundidade, espessura e resistividade das camadas com contrastes suficientes. Os valores de resistividade eléctrica podem ser usados para identificar a provável composição geológica de uma camada, nomeadamente perante intercalações de camadas argilosas e arenosas em presença de sistemas aquíferos multicamada. Além disso, as propriedades físicas de muitas formações, em especial as sedimentares, são significativamente alteradas pela presença de água nos poros e fissuras. Para uma mesma formação, este grau de alteração vai variar com a natureza e concentração dos contaminantes (Sharma, 1997). As variações na condutividade da água subterrânea são devidas às características dessa mesma água, quer a nível de variações na mineralização total resultantes da existência de vários níveis aquíferos com distintas composições químicas naturais da água nativa ou pela introdução de factores externos, em geral antropogénicos, que alteram significativamente as condições de potabilidade preconizadas pela legislação vigente. É, pois, possível a estimativa das características geoelectricas de uma pluma de contaminação e como tal, da resistividade eléctrica dos lixiviados e fluidos não contaminados em zonas de *background*. É igualmente possível a distinção entre os vários tipos de camadas, permitindo, com o recurso à Lei de Archie (Archie, 1942; Carpenter et al., 2009), efectuar estimativas da condutividade da água e, indirectamente, do seu grau de contaminação.

No caso de ambientes cristalinos ou rochas compactas, a abordagem e objectivos da utilização destes métodos assumem contornos diferentes. A utilização de métodos eléctricos pretende compreender o modo como se processa o fluxo de água subterrâneo através da identificação das estruturas geológicas que favoreçam a circulação da água subterrânea. Como tal, poderá identificar zonas de alteração ou fracturação ou ainda a identificação da profundidade do NHE. No caso de sondagens mecânicas realizadas para prospecção de águas minerais naturais, de circulação profunda em ambientes cristalinos, a utilização de métodos geofísicos na sua marcação incrementou a taxa de sucesso de 61% para 85% num universo de 110 furos (Carvalho, 1996; 2006). De uma forma geral, os objectivos e utilização de métodos geofísicos de superfície com fins ambientais poderão dar um importante contributo ou por si só responder com sucesso numa variedade considerável de situações.

A Tabela 4.1 é uma adaptação das tabelas de Senos Matias (2001) e Martinho (2003) relativamente à utilização dos diversos métodos geofísicos aplicados em Ambiente nas situações referidas da Fig. 4.1.

Tabela 4.1 – Utilização dos métodos geofísicos aplicados em Ambiente (modificado de Senos Matias, 2001; Martinho, 2003).

Aplicação	Reflexão sísmica	Refracção sísmica	Gravimetria	Magnética	SP	Resistividade/IP	Electromagnética	Georadar	Radio-metria	Diagrafias
Cartografia geológica e hidrogeológica	1	1	2	1	0	2	2	2	2	0
Estruturas e barreiras geológicas	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2
Estruturas hidráulicas activas	1	1	0	0	2	2	2	2	2	2
Plumas de contaminação	0	0	0	0	0	2	2	2	1	2
Lixos com metais	0	0	0	2	0	2	2	2	0	2
Lixos sem metais	1	1	0	0	1	2	2	2	0	2
Objectos metálicos	0	0	0	2	0	2	2	2	0	1
Estratigrafia	2	2	1	1	0	2	2	2	0	2
Cavidades	2	2	1	0	0	2	2	2	0	2
Estimativa da qualidade de água	0	0	0	0	0	2	2	2	0	2
Estimativa de parâmetros hidráulicos	1	1	0	0	0	2	2	2	0	2

0 – pouco utilizado; 1 – utilizado; 2 – bastante utilizado.

4.4. Casos de estudo de aplicação de métodos geofísicos de superfície a problemas ambientais

Dos métodos geofísicos de superfície mais utilizados em diagnósticos ambientais destacam-se os métodos eléctricos e electromagnéticos, cuja resposta é significativamente afectada pela mineralização total dos fluidos subterrâneos que circulam em profundidade. Em particular, os métodos electromagnéticos no domínio frequência (FDEM), nomeadamente o Geonics EM31 e EM34 constituem bons indicadores iniciais, que permitem aferir da necessidade de utilizar métodos adicionais, quais e em que zonas. No caso da prospecção eléctrica, as configurações geométricas dos eléctrodos utilizadas em cada situação dependem de vários factores, tão díspares como a profundidade a investigar, as variações laterais de resistividade expectáveis, ou até do espaço disponível. Neste capítulo, serão mostradas as vantagens da utilização dos dispositivos eléctricos mais usuais em investigações ambientais, designadamente Wenner (Senos Matias et al., 1994), Schlumberger (Ramalho et al., 2009b; 2012a) ou dipolo-dipolo (Ramalho et al., 2012c), correlacionando os resultados sempre que possível com sondagens mecânicas ou informação proveniente destas e de outros métodos geofísicos aplicados previamente. A sua rapidez de utilização e a quantidade e qualidade de informação que a sua interpretação permite inferir torna-os atractivos em muitas circunstâncias. Outros métodos geofísicos complementares, adequados a cada caso específico, poderão e deverão no entanto ser utilizados. Além da informação gravimétrica ser potencialmente útil na identificação de estruturas geológicas sob locais de deposição de resíduos ou detecção de cavidades, tem-se a prospecção magnética, eficaz quando aplicada em lixeiras para informação do tipo de material enterrado, ou tipo de lixo doméstico (Sharma, 1997).

A utilização simultânea de informação proveniente de sondagens mecânicas para correlação com estes dados poderá ser um factor de grande importância para a diminuição das incertezas. Neste capítulo, apresentam-se alguns tipos de trabalhos em que diversos tipos de sondagens mecânicas assumiram um papel de relevo na caracterização de fluidos e do modo como estes ocorrem. Por um lado, através de piezómetros executados com base nos resultados obtidos em levantamentos geofísicos de superfície, que forneceram informações significativas acerca da direcção do fluxo subterrâneo ou das análises químicas efectuadas em amostras de água neles colhidas (Senos Matias et al., 1994). Por outro, apresenta-se o modo como foi utilizada informação proveniente de sondagens hidrogeológicas e interpretada a informação geofísica disponível e entretanto realizada para a marcação do local de novas captações profundas com o objectivo de preservar um aquífero termal de água quente (Ramalho et al., 2012c). Num outro caso-estudo aqui apresentado, os tubos para libertação de biogás dispersos pelo aterro e realizados aquando este, forneceram alguns parâmetros físico-químicos dos lixiviados produzidos pelos RSU (Ramalho et al., 2012a).

A aplicação simultânea de sísmica de reflexão ou refacção poderá igualmente dar indicações importantes a este respeito (Carvalho et al., 2005; Ramalho et al., 2009b; 2012c). Aqui, as variações nas propriedades físicas dos materiais são em geral

devidas à diminuição do grau de alteração das rochas em profundidade, passando a percolação da água a fazer-se por porosidade secundária. A intensidade da fracturação, dimensões das caixas de falha e possível presença de minerais de alteração a preencher os planos de falha são factores importantes aquando da escolha do método geofísico a utilizar para a sua identificação. Uma conjugação destes factores poderá levar à necessidade de introduzir um método não inicialmente previsto, que possa esclarecer eventuais dúvidas a este respeito.

A par da análise da informação proveniente das sondagens mecânicas, a realização simultânea de estudos de geologia, geoquímica e/ou hidrogeologia e detecção remota para calibração e interpretação dos dados de geofísica obtidos enriquece de forma significativa a restante informação recolhida. É o caso da realização da Carta Geológica (Dias et al., 2011) e Geoambiental (Quental et al., 2011) da Região da Grande Beira, Moçambique (Fig. 4.2), onde foi introduzido este conjunto de metodologias (Dias et al., 2010; Batista et al., 2011; Fernandes et al., 2010; 2012), a par da realização de levantamentos geofísicos de FDEM e reinterpretação de dados de SEVs, que visaram uma avaliação integrada dos factores que influenciam a distribuição do tecido urbano da cidade conjugadas com a evolução da dinâmica litoral associada à existência de problemas ligados a processos antropogénicos.

Este trabalho (Dias et al., 2011; Quental et al., 2011) pretendeu constituir uma ferramenta de suporte na implementação de políticas governamentais para uma exploração sustentada de recursos naturais e da água subterrânea. A metodologia integrada desenvolvida permitiu a cartografia de áreas com maior ou menor probabilidade de existência de água salina e salobra aprisionada em formações geológicas de sub-superfície a profundidades superiores a 20 m, identificada pelas SEVs e em perfis 2D de FDEM, passível de ser captada em poços de abastecimento público superficiais que servem as comunidades de poucos recursos localizadas em áreas suburbanas da cidade, o que actualmente acontece com frequência. Nesta situação, a localização dos poços de abastecimento público a captar água com estas características foi determinante na escolha dos locais dos levantamentos geofísicos e respectiva interpretação (Fig. 4.2). Por sua vez, os levantamentos geoelectrónicos existentes e de FDEM deram indicações significativas acerca da origem deste problema (Quental et al., 2011).

A possibilidade de pesquisar contaminações por hidrocarbonetos através de métodos geofísicos tem sido objecto de estudo em Portugal (Martinho, 2003; Senos Matias et al., 2007). Mais tarde, foram realizados trabalhos no âmbito do projecto “Desenvolvimento de novas estratégias de amostragem, análise e modelação para caracterização da contaminação dos solos e águas subterrâneas por contaminantes orgânicos” (CRUDE) (Condesso Melo et al., 2012), tendo como principal objectivo a definição de novas metodologias de caracterização espacio-temporal dos processos de transporte de contaminantes orgânicos no meio solo-zona não saturada-aquífero, que permitam caracterizar as contaminações já existentes. Neste projecto, foram utilizadas várias metodologias, que de forma integrada, pretendem contribuir para auxiliar na selecção das mais adequadas tecnologias de remediação de aquíferos de acordo com a especificidade do local.

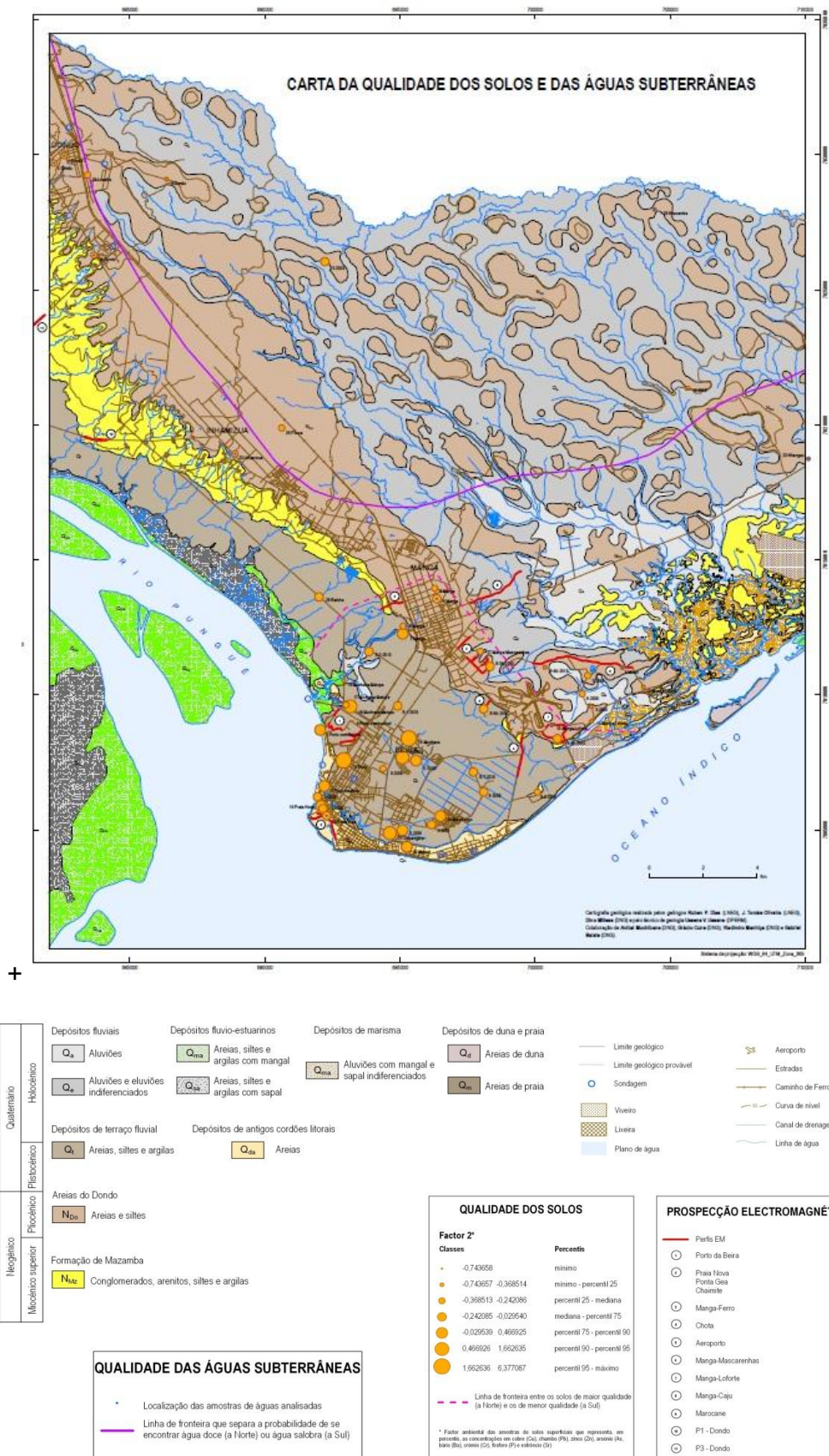


Fig. 4.2 – Excerto da Carta Geoambiental da região da Grande Beira, Moçambique, à escala original 1:50.000 (Quental et al., 2011).

Foram realizados estudos multidisciplinares utilizando, integrando e cruzando informação sobre geologia, solos, hidrogeologia, geoquímica (traçadores), geofísica, geostatística, modelação e SIGs, que tiveram como objectivo a obtenção de um conhecimento detalhado e coerente acerca das diferentes propriedades físico-químicas dos solos, zona não saturada e águas subterrâneas que condicionam o transporte de contaminantes, através do estudo paralelo de vários locais (Condesso Melo et al., 2012).

Um deles consiste na área da antiga Sociedade Portuguesa de Explosivos (SPEL), no Seixal, que produziu trinitrotolueno (TNT) e dinitrotolueno (DNT). durante aproximadamente 50 anos (1949-1998). As águas residuais resultantes dessa produção foram depositadas em lagoas, escavadas em areias do Plioquaternário, sem qualquer tipo de impermeabilização, contaminando solos e águas. Foram detectados níveis de contaminação preocupantes no aquífero freático, com circulação nas formações do Plioquaternário, bem como no 2º aquífero suportado pelas formações do Pliocénico inferior e Miocénico. Estes dois aquíferos, com características hidrogeológicas e hidráulicas diferenciadas, estão separados por um nível aquífero, nem sempre contínuo, que confina a unidade inferior, atenuando a progressão da contaminação (Amaral et al., 2009).

A avaliação da distribuição da pluma de contaminação foi realizada recorrendo a métodos eléctricos (dispositivo dipolo-dipolo) e electromagnéticos TDEM e FDEM dentro e fora do perímetro da SPEL. Com o equipamento FDEM Geonics EM34 efectuaram-se, em 178 estações, medidas com seis geometrias diferentes que correspondem a profundidades de investigação teóricas de 7,5 m, 15 m, 30 m e 60 m e foi efectuada modelação 2D com o *software* EM34-2D (Monteiro Santos, 2004). A partir da interpretação dos resultados de 41 sondagens TDEM, realizadas na área, efectuaram-se 15 perfis de prospecção eléctrica, utilizando o dispositivo dipolo-dipolo com profundidade de investigação a variar de 12 a 43 m. Num destes perfis dipolo-dipolo, localizado numa lagoa de deposição, realizaram-se 2 sondagens mecânicas com 10 m de profundidade cada (Sd1 e Sd2), com o objectivo de atravessar zonas de alta (Sd1) e baixa resistividade (Sd2). Amostrou-se o solo, a zona não saturada e a matriz do aquífero. Por cada metro de profundidade perfurada retiraram-se para amostragem os últimos 30 cm. As análises laboratoriais incluíram a granulometria e a mineralogia do solo e formações subjacentes, a identificação de argila, textura, porosidade, pH, teor de matéria orgânica, a quantificação da Poli-nitroarómicos (P-NAC, nomeadamente TNT, DNT e NT), microbiologia (Gonçalves, 2011) e resistividade eléctrica (Fig. 4.3).

As curvas de distribuição em profundidade dos vários parâmetros poderão indicar quais os factores que influenciam a mobilidade dos contaminantes (Condesso Melo et al., 2012) e poderão ser relacionados com a modelação obtida pelos vários métodos de geofísica aqui utilizados.

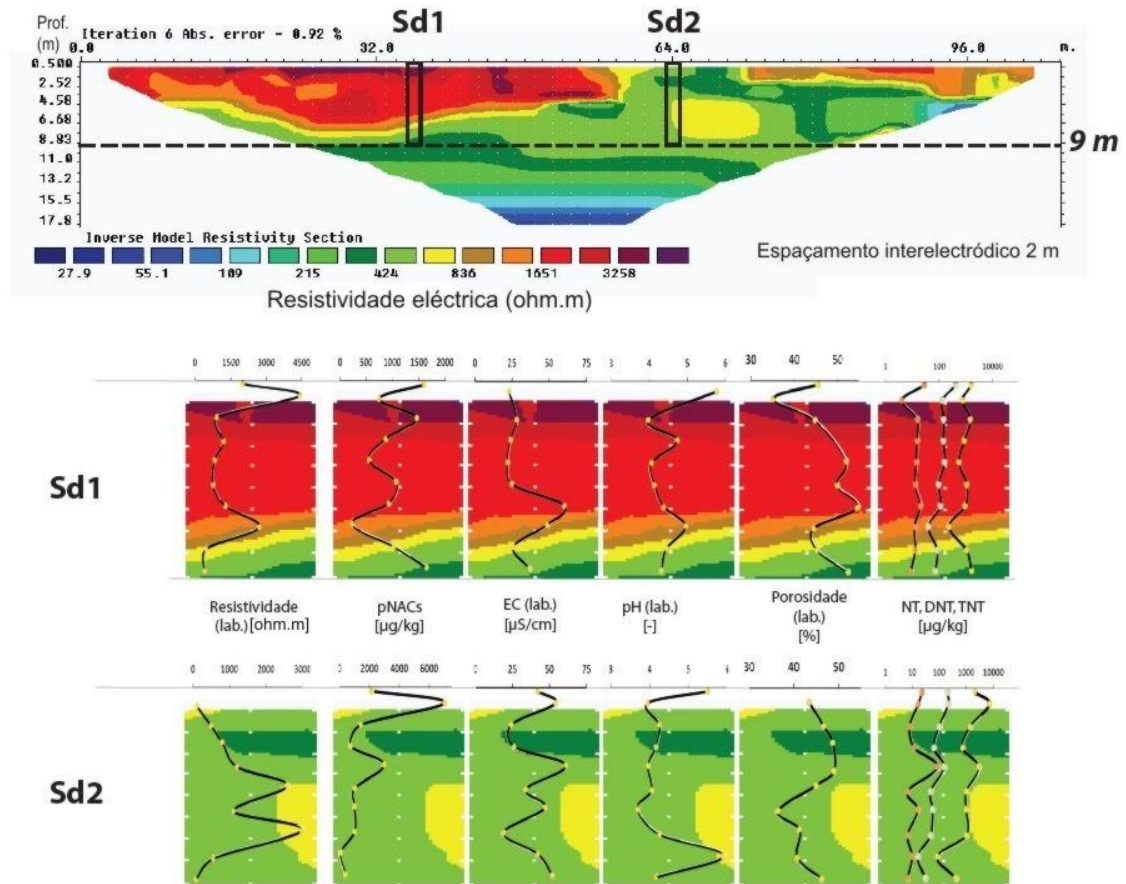


Fig. 4.3 – Variação em profundidade de alguns parâmetros laboratoriais determinados nas sondagens Sd1 e Sd2 e respectiva projecção no perfil geoelectrico dipolo-dipolo que atravessa ambas as sondagens até ao nível freático, nomeadamente resistividade eléctrica (ohm.m), P-NACs ($\mu\text{g}/\text{kg}$), condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), porosidade (%) e NT, DNT e TNT ($\mu\text{g}/\text{kg}$) (cortesia de Amaral, H. e Khalil, M., a partir dos dados de Gonçalves, 2011).

Não é clara uma relação directa entre os perfis obtidos pela aplicação dos diferentes métodos e a contaminação por compostos orgânicos. No caso da Fig. 4.3 verifica-se que os teores mais elevados dos P-NACs (Sd2) correspondem a resistividades intermédias (215 a 836 ohm.m), enquanto que teores de contaminação menores (Sd1) correspondem a altas resistividades. Este tipo de padrão poderá, igualmente, reflectir a distribuição de níveis mais argilosos ou mais arenosos, pelo que importa avaliar quais os padrões de resposta em termos geofísicos noutras situações litológicas e/ou níveis de contaminação conhecidos. Sublinha-se o aparecimento do nível freático aos 9 m de profundidade marcado com resistividades inferiores a 109 ohm.m. Uma vez que a condutividade eléctrica e a resistividade eléctrica foram obtidas em diferentes amostras de laboratórios distintos, o seu grau de humidade não é o mesmo, pelo que não se verifica uma inversão nas variações de ambos os parâmetros.

4.4.1. Caracterização de plumas de contaminação em lixeiras a céu aberto

A deposição de RSU em áreas abertas durante décadas, sem obedecer a qualquer norma ou critério geológico causou em muitos locais, graves danos ambientais, nomeadamente nos solos e nas águas subterrâneas envolventes das zonas de depósito. As lixeiras a céu aberto existentes no país até à década de 1990 terão causado problemas que actualmente, com a sua selagem, se tornam bastante difíceis de avaliar e quantificar. No entanto, a aplicação de métodos geofísicos no auxílio à delimitação de plumas de contaminação em zonas envolventes de lixeiras ao longo do tempo tem revelado resultados francamente positivos na mitigação dos problemas que estas originaram, isoladamente e de forma a servir de complemento a outros dados que eventualmente estejam disponíveis.

Em Portugal Continental são vários os casos descritos na literatura, desde meados da década de 1990, com trabalhos realizados em zonas de características geológicas distintas, que vão desde ambientes cársicos (Cruz et al., 2006; Mota, 2008) a formações cristalinas (Monteiro Santos et al., 2002; Mota, 2008; Figueiras et al., 2009; Sousa et al., 2010) e sedimentares porosas (Senos Matias et al., 2000; Marques et al., 2005; Oliveira, 2009; Hermozilha et al., 2010). Beneficiando da experiência anteriormente adquirida por outros autores, Lopes et al. (2006) sintetizaram uma sequência metodológica para este tipo de estudo, salientando a importância das ferramentas SIG e de geoestatística no processo de análise de dados.

O caso aqui apresentado diz respeito à Lixeira de Maceda, próxima de Ovar, no litoral oeste português (Fig. 4.4), que se encontra descrito em detalhe em Senos Matias et al. (1994).



Fig. 4.4 – (Esquerda) Deposição de RSU na lixeira de Maceda (1991), situação que ocorreu durante cerca de 20 anos. (Direita) Vista aérea do processo de selagem da lixeira (arquivo da Câmara Municipal de Ovar, 1999).

A deposição de RSU e de algumas indústrias da zona durante 20 anos nas areias desta lixeira, localizada num aquífero arenoso Holocénico (Teixeira, 1962) semi-confinado relativamente superficial, motivou em 1991 a investigação da possível contaminação das águas subterrâneas, uma vez que as captações que abastecem a cidade de Ovar se localizam cerca de 4 km quilómetros a sul da lixeira (Senos Matias et al., 1994). Assim, foi efectuado um estudo inicial para diagnóstico do impacto

ambiental da lixeira nas águas subterrâneas. Os resultados obtidos através da aplicação conjunta de métodos de prospecção electromagnética FDEM com o Geonics EM34 e eléctrica utilizando SEVs com o dispositivo Wenner, foram a base para os estudos hidrogeológicos subsequentes que envolveram a perfuração de 11 piezómetros e respectiva análise química da água e delinearam a pluma de contaminação. Os resultados foram interpretados (Senos Matias et al., 1994) e confirmaram da existência de contaminação no aquífero semi-confinado, que poderia trazer consequências mais drásticas caso se mantivessem as condições de deposição de lixos em simultâneo com a extracção contínua da água. Esta constatação fez desencadear, por parte da Câmara Municipal de Ovar, os mecanismos necessários à concretização do processo de selagem e impermeabilização da lixeira, integrados no âmbito do PERSU (1997). Estes foram efectuados através da colocação de uma camada de argila compactada com 60 cm de espessura na zona de uma nova célula entretanto aberta (Fig. 4.4), e de 30 cm na área em que existem já resíduos depositados, colocando-se sobre esta várias camadas de geotêxtil. As infra-estruturas criadas na envolvente da lixeira de Ovar com o trabalho de Senos Matias et al. (1994) permitiram que algum tempo após todo o processo de selagem (Ramalho et al., 1998), se avaliasse de novo o impacto ambiental da lixeira nas águas subterrâneas (Senos Matias et al., 1999).

A Fig. 4.5 mostra a pluma de contaminação de 1991 evidenciada através da utilização de FDEM (EM34), bem como a interpretação zona mais crítica dos perfis de prospecção eléctrica (A-A', B-B' e C-C') realizados na envolvente da mesma.

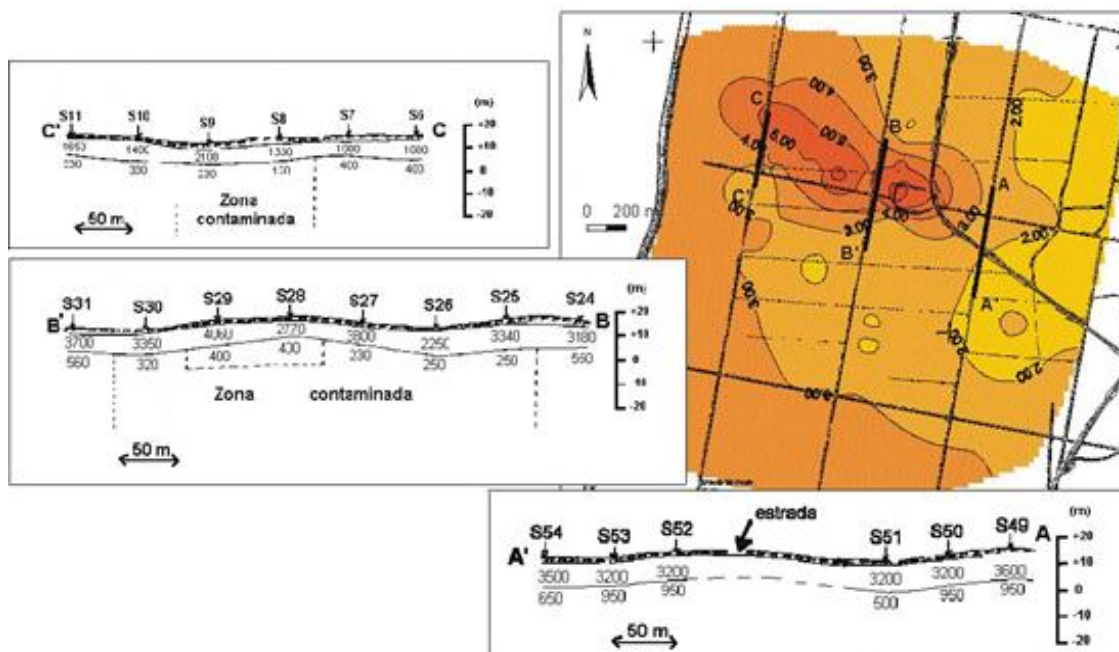


Fig. 4.5 – Pluma de contaminação da Lixeira de Ovar em 1991 com o sentido aproximado E-W, evidenciada pelo aumento de condutividade eléctrica aparente do solo (unidade mS/m) através da utilização de métodos electromagnéticos de prospecção (EM34), com cabo de 20 m e dipolo vertical. Interpretação das zonas mais críticas dos perfis de resistividade eléctrica A-A', B-B' e C-C' (unidade ohm.m) realizados na envolvente da lixeira (Ramalho et al., 1998).

Esta informação serviu de base para a escolha dos locais de implantação de 11 piezómetros, que atingiram profundidades que alcançaram o aquífero semi-confinado e com os quais foi possível traçar a rede de fluxo da zona (Fig. 4.6), com o sentido aproximado E-W.

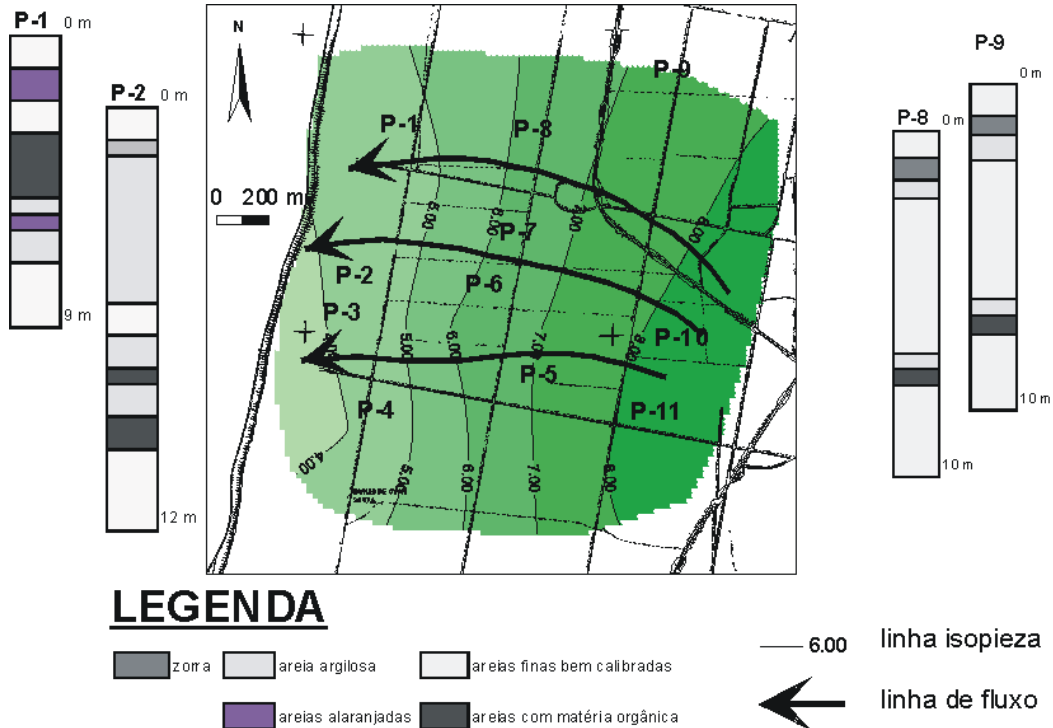


Fig. 4.6 – Rede de fluxo da zona em estudo traçada a partir da carta de isopiezas (m) elaborada com base nos níveis dos 11 piezómetros instalados no âmbito deste trabalho e igualmente localizados na figura, cujos principais logs se encontram representados (Ramalho et al., 1998).

A Fig. 4.7 mostra o diagrama de Schoeller relativo às análises físico-químicas resumidas efectuadas amostras de água recolhidas em 1991 nos 11 piezómetros efectuados.

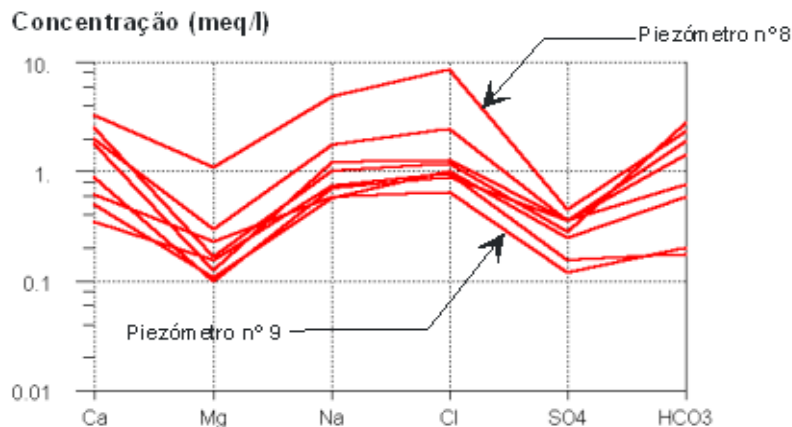


Fig. 4.7 – Diagrama de Schoeller relativo às análises físico-químicas resumidas efectuadas amostras de água realizadas em 1991 dos 11 piezómetros efectuados. Os piezómetros localizados a E da lixeira, justificaram a sua escolha como piezómetros de controlo (Ramalho et al., 1998). Foi no Piezómetro n°8, localizado imediatamente a W da lixeira que se registou a maior contaminação, tanto em 1991 como em 1999.

Para a realização do estudo de actualização do diagnóstico ambiental em 1999, foram utilizados os mesmos meios que no anterior. A comparação entre a informação de Senos Matias et al. (1994) e Senos Matias et al. (1999) indicou o agravamento da contaminação do aquífero semi-confinado. Os mapas de condutividade aparente de 1991 e 1999 na zona imediatamente a W da lixeira (Senos Matias et al., 1999) confirmaram não só ainda a existência de uma pluma de contaminação com características espaciais semelhantes à de 1991, com direcção E-W e sem grande dispersão lateral, como também que estes valores tinham aumentado significativamente, atingindo condutividades aparentes de 10 mS/m em 1999, em zonas onde em 1991 eram de 7 mS/m, a cerca de 15 metros de profundidade (Fig. 4.8). Martinho (2003) concluiu que de 1991 para 1999 a pluma de contaminação teve um deslocamento rotacional de 22° para W, uma média de $2,5^\circ$ por ano. Para W, o deslocamento da pluma em relação a 1991 foi de 200 m, o que mostra que a pluma nessa direcção se propagou a uma média de 25 m por ano, ou seja, 2 m por mês.

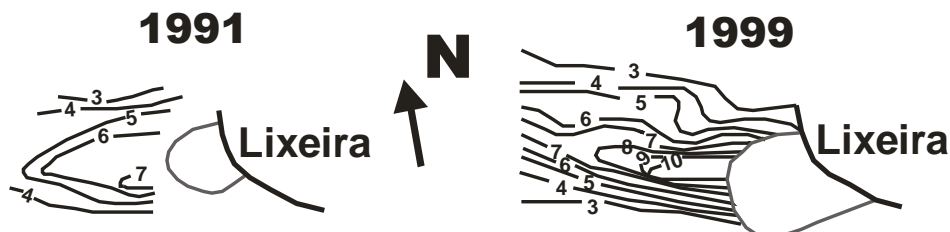


Fig. 4.8 – Comparação dos mapas de condutividade eléctrica aparente de 1991 e 1999 (Senos Matias et al., 1999) à pseudo-profundidade de 15 m. Unidades mS/m.

A Tabela 4.2 mostra a comparação das análises efectuadas à água dos 11 piezómetros em 1991 (Senos Matias et al., 1994) e 1999 (Senos Matias et al., 1999). A análise da água dos piezómetros efectuados no âmbito do trabalho de 1991 mantém em 1999 o Piezómetro nº 8, localizado imediatamente a W da lixeira (Fig. 4.6), como o mais contaminado (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Comparação de alguns parâmetros das análises físico-químicas de 1991 e 1999 da água dos piezómetros localizados na Fig. 4.4 (Senos Matias et al., 1999). A vermelho encontram-se os parâmetros do piezómetro mais contaminado em 1991 e 1999, localizado imediatamente a W da lixeira.

Piezómetro	1991				1999			
	pH	σ ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Alcalinidade (HCO_3^- mg/l)	pH	σ ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Alcalinidade (HCO_3^- mg/l)
P-3	6,7	340	15,8	170,8	5,4	395	17,6	175,1
P-4	6,1	162	15,0	50,0	5,8	266	16,4	34,8
P-5	5,3	135	15,8	22,1	5,4	228	16,6	28,7
P-6	6,0	165	15,3	45,5	6,0	272	16,5	47,6
P-7	6,4	120	15,1	61,0	6,6	160	16,1	61,6
P-8	5,8	1000	17,4	142,7	5,9	773	21,4	154,9
P-9	5,5	95	15,6	10,5	5,4	157	16,6	20,7
P-10	5,4	115	15,0	12,2	5,3	175	16,6	20,1
P-11	5,3	130	15,8	25,6	5,9	199	16,3	34,0

No entanto, embora a contaminação tenha subido em todos os outros piezómetros, este foi o único cujos valores de condutividade eléctrica desceram, passando de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Senos Matias et al., 1994) para 773 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Senos Matias et al., 1999). Martinho (2003) e Martinho e Almeida (2006) usaram também o dispositivo Wenner em medições de resistividade eléctrica e polarização induzida (IP) para a obtenção de uma imagem de carácter mais tridimensional da pluma de contaminação ao longo das zonas críticas dos perfis B-B' e C-C' da Fig. 4.5.

Os resultados obtidos por estes autores confirmam a distribuição de valores de resistividade eléctrica e relacionaram-na ainda com os valores de cargabilidade obtidos por IP, para a melhoria da qualidade da interpretação, pois estes últimos têm como vantagem o facto de conseguirem distinguir formações argilosas de areias contaminadas. Em ambos os casos a resistividade é baixa mas, enquanto as argilas apresentam uma cargabilidade alta, as areias contaminadas revelam baixa cargabilidade. A ocorrência de valores de cargabilidade negativos estará relacionada com efeitos 2D e 3D relacionados com a forma e posição da pluma de contaminação. Os resultados e interpretação de Martinho (2003) encontram-se na Fig. 4.9.

Este estudo temporal, que cobriu quase uma década, mostrou que a recuperação dos ecossistemas em situações críticas com estas características é suficientemente lenta para se justificar a aplicação de estudos 4D em locais sujeitos a este tipo de pressão ambiental. O trabalho efectuado em 1991 permitiu o conhecimento de uma situação de referência inicial e proporcionou a criação dos meios necessários a futuras actualizações de monitorizações ambientais da área, rápidas e pouco onerosas, utilizando os piezómetros construídos logo de início e os métodos convencionais de prospecção geofísica.

O investimento inicial efectuado pela Câmara Municipal de Ovar num estudo de diagnóstico ambiental desta natureza, não só despoletou a consciência para uma resolução rápida do problema da lixeira, como também permitiu a criação de infra-estruturas de monitorização ao longo do tempo, o que já teve lugar numa primeira fase em 1999 com resultados desanimadores, embora não preocupantes, devido muito em parte, ao enquadramento geológico e geomorfológicos favoráveis. Mais de uma década volvida desde a última monitorização da lixeira em 1999, seria de todo o interesse uma nova avaliação da recuperação do ecossistema neste local. Este trabalho salientou ainda a importância da realização de estudos de base (geofísica, hidrogeologia e hidroquímica) como metodologia mais adequada para servir de base à definição do projecto de selagem.

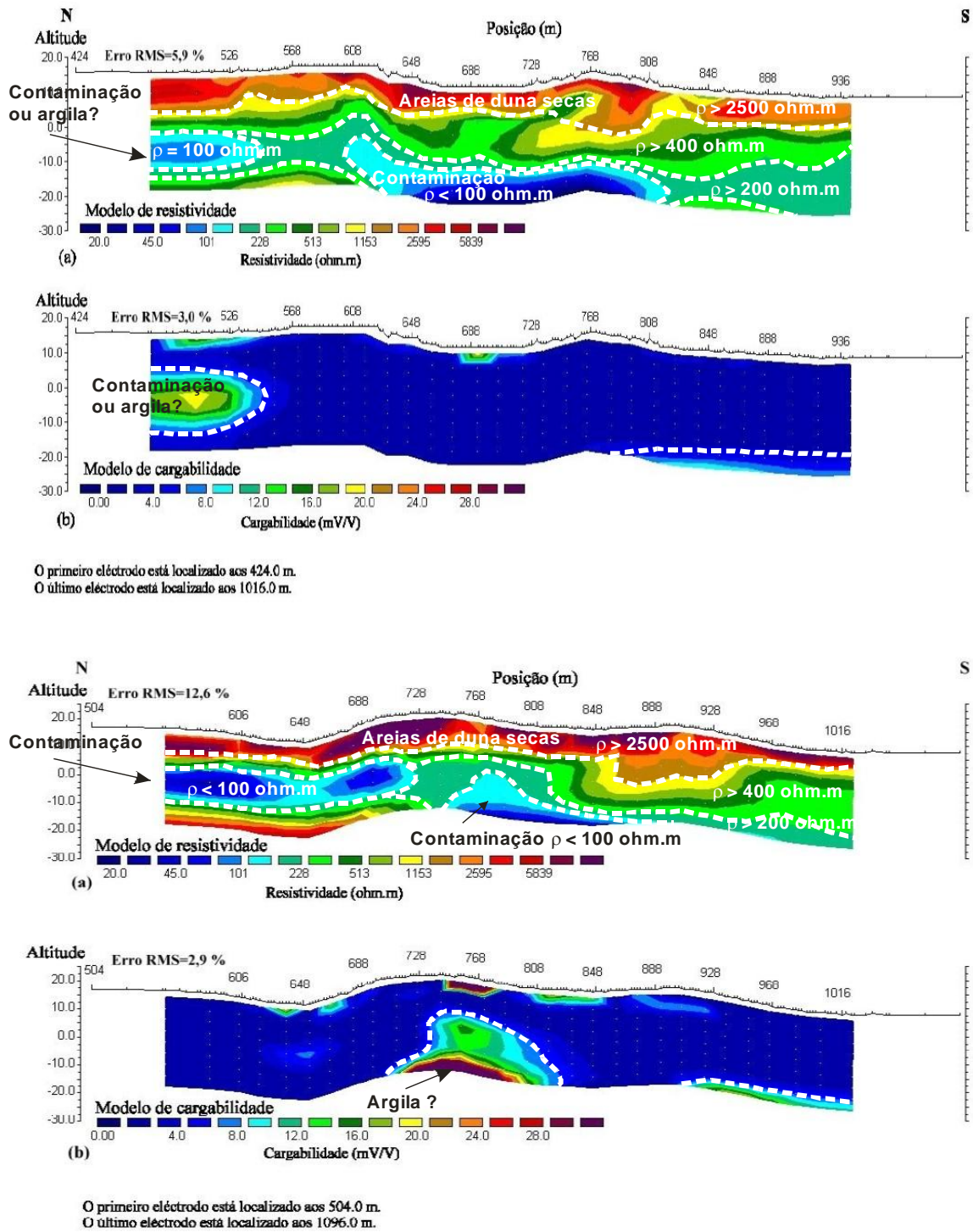


Fig. 4.9 – (Em cima) Pseudo-seções de resistividade (a) e de cargabilidade (b) do perfil 1 de Ovar obtidas a partir da inversão 2-D dos dados das sondagens eléctricas de resistividade e IP (Martinho, 2003), correspondendo ao perfil C-C' da Fig. 4.5. (Em baixo) Pseudo-seções de resistividade (a) e de cargabilidade (b) do perfil 2 de Ovar obtidas a partir da inversão 2-D dos dados das sondagens eléctricas de resistividade e IP (Martinho, 2003), correspondendo ao perfil B-B' da Fig. 4.5.

4.4.2. Caracterização de lixiviados em lixeiras seladas

A ausência dos estudos geológicos e hidrogeológicos de diagnóstico referidos anteriormente poderá causar graves problemas no processo de substituição das antigas lixeiras a céu aberto por lixeiras seladas no âmbito do PERSU (1997). Apesar de tudo, este processo foi na maior parte das vezes efectuado sem o recurso a estudos geológicos e geofísicos de detalhe baseados em critérios fundamentados que sustentassem tanto a adequabilidade da sua localização, como a solução geotécnica adoptada. Por vezes, as lixeiras a céu aberto causaram impactos ambientais menores, uma vez que ocasionalmente as condições geológicas os locais implantação causavam impactos pequenos e de fácil resolução. Mas, noutros casos, as lixeiras cresceram em locais de tal forma inadequados que os problemas ambientais subsequentes à sua selagem *in loco* se revelaram um verdadeiro pesadelo de solução urgente para as empresas encarregues dos processos de selagem e monitorização.

É o caso da Lixeira de Gaeiras, próxima de Óbidos, implantada na Fm de Alcobaça composta por argilas, arenitos, margas e calcários (Zbyszewski e Moitinho de Almeida, 1960) numa linha de água tributária em direcção ao Rio Arnóia, com declive de cerca de 9%. Esta lixeira foi utilizada como depósito de RSU e industriais durante 17 anos e o seu processo de selagem foi realizado no âmbito do PERSU (1997). No entanto, e porque não foi efectuada uma avaliação inicial rigorosa da situação recorrendo a estudos geológicos e hidrogeológicos, a selagem veio a revelar-se um problema inesperado de difícil resolução técnica, com mais de 10 m³/dia de lixiviados com origem em fissuras no geotêxtil da lixeira, a terem que ser recolhidos a cada dois dias através de auto-tanques. Foi assim necessário identificar a origem desta quantidade anormal de lixiviados para elaborar uma solução técnica que permitisse mitigar os impactos negativos desta situação. Assim, a par de um estudo hidrogeológico da zona (Costa et al., 2002), devido à complexidade do problema, utilizaram-se vários métodos geofísicos clássicos sobre a lixeira e em seu redor para identificar as falhas que produziam os fluidos, o modo como estes se distribuíam no interior do aterro e as suas características (Ramalho et al., 2012a).

Assim, sobre o aterro foram aplicados métodos magnéticos (para localização de eventuais zonas da lixeira de depósito de objectos metálicos) e métodos eléctricos (SEVs utilizando o dispositivo Schlumberger com AB máximo de 240 m), potencial espontâneo (SP) e electromagnéticos (*radio frequency electromagnetics* RF-EM e EM34) para a caracterização, distribuição e identificação de zonas preferenciais de escoamento de lixiviados (Fig. 4.10) (Ramalho et al., 2012a). As medidas de EM34, SP e magnéticas consistiram numa rede de 81 pontos localizados numa malha mais ou menos regular sobre o aterro (Fig. 4.10). Na zona do *bedrock* em redor do aterro foi utilizado RF-EM para identificar barreiras impermeáveis que pudessem estar relacionadas com a anormal quantidade lixiviados provenientes da lixeira. A sua caracterização foi efectuada recorrendo aos tubos de biogás que fazem parte do aterro (Fig. 4.10), que neste caso funcionaram como sondagens mecânicas e forneceram informação relevante para a avaliação do problema na sua globalidade. O RF-EM foi efectuado com antena auto-portada ligada a um GPS a adquirir dados a cada 2 segundos (Müller e Carvalho Dill, 1996; Carvalho Dill et al., 1998).

Verificou-se que os resultados obtidos através dos vários métodos geofísicos se revelaram consistentes e com explicação compatível. Assim, com a utilização RF-EM, identificaram-se algumas estruturas geológicas em redor do aterro, materializadas num conjunto de falhas de direcção E-W e N-S responsáveis pelas emergências de água a montante do mesmo (Fig. 4.10) e que poderão ter uma relação directa com as zonas de acumulação de água contaminada. Com os restantes métodos, definiram-se a profundidade do *bedrock*, a espessura das camadas geoelectricas sob o aterro e ainda as características dos lixiviados, nomeadamente químicas e a sua distribuição espacial. Embora as características hidráulicas dos resíduos sejam impossíveis de avaliar, devido à sua distribuição fortemente heterogénea no interior do aterro, admitiu-se, no entanto, que a permeabilidade fosse superior à do ambiente geológico envolvente. A aplicação da Lei de Archie (Archie, 1942) permitiu estimar a porosidade nas várias zonas do aterro a variar entre 12% e 44%.



Fig. 4.10 – Levantamentos geofísicos realizados em redor e sobre o aterro da lixeira selada das Gaeiras e levantamento hidrogeológico da área (Costa et al., 2002). Perfis electromagnéticos de RF-EM localizados em redor e sobre o aterro e localização dos 81 pontos de EM34, SP e de prospecção magnética efectuados sobre o aterro. A localização das SEVs 1, 2 e 3 está indicada, bem como a sua direcção. Inventário hidrogeológico (SL1, SL2, SL3 e P1 são os piezómetros de monitorização perfurados após a selagem da lixeira; o TRP2 é um furo de monitorização que não foi amostrado). A cota da boca dos piezómetros encontra-se representada (m). É referenciada a localização dos perfis Pf1, Pf2, Pf3 e Pf4 (adaptado de Ramalho et al., 2012). BW# corresponde à localização dos tubos de biogás utilizados neste trabalho referidos na Tabela 4.3.

Com os resultados obtidos com a modelação 1D das SEVs elaborou-se um modelo esquemático conceptual para o perfil lateral N-S da lixeira selada, corroborado pelos dados aparentes da prospecção FDEM com o Geonics EM34, para as diferentes

profundidades teóricas atingidas (Fig. 4.11) e por informações de populares relativamente à topografia original. Neste modelo, de 3 camadas, admite-se a existência de uma camada superficial, mais ou menos seca, constituída pelos materiais da selagem e detritos da lixeira secos, com resistividades médias da ordem dos 150 ohm.m, representada no modelo pela camada ρ_1 . A zona constituída pelos materiais da lixeira propriamente dita e lixiviados encontra-se imediatamente abaixo e, na zona sul do aterro, chega a atingir profundidades de 40 m (camada ρ_2 , com resistividades da ordem dos 10-20 ohm.m), o que significa que terão havido escavações na topografia original, eventualmente das aluviões da linha de água aquando do início da utilização do local como lixeira. Finalmente atinge-se o *bedrock*, correspondendo à camada ρ_3 , com resistividades da ordem dos 180 ohm.m. Este encontra-se a profundidades variáveis, sendo estas inferiores na zona SE do aterro. O valor médio de resistividade atribuído à camada ρ_3 é compatível com os valores para os siltes arenosos (Reynolds, 1997) que afloram no local, constituindo o *bedrock*. Salienta-se que no presente modelo, a fina camada de terra seca superficial, na ordem dos 0,5 m de espessura foi desprezada.

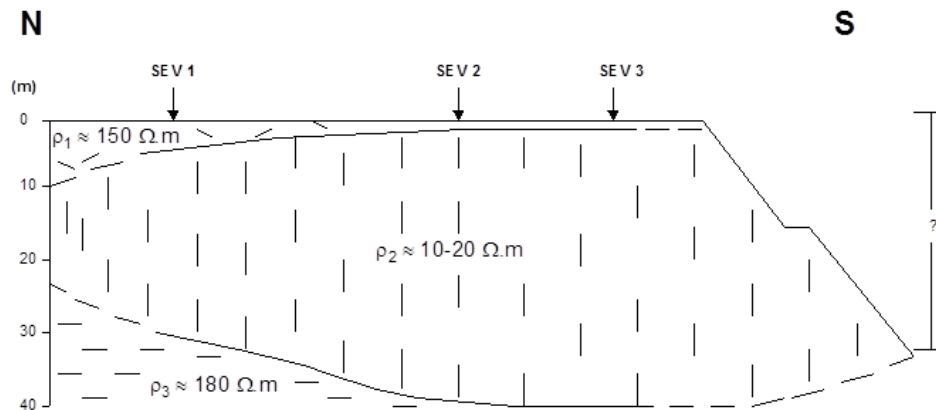


Fig. 4.11 – Corte N-S esquemático da lixeira sem escala horizontal, evidenciando a profundidade do soco argiloso a partir dos resultados da inversão das sondagens eléctricas verticais SEV 1, SEV 2 e SEV 3.

A distribuição das condutividades aparentes às pseudo-profundidades de 7,5, 15 e 30 m (Ramalho et al, 2012a), evidenciou as zonas de acumulação de lixiviados com condutividade eléctrica muito elevada e reflectiu-se nos perfis 2D de condutividade eléctrica obtidos por modelação inversa dos dados de FDEM do Geonics EM34, utilizando o *software* EM34-2D desenvolvido por Monteiro Santos (2004) (Fig. 4.12).

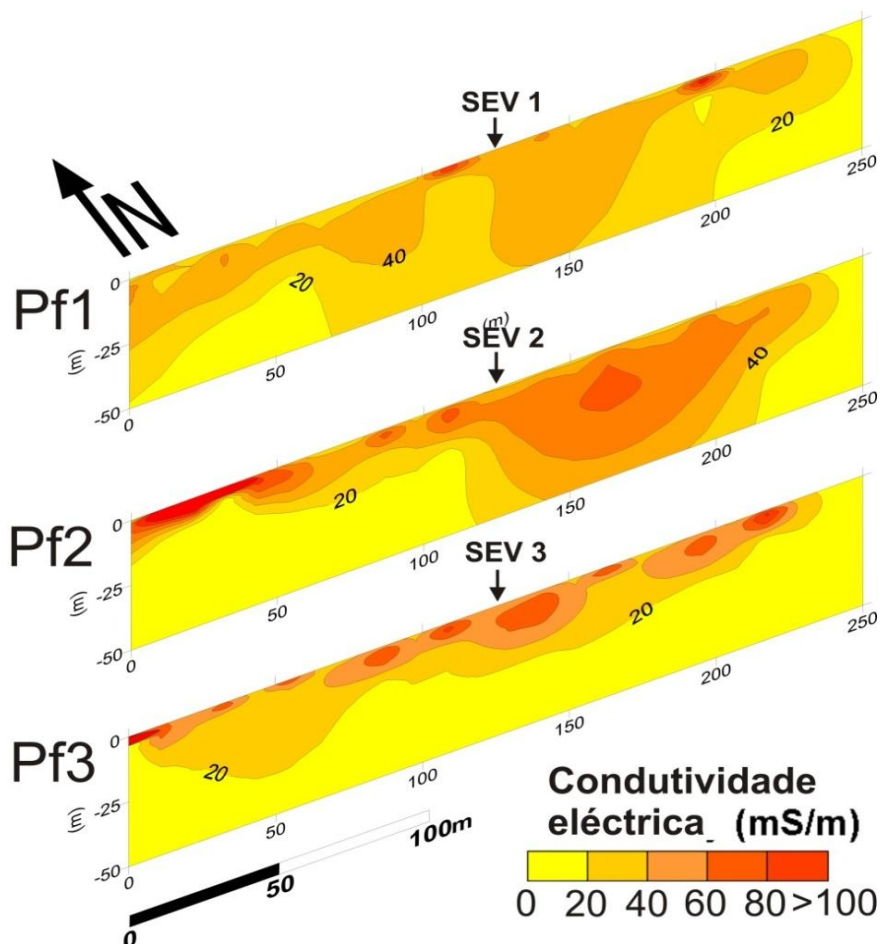


Fig. 4.12 – Modelação inversa 2D da condutividade eléctrica (mS/m) obtida por FDEM através do Geonics EM34 utilizando o software EM34-2D desenvolvido por Monteiro Santos (2004).

A determinação dos parâmetros físico-químicos *in-situ* efectuada aos lixiviados através dos tubos de biogás e sondagens mecânicas do inventário hidrogeológico (Costa et al., 2002) (Tabela 4.3) é consistente com a distribuição dos valores de SP (Fig. 4.13) no interior do aterro, indicadora da existência de zonas de circulação preferencial de fluidos no seu interior e com origem a montante deste.

Tabela 4.3 – Parâmetros físico-químicos *in-situ* dos lixiviados determinados através dos tubos de biogás e sondagens mecânicas do inventário hidrogeológico (Costa et al., 2002).

Ponto	Profundidade (m)	Profundidade do NHE (m)	Temperatura (°C)	pH	Condutividade eléctrica (mS/cm)	TSD (g/L)
SL1	20	3,20	18,6	7,12	4,050	3,430
SL3	17	3,16	18,6	7,38	0,832	0,599
P1	desconhecida	0,97	23,3	7,46	0,995	0,599
BW1	15,10	7,00	28,3	7,08	>20	>10
BW4	14,60	6,40	32,2	7,66	>20	>10
BW10	11,90	6,80	26,8	7,28	>20	>10
BW11	9,0	3,80	35,7	7,70	>20	>10
BW12	12,90	4,90	23,5	7,43	>20	>10
BW17	11,40	4,90	19,7	6,36	1,37	0,68
BW18	10,70	5,50	37,2	7,62	>20	>10
BW19	11,21	3,31	22,9	7,22	16,87	8,41

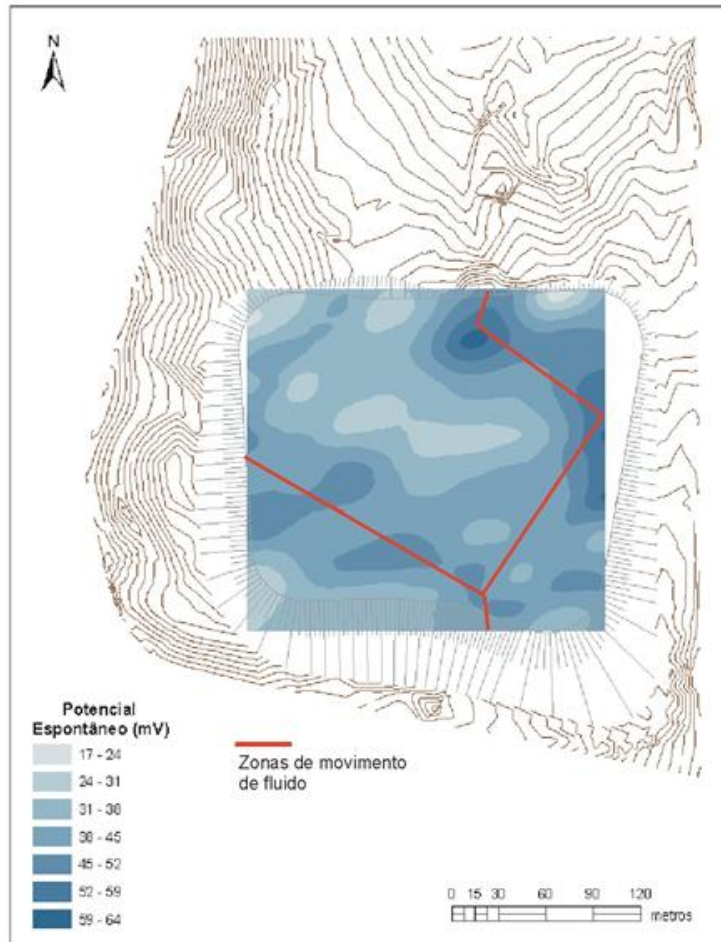


Fig. 4.13 – Mapa de SP (mV) realizado na zona da lixeira com a configuração *dipolo*. Os resultados obtidos no mapa de SP mostram que os valores mais elevados de SP – anomalias positivas – serão devidos a zonas de escoamento preferencial de lixiviados com condutividade muito elevadas. Estas zonas de escoamento preferencial estão materializadas na linha vermelha.

Como seria de esperar com a interpretação da restante informação, tanto a condutividade eléctrica como os TSD do piezómetro SL1, localizado próximo do limite S do aterro, são os mais elevados.

Estes resultados de SP indicaram uma circulação preferencial dos fluidos com origem a montante da lixeira. Como caracterização da distribuição dos RSU no seu interior, destaca-se a existência de acumulações de materiais metálicos (eventualmente os geralmente designados “monstros”), causadores das anomalias magnéticas nas zonas SW e SE do aterro (Ramalho et al., 2012a).

Na Fig. 4.14 encontra-se representado o modelo esquemático conceptual de uma secção N-S do aterro mostrando as características hidráulicas principais e a forma aproximada da pluma de contaminação da área da Lixeira das Gaeiras, considerando toda a informação recolhida, composição e profundidade relativa do *bedrock* e características dos resíduos e dos lixiviados.

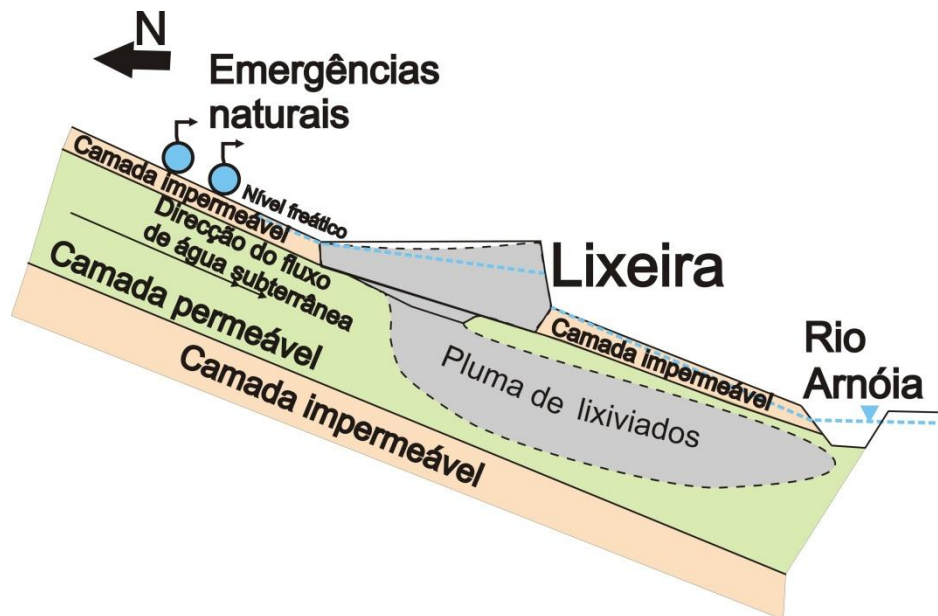


Fig. 4.14 – Modelo esquemático conceptual de uma secção N-S mostrando as características principais e a pluma de contaminação da área da Lixeira das Gaeiras (adaptado de Ramalho et al., 2012a).

Este caso é bem demonstrativo que a ausência de estudos multidisciplinares no estudo dos locais de implantação de aterros, em especial com características geologicamente sensíveis, poderá redundar em problemas ambientalmente graves que tenham sido sub-avaliados aquando da execução do projecto de recuperação. Os estudos envolvendo a utilização de métodos geofísicos convencionais poderão dar uma resposta satisfatória neste tipo de diagnósticos e avaliação ambientais com vista à execução de um projecto tecnicamente sustentado e bem dimensionado. A sua realização, nomeadamente de trabalhos de prospecção geofísica, poderia ter evitado os problemas técnicos e financeiros que decorreram da solução técnica implementada, uma vez que as consequências a médio prazo poderiam ter sido previstas, e como tal, evitadas, através, por exemplo, da drenagem de águas a montante do aterro.

4.4.3. Dispersão de contaminantes em antigas áreas mineiras

Na real possibilidade da existência de uma fonte poluente da água subterrânea de um aquífero livre que possa constituir um perigo para a saúde pública, é importante uma correcta avaliação do modo como os contaminantes percolam no meio. No caso de estarem elementos radioactivos envolvidos, como é o caso do urânio, existe uma susceptibilidade natural por parte das populações, o que leva à necessidade de avaliar as consequências ambientais da sua exploração nos solos e na água. No caso do depósito de urânio de Nisa, onde foi realizado um desmonte experimental na década de 1960 que posteriormente foi deixado ao abandono (Fig. 4.15), efectuou-se um estudo que se destinou a avaliar o modo como o urânio se dispersa na bacia hidrográfica onde este se localiza (Ramalho et al., 2012b) e que tem a sua descarga na albufeira do Monte Branco (Fig. 4.15).



Fig. 4.15 – (Esquerda) Desmonte experimental do depósito de urânio de Maria Dias, em Nisa. (Direita) Descarga da linha de água na albufeira do Monte Branco.

Este estudo de detalhe, realizado no âmbito de um projecto financiado pela EDM abrangendo uma região que se estendeu a todo o depósito uranífero de Nisa (Batista et al., 2009), foi no entanto, pelas suas características específicas e importância local, circunscrito à bacia hidrográfica onde se localiza o desmonte experimental de Maria Dias, a poucos quilómetros a W de Nisa (Fig. 4.16).

Este depósito de urânio localizado no limite N do batólito granítico de Nisa-Castelo de Vide (Fig. 4.16) foi estudado durante a década de 1960 (Ribeiro et al., 1965; Gonçalves, 1966). Constitui uma estreita faixa orientada E-W, com cerca de 5 km de comprimento e não excedendo 1 km de largura, onde o urânio aparece como mineralização supergénica composta por fosforilanita, autunite, possível saleíte e torbernite (Ribeiro et al., 1965). As duas principais unidades hidrogeológicas da área são os granitos e os xistos, estando estes últimos muito alterados à superfície. É esta alteração, materializada numa camada superficial, que lhe confere características similares às de aquífero livre com circulação de água através das zonas porosas, alcançando profundidades consideráveis através de uma rede de fracturação, mais ou menos aberta, interligada e profunda (aquíferos fissurados). O comportamento hidráulico deste sistema composto pela camada alterada e a rede fissurada mais profunda pode, por isso, ser considerado semelhante a um ambiente poroso, com transmissividade muito baixa. A recarga é feita através de infiltração da precipitação directa e através das linhas de água.

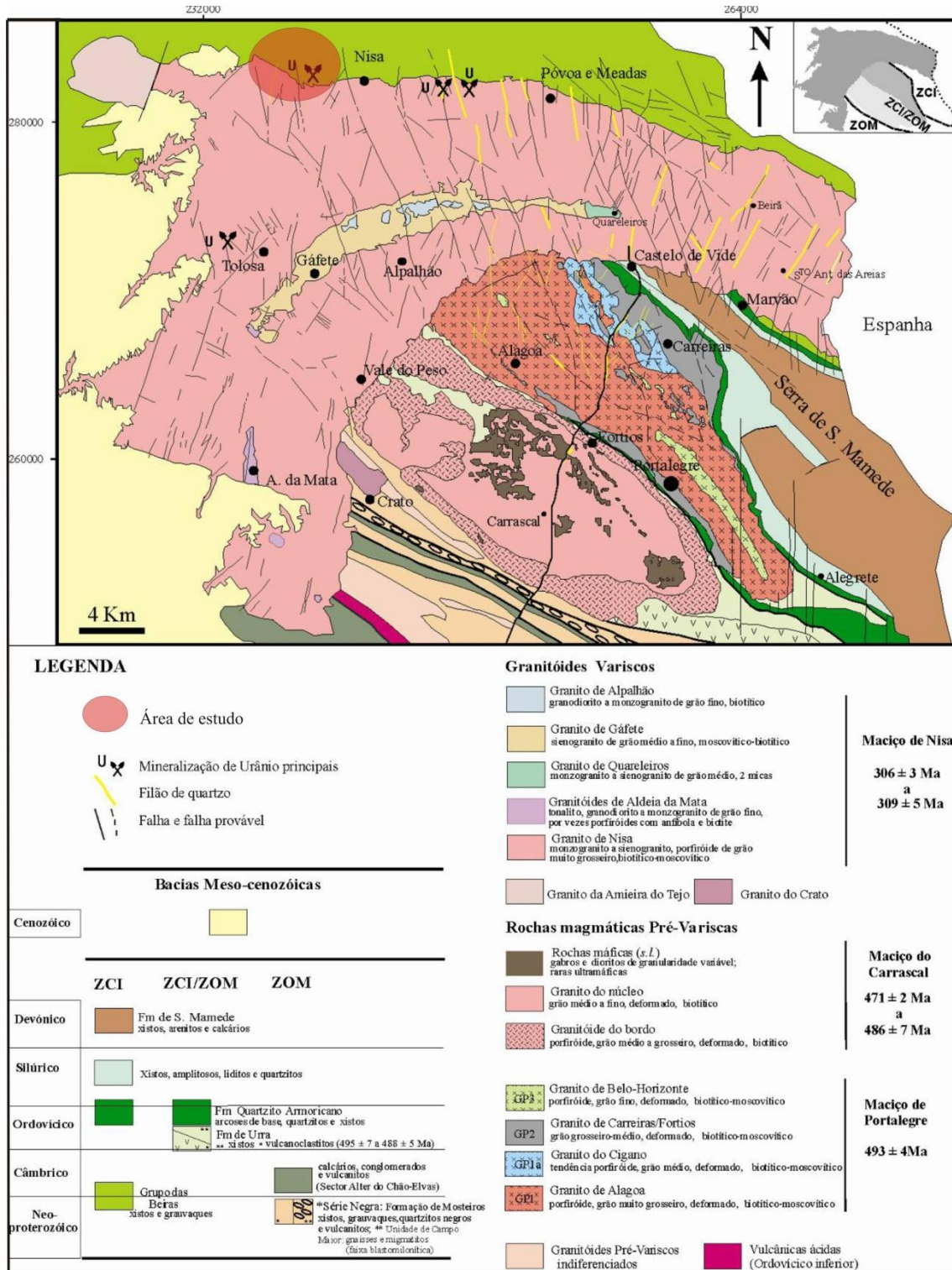


Fig. 4.16 – Mapa geológico dos maciços graníticos do NE do Alentejo (Solá, 2007) com localização da área de estudo.

Para a quantificação da radioactividade dos solos, foi efectuada espectrometria de radiação gama com um espectrómetro de 256 canais, para medidas das contagens totais e das concentrações em U, Th e K nos mesmos pontos do levantamento de FDEM (Fig. 4.17) que foi igualmente realizado.

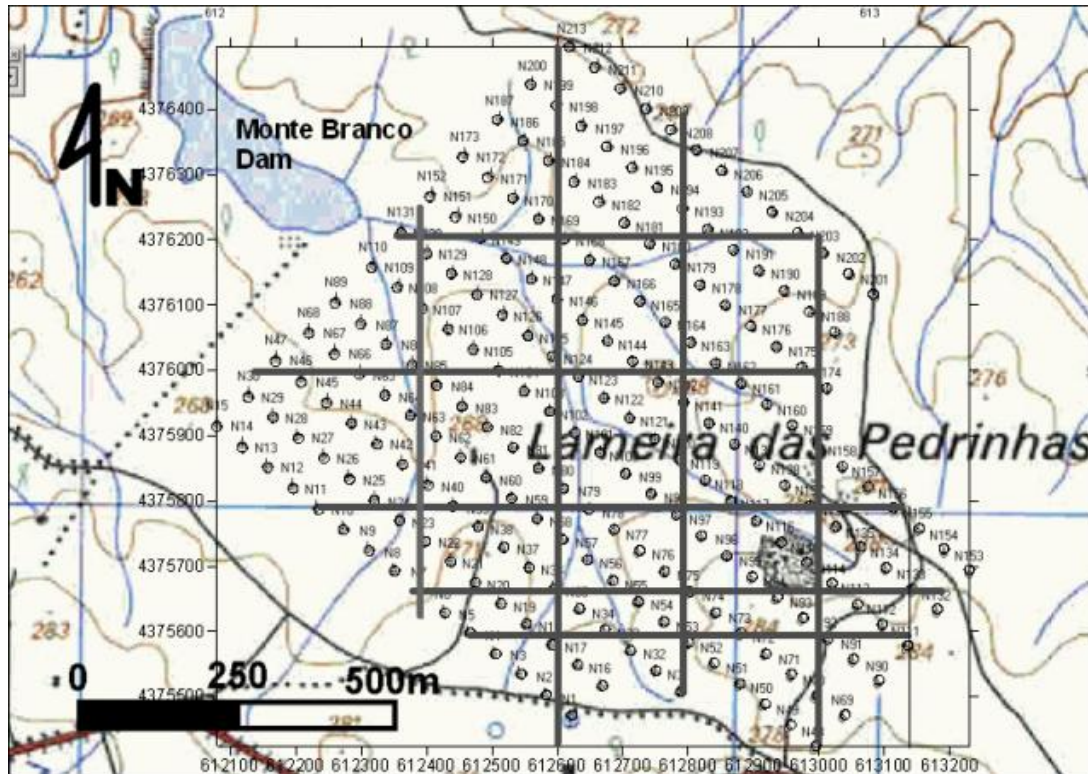


Fig. 4.17 – Bacia hidrográfica do desmonte experimental do depósito de urânio de Maria Dias. Localização dos pontos de medida dos levantamentos de espectrometria de radiação gama e de FDEM. As linhas cinzentas correspondem à localização das fatias verticais obtidas por modelação 3D (Ramalho et al., 2012b).

As concentrações de urânio em valores superiores a 200 ppm no terreno revelaram-se circunscritas à envolvente da zona do desmonte experimental, onde atingiram quase 500 ppm (Fig. 4.18). A Taxa de Exposição Natural (TEN) também só atingiu valores críticos nos mesmos locais. Na restante área da bacia hidrográfica, estes valores são cerca de 10 vezes inferiores. A caracterização física do aquífero superficial foi feita recorrendo à execução de um levantamento de FDEM e respectiva correlação com a informação hidrogeológica proveniente das sondagens mecânicas localizadas no interior da bacia. A inversão 3D destes dados com o *software* EM34-3D (Monteiro Santos, 2006) permitiu a visualização das variações da resistividade eléctrica ao longo da maior parte da área da bacia, tanto nas fatias horizontais às profundidades de 8, 15, 25, 35, 45 e 60 m (Fig. 4.18), como nas fatias verticais nas direcções W-E (Fig. 4.19) e N-S (Ramalho et al., 2012b) e correlacioná-las com a espessura das zonas não saturada, saturada e das várias camadas de alteração (Tabela 4.4) definidas nas sondagens mecânicas estudadas pelo Departamento de Geociências (1991).

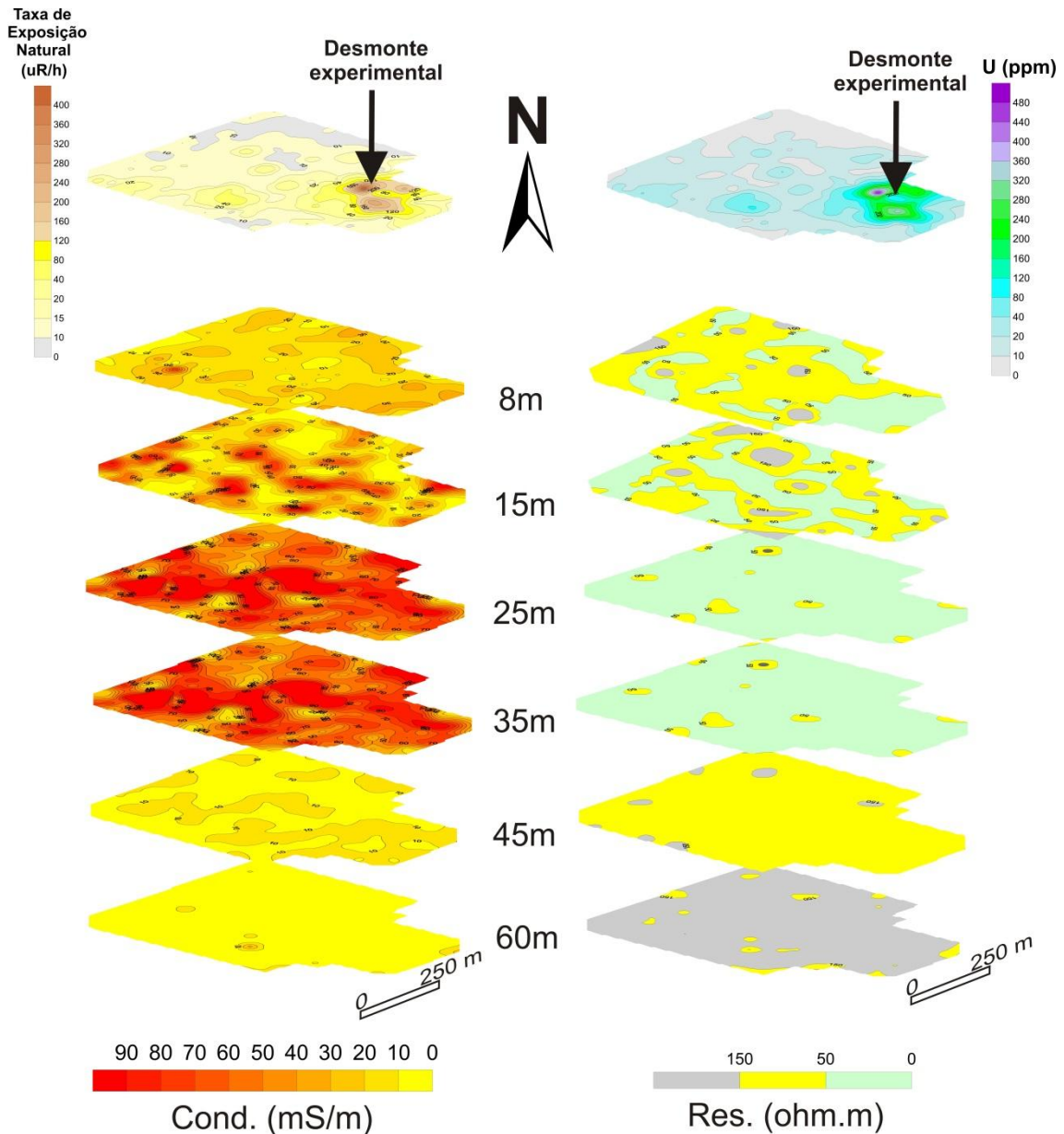


Fig. 4.18 – Projecção das camadas nas 6 fatias horizontais em diferentes profundidades e geograficamente orientadas dos modelos 3D de condutividade (esquerda) e resistividade eléctrica (direita) sob o mapa de Taxa de Exposição Natural (TEN) ($\mu\text{R/h}$) (esquerda) e da concentração em U (ppm) (direita) na zona do desmorte experimental de Nisa (adaptado de Ramalho et al., 2012b).

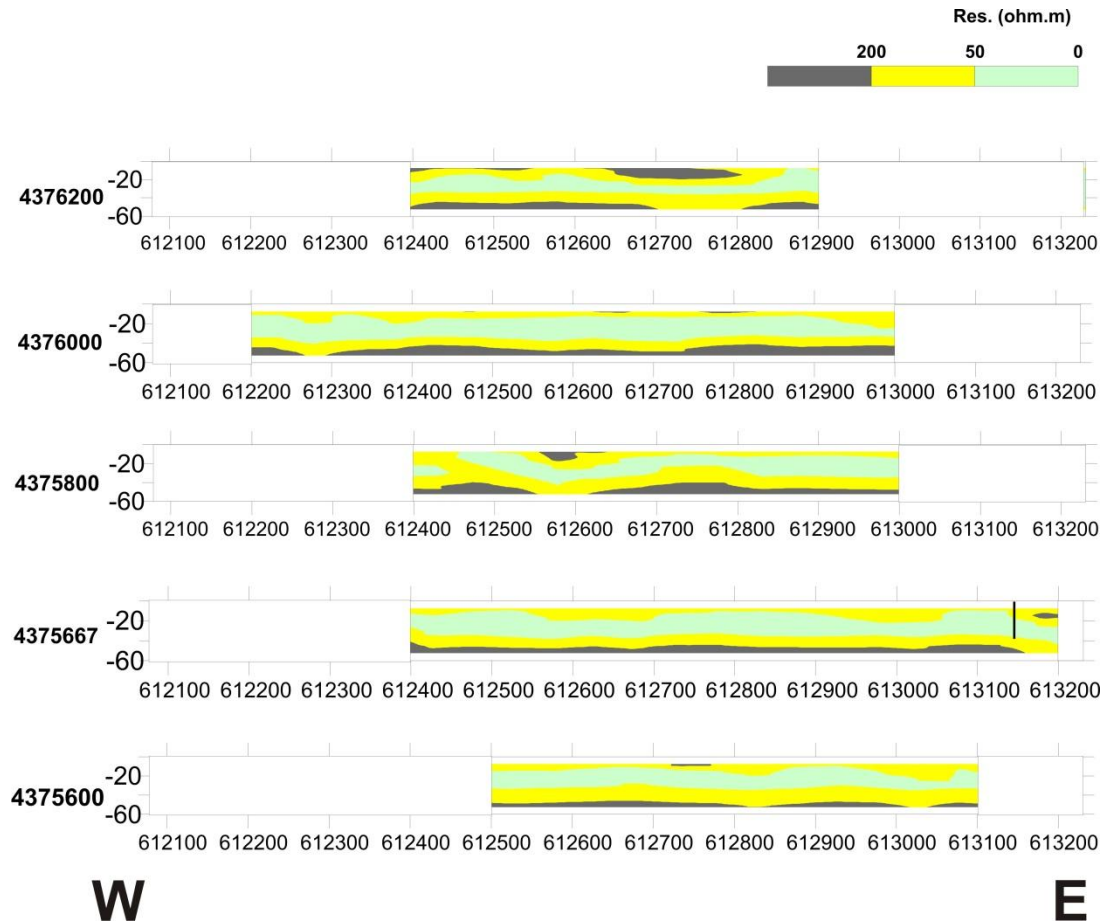


Fig. 4.19 – Resultados da modelação 3D de resistividade eléctrica (ohm.m), baseados na interpretação dos dados provenientes dos furos estudados pelo Departamento de Geociências (1991). (Esquerda) Fatias verticais na direcção W-E (Ramalho et al., 2012b).

Tabela 4.4 – Limites e cores das camadas de resistividade eléctrica correspondendo às zonas principais com propriedades geoelectricas bem definidas (adaptado de Ramalho et al., 2012b).

Cor	Características	Resistividade eléctrica (ohm.m)
Verde	Zona saturada alterada	< 50
Amarelo	Zona saturada alterada Zona saturada fracturada	50 – 150
Cinzento	Zona fracamente fracturada Zona alterada não saturada	> 150

A visualização de uma zona de condutividade eléctrica muito elevada que se prolonga em profundidade parece estar relacionada com a linha de água que provém do desmonte experimental em direcção à albufeira do Monte Branco (Figs. 4.17 e 4.18). O desenvolvimento de um modelo 3D de condutividade ou resistividade eléctrica baseado na FDEM permitiu a individualização de três unidades geoelectricas na camada principal superficial da área do depósito de urânio definida por Gonçalves (1966). Estas unidades geoelectricas interpretadas em conjunto com a informação proveniente das sondagens mecânicas, identificaram a profundidade do nível piezométrico e a variação da espessura das camadas de alteração e fracturadas, que são parâmetros importantes para introduzir no modelo hidrogeológico.

A parametrização física do modelo hidrogeológico em regime estacionário do aquífero não confinado teve como base as informações obtidas a partir da modelação 3D dos dados de FDEM e outros dados de campo, como informação das captações, ensaios de caudal (Departamento de Geociências, 1991) e a taxa de recarga estimada com base em 10% de infiltração (Almeida et al., 2000).

A conceptualização da geometria do aquífero, com base nos dados de FDEM, foi assumida tendo em conta que a sua base é praticamente horizontal (Figs. 4.18 e 4.19) e se encontra à cota de +245 m. O aquífero tem duas zonas principais: uma zona superior relacionada com a ocorrência de camadas alteradas e muito fracturadas (resistividade eléctrica abaixo dos 50 ohm.m) e uma zona mais profunda, dominada por fracturas que se tornam mais fechadas em profundidade, e que, como tal, fazem subir a resistividade eléctrica para valores superiores a 150 ohm.m.

A conclusão mais relevante acerca da condutividade hidráulica deste aquífero é que parece haver uma zona da bacia hidrográfica alongada segundo a direcção E-W onde esta é mais elevada na parte N (Fig. 4.20), o que poderá estar relacionado com falhas e contactos geológicos. O seu aumento de S para N parece ser suportado em factores geológicos, mas na zona N não há dados provenientes de sondagens mecânicas que suportem esta hipótese.

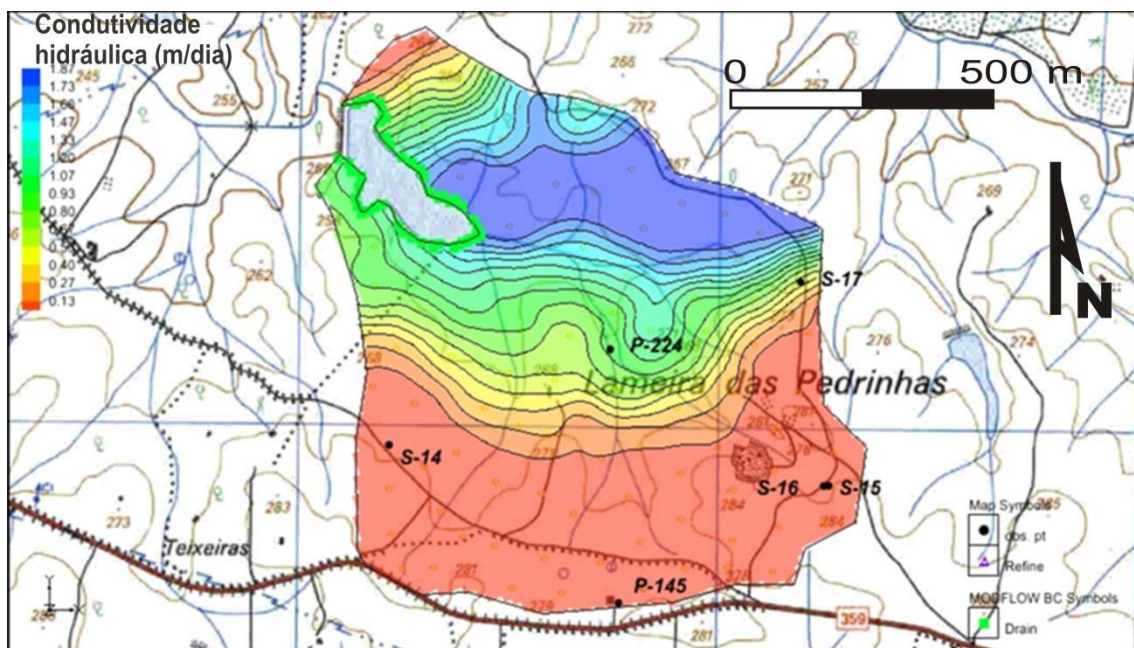


Fig. 4.20 – Mapa de condutividade hidráulica (m/dia) (Ramalho et al., 2012b).

Considerando a área como um ambiente equivalente a poroso, simulou-se o percurso de um contaminante com origem no desmonte experimental com o *software* Modpath. As partículas contaminantes atingiriam a albufeira do Monte Branco de acordo com as linhas de fluxo vermelhas da Fig. 4.21.

A modelação hidrogeológica permitiu concluir que, se bem que a concentração em urânio atinja valores muito elevados na vizinhança do desmonte experimental e

respectivas escombrelas, como é visível no mapa da distribuição da concentração em urânio da Fig. 4.18, estes valores não têm uma expressão geográfica muito ampla, estando confinados a uma área restrita. O mesmo acontece com a concentração em urânio na água das captações localizadas na bacia hidrográfica e da barragem, que é muito baixa.

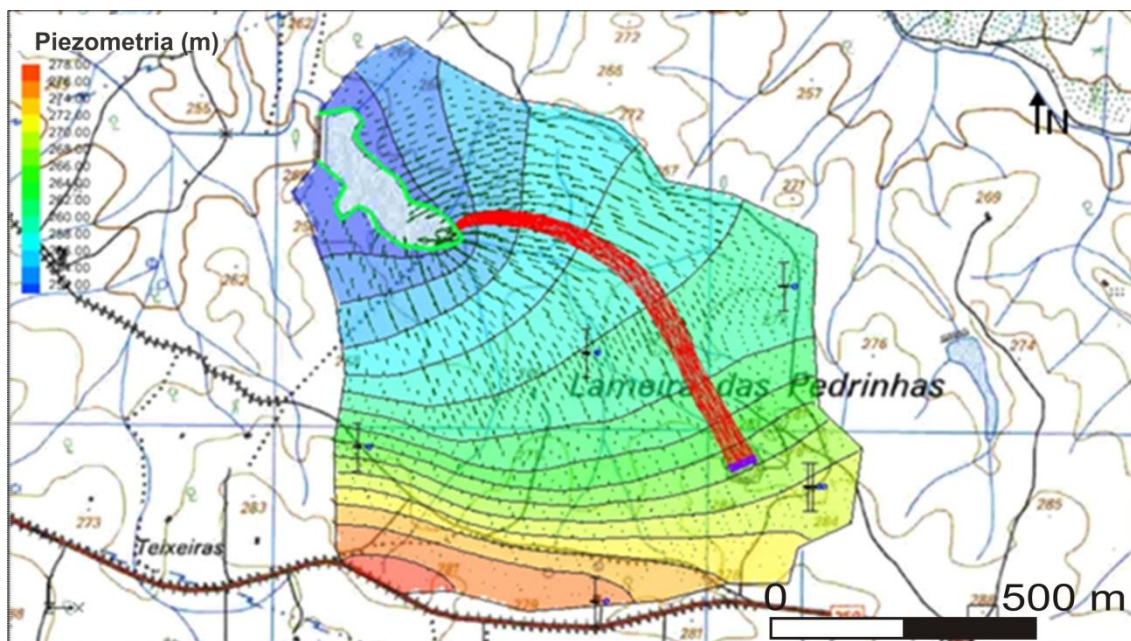


Fig. 4.21 – Piezometria (m), vectores de fluxo do aquífero livre simulado com o *Modflow* (a preto) e linhas de fluxo das partículas com origem no desmorte experimental de Nisa em direcção à barragem de Monte Branco (a vermelho) (Ramalho et al., 2012b).

Se bem que estas pequenas áreas tenham valores radioactivos elevados devido às características das formações geológicas e do material das escombrelas, os resultados do diagnóstico ambiental utilizando métodos hidrogeológicos e geofísicos apontam para uma situação ambientalmente crítica apenas confinada à área do desmorte experimental do depósito radioactivo de Nisa.

Este trabalho mostra a importância da utilização conjunta da inversão de dados geofísicos para posterior incorporação em modelos hidrogeológicos. Desta forma, podem visualizar-se as variações laterais das várias camadas, bem como da concentração e trajecto dos contaminantes.

4.4.4. Identificação de fracturas eventualmente produtivas em rochas cristalinas para caracterização da envolvente de antigas minas de urânio

A tradição mineira em Portugal durante o século XX no que diz respeito à exploração de minerais de urânio deixou 61 minas abandonadas. Mais recentemente, com a assinatura em 2001 do acordo da “Concessão para a Recuperação de Áreas Mineiras Abandonadas”, a EDM pôs em marcha um plano de recuperação que passa pela reconversão de antigas cortas mineiras de minas de urânio em “Depósitos de

Resíduos”, onde seriam depositados resíduos de outras minas adjacentes (Exmin, 2002-2003). A correcta escolha de uma antiga mina para “Depósito de Resíduos” é um aspecto importante, na medida em que a falta de informação poderá ter consequências ambientais que progressivamente se tornarão de mais difícil resolução à medida que o processo de reconversão avança. Tendo em mente os objectivos para os locais, estes deverão ser cuidadosamente escolhidos de acordo com critérios relacionados com as suas características geológicas e hidrogeológicas e riscos ambientais. Como tal, é necessário o conhecimento das condições locais e de drenagem natural para prever a interacção entre o depósito de resíduos e a dispersão de contaminantes (radionuclídeos e elementos metálicos) em sistemas aquíferos fracturados, através da investigação do desenvolvimento em profundidade das estruturas superficiais. Estes estudos tiveram como objectivo a identificação de falhas e zonas condutivas que promovam a circulação de água subterrânea e a dispersão de águas contaminadas, uma vez que por vezes as áreas circundantes são populosas ou com agricultura intensa.

É o caso de duas das antigas minas de urânio seleccionadas, a Mina da Quinta do Bispo (Fig. 4.22) e a Mina do Prado Velho (Carvalho et al., 2005), ambas na zona centro de Portugal, escolhidas para o efeito entre outros motivos, pela sua localização central em relação a vias de comunicação. Apenas na primeira foram utilizadas sondagens mecânicas na interpretação dos perfis seleccionados para a realização de estudos geofísicos, pelo que será sobre Mina do Bispo que esta secção se irá debruçar.



Fig. 4.22 – (Esquerda) Antiga Mina da Quinta do Bispo. Bacia de decantação. Vista E. (Direita) Escombreira. Vista NW.

Nesta antiga Mina da Quinta do Bispo, que laborou entre 1979 e 1987, a escombreira ocupa uma área total de 158.000 m², com uma corta mineira de 300x90x80 m, correspondendo a um volume de escavação de 2.000.000 m³ (Exmin, 2000-2001). O minério ocorria fundamentalmente no contacto entre o granito de grão médio a grosseiro, de duas micas, por vezes caulinizado, com muitas impregnações ferruginosas e/ou hematitização, com metassedimentos interestratificados compostos por xistos alterados argilosos, micáceos e ferruginosos (Fig. 4.23). A mineralização é composta por autunite e torbernite. Foram escolhidos 4 perfis para estudo em redor da corta mineira, com localização de acordo com a orientação das estruturas geológicas a

investigar e constrangimentos topográficos. Os métodos geofísicos aplicados consistiram em radiometria (Ramalho et al., 2012d), FDEM com o Geonics EM34 com cabos de 10, 20 e 40 m, SEVs com o dispositivo Schlumberger com AB máximo de 400 m e sísmica de reflexão e refração (Ramalho et al., 2009b).

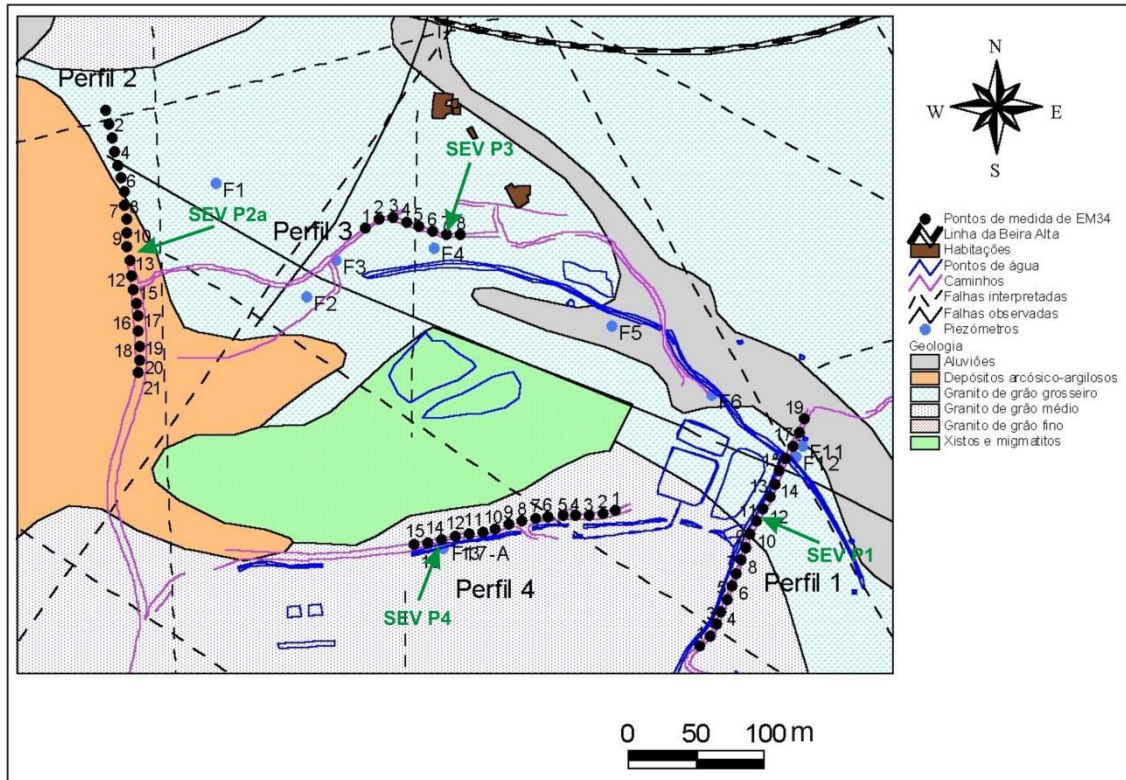


Fig. 4.23 – Mapa geológico da Mina da Quinta do Bispo, com localização dos 4 perfis onde foram adquiridos os dados de geofísica com os vários métodos, SEVs (verde) e localização das sondagens mecânicas realizadas (F#). Os números dos quatro perfis correspondem às localizações dos pontos de EM, usadas como referencial comum a todos os levantamentos geofísicos (Ramalho et al., 2009b).

Os centros geométricos das SEVs coincidem tanto quanto possível com a localização de piezómetros e simultaneamente são pontos de medida de FDEM. A sísmica de refração foi realizada ao longo de quase todo o comprimento dos perfis seleccionados, para obter informação acerca do grau de alteração das formações a partir dos modelos de velocidade das ondas. Os dados de sísmica de reflexão foram igualmente adquiridos em zonas de falha prováveis ou confirmadas. Os dados de condutividade e resistividade eléctricas de FDEM foram modelados em 2D, utilizando o *software* EM34-2D, desenvolvido por Monteiro Santos (2004).

Uma interpretação integrada de todos os resultados dos diferentes levantamentos geofísicos e dados de sondagens mecânicas confirma as falhas previamente cartografadas e a sua área de influência. Foram igualmente detectadas falhas que não tinham sido anteriormente identificadas. Na zona alterada, o fluxo de água subterrâneo segue em geral a topografia no sentido NW-SE, o que implica que o aquífero superficial correspondente a esta zona se encontra contaminado, em especial a

jusante da antiga corta mineira (Fig. 4.23 e Tabela 4.5), com especial ênfase para o Perfil 1.

Tabela 4.5 – Piezometria média, condutividade eléctrica, temperatura e pH da água na altura do ano em que os levantamentos geofísicos foram efectuados (Maio), medidos em sondagens mecânicas localizadas próximo das linhas seleccionadas (Ramalho et al., 2009b).

Piezómetro	Profundidade (m)	Piezometria média (m)	Condutividade eléctrica da água ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
F4	92	9,3	145	15,1
F8	30	1,8	3120	15,7
F11	37	1,8	571	16,5
F12	66	1,5	1600	15,2
F17-A	42	9,0	688	14,8

A Fig. 4.24 mostra a informação geofísica obtida neste Perfil 1 (ver Fig. 4.22).

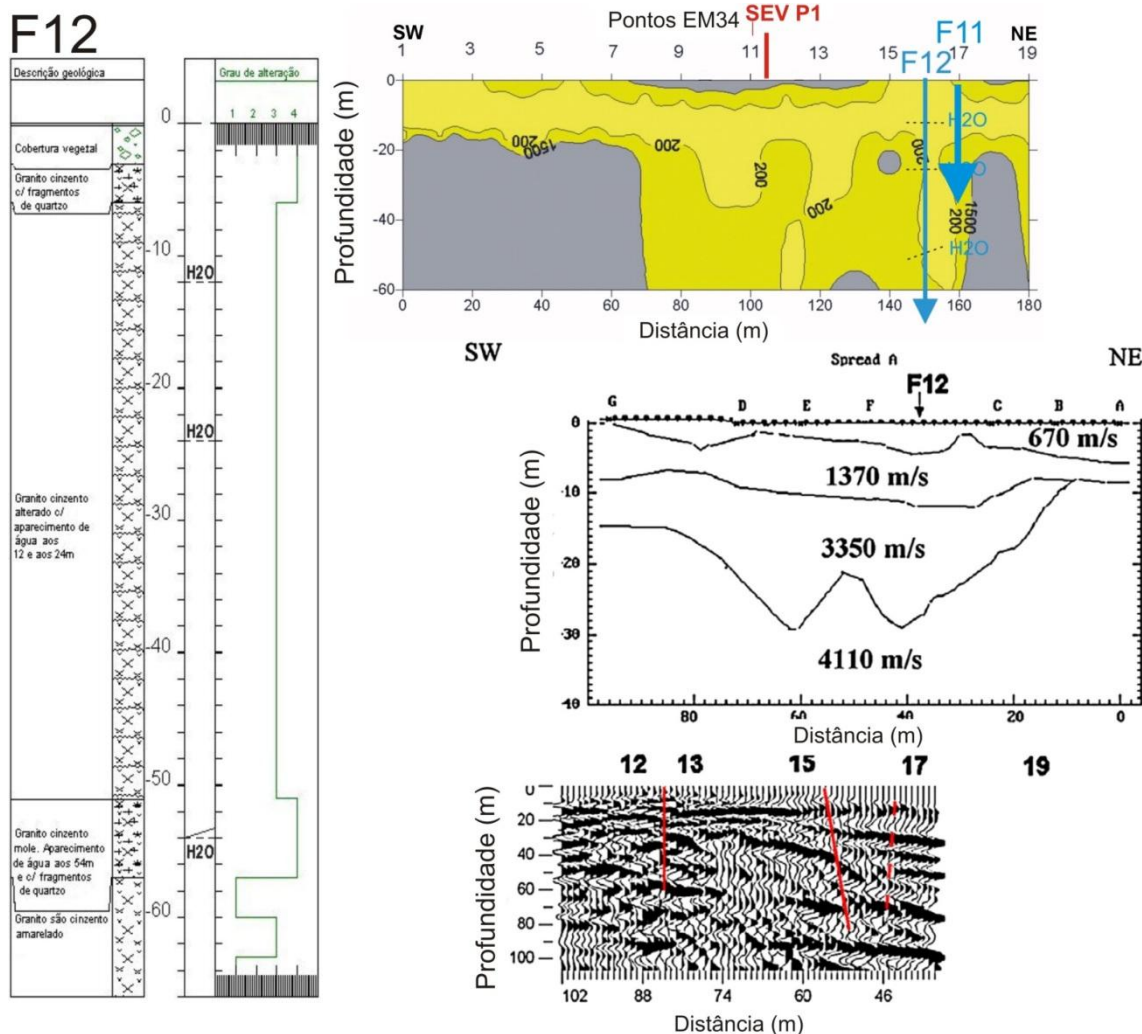


Fig. 4.24 – Perfil 1 – (Em cima, à direita): Secção de resistividade do modelo inverso 2D de EM34 mostrando a localização da sondagem F12 e a localização da SEV P1; (Esquerda): Log da sondagem F12 (Ao meio, à direita): Interpretação da refração sísmica deste perfil, com indicação da localização da sondagem F12. São mostradas as velocidades médias das ondas P para o único *spread* utilizado neste perfil. As letras representam a posição dos *shotpoints* utilizados na interpretação da refração. (Esquerda, em baixo): Secção de reflexão sísmica convertida em profundidade dos pontos EM11 a 17, com sobreposição da interpretação das falhas. As linhas vermelhas correspondem a falhas interpretadas. Imagens seleccionadas de Ramalho et al. (2009b). As secções 2D encontram-se dispostas de uma forma alinhada no espaço para melhorar a visualização da escala horizontal.

A par da contaminação superficial visível ao longo de todo o perfil, traduzida pela baixa resistividade eléctrica ao longo de uma zona alterada com cerca de 20 m de espessura, podem-se encontrar os piezómetros F11 e F12 (localização na Fig. 4.22), cujas colunas litológicas revelaram a existência de falhas críticas entre os 37 (F11) e os 66 m (F12), uma vez que a condutividade eléctrica da água difere substancialmente nesses dois piezómetros localizados lado a lado, mas atingindo profundidades significativamente diferentes.

Esse facto indica que existe conexão hidráulica entre a zona de alteração superficial e a zona de falha identificada entre os pontos EM16 e 17. Aqui, os elevados valores de condutividade eléctrica da água que se verificam no piezómetro F8, propagam-se a profundidades apreciáveis, caso se esteja em presença de uma zona fracturada, como é o caso do piezómetro F12.

A mesma análise foi realizada para os restantes perfis referidos na Fig. 4.22. Foram desenhados modelos esquemáticos 2D para cada perfil estudado, mostrando as zonas de alteração e de falha em profundidade, que controlam a circulação de água subterrânea e que podem causar futuros problemas com ela relacionados.

Foram estimados valores médios das propriedades físicas atribuídas aos materiais que compõem as camadas dos modelos esquemáticos dos Perfis 1, 2, 3 e 4 e apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Propriedades físicas atribuídas aos materiais dos modelos esquemáticos dos Perfis 1, 2, 3 e 4. Valores médios. Vp: velocidade sísmica das ondas longitudinais (Ramalho et al., 2009b).

Material	Características	Resistividade eléctrica (ohm.m)	Vp (m/s)
1	Granitos muito alterados/fracturados ou depósitos argilo-arcósicos	<150	400-1500
2	Granitos alterados	150-1500	1500-4000
3	Granitos pouco alterados ou não fracturados	>1500	>4000

Estas camadas indicam o grau de alteração, oscilando de 1 (formações muito alteradas ou depósitos argilo-arcósicos) a 3 (granitos pouco alterados ou não fracturados). A Fig. 4.24 mostra uma composição dos modelos esquemáticos conceptuais para os 4 perfis estudados até uma profundidade de cerca de 60 m correspondendo à interpretação integrada de todos os métodos geofísicos usados. Cada modelo esquemático é um compromisso entre os vários métodos utilizados (Ramalho et al., 2009b), uma vez que eles reflectem propriedades geofísicas distintas da sub-superfície e estão de acordo com as falhas cartografadas no mapa geológico da Fig. 4.23.

Assim, as três principais camadas estão definidas para cada perfil, integrando informação de dados litológicos, sondagens mecânicas, de geoelectrica, electromagnética e reflexão e refração sísmica. As falhas interpretadas são incluídas na Fig. 4.25 e a sua relação com as falhas previamente cartografadas também está representada.

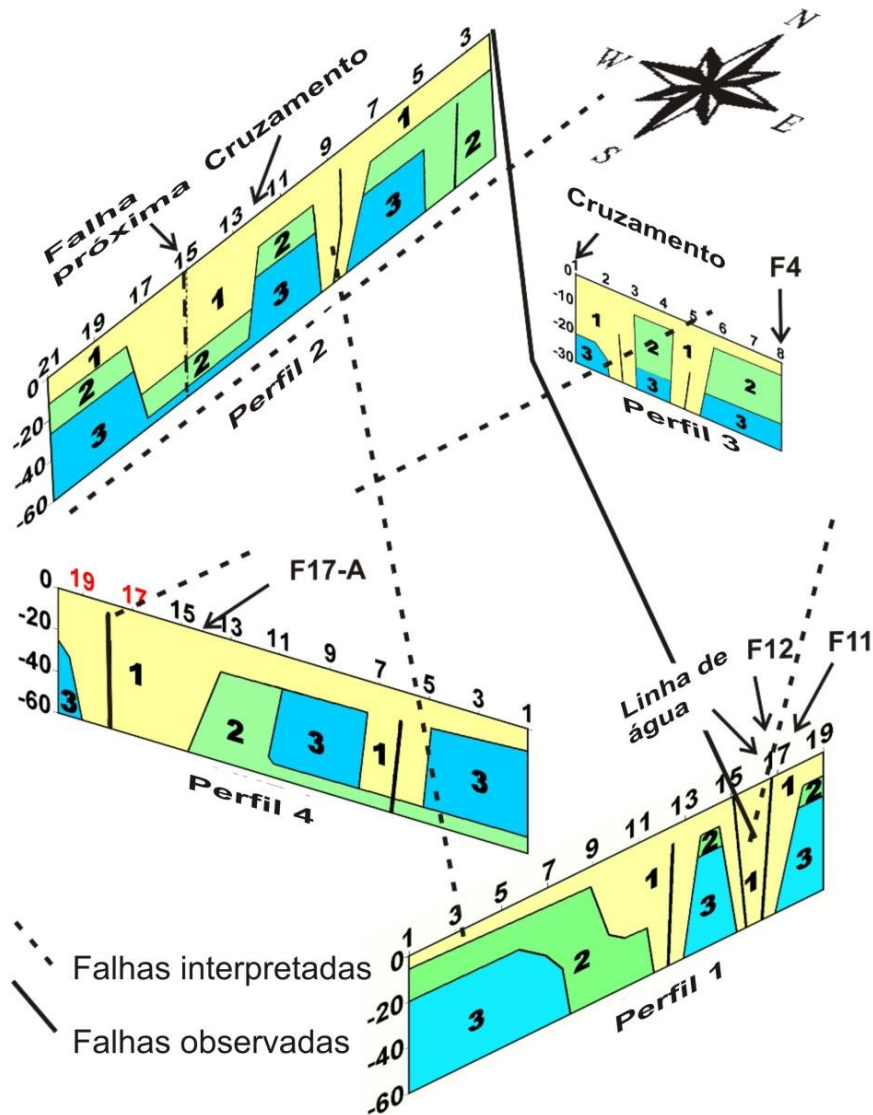


Fig. 4.25 – Modelos esquemáticos conceptuais sintéticos para cada linha estudada, após a interpretação conjunta de todos os dados de geofísica superficial. Linhas pretas pontilhadas – possíveis falhas não inferidas claramente em todos os métodos geofísicos. Linhas pretas a cheio – Falhas interpretadas em todos os métodos geofísicos. Os números do modelo correspondem a zonas de alteração: 1 – Formações muito alteradas/fracturadas; 2 – Formações alteradas; 3 – Formações pouco alteradas ou não fracturadas. As falhas mais profundas correspondem à interpretação da reflexão sísmica. Os pontos vermelhos no Perfil 4 indicam a área coberta apenas por métodos sísmicos (Ramalho et al., 2009b).

Os dados de EM, geolétrica e sísmica de refração mostraram uma boa consistência tanto na determinação das propriedades físicas da zona, presença de falhas ou na distribuição de condutividades eléctricas da água relacionadas com a circulação de água subterrânea e as suas características. A sísmica de reflexão, se bem que mais adequada para ambientes sedimentares, foi importante no complemento da restante informação e definição da localização e desenvolvimento das falhas profundas. Este estudo também permitiu a avaliação da sua importância local no que diz respeito à circulação da água subterrânea e o desenvolvimento de

modelos 2D esquemáticos que salientam as características mais importantes a considerar aquando das soluções geotécnicas a adoptar.

Estes resultados mostraram que a utilização conjunta de métodos geofísicos pode ser empregue com sucesso em formações cristalinas para permitir uma melhor compreensão acerca do modo como as estruturas geológicas se desenvolvem em profundidade. Com estes modelos sintéticos e estudos de cartografia geológica, foi possível estabelecer um programa detalhado com vista à impermeabilização das zonas críticas de forma que os problemas de drenagem sejam minimizados, permitindo a instalação de um “Depósito de Resíduos” na corta mineira da antiga Mina da Quinta do Bispo.

4.4.6. Utilização de métodos geofísicos para a preservação de aquíferos fissurados na marcação de sondagens mecânicas

Um outro aspecto de grande importância na utilização conjunta de métodos geofísicos consiste na sua utilização para preservação ambiental de aquíferos termais fissurados aquando da marcação de uma sondagem mecânica que se destina a incrementar o caudal extraído por termas ou aumentar a temperatura da água captada.

É o caso das Caldas de Monção, localizadas na zona Centro-Ibérica do Maciço Hespérico, com água sulfúrea bicarbonatada sódica a emergir a uma temperatura de cerca de 50 °C, cujo Plano de Exploração obriga desde há uns anos à substituição das nascentes originais por captações profundas (Fig. 4.26).



Fig. 4.26 – (Esquerda) Estabelecimento termal das Caldas de Monção. (Direita) Parque das Termas.

As termas encontram-se localizadas em aluviões sobrejacentes a formações graníticas fracturadas e muito próximas do Rio Minho, o que poderá pôr em perigo a integridade do aquífero termal no caso da perfuração de uma captação profunda. A existência de informação anterior proveniente das sondagens AC-1 e AC-2, respectivamente com 50 e 45 m de profundidade, bem como a existência de levantamentos geoelectricos prévios com o dispositivo do rectângulo atingindo a profundidade de cerca de 80 m (ACavaco, 1982), 4 perfis dipolo-dipolo nas imediações das Termas com profundidade de investigação de cerca de 30 m (Geosonda, 2001) e 2 perfis dipolo-dipolo a cerca de 1200 m a S das mesmas atingindo a profundidade de 30m (Carreira et al., 2005)

serviram de informação inicial para a avaliação dos métodos a aplicar na aquisição de novos dados. Por isso, à reinterpretação destes dados somou-se a realização de 7 SEVs utilizando o dispositivo de Schlumberger e com AB/2 máximo de 200 m e de sísmica de reflexão com profundidade de investigação de 400 m (Ramalho et al., 2012c). A Fig. 4.27 mostra a localização relativa dos levantamentos efectuados e das sondagens mecânicas utilizadas na interpretação dos dados. Estes métodos permitiram delinear em profundidade o conjunto de falhas que controla o aquífero termal fissurado, cartografadas e inferidas pela geofísica mais superficial levada a cabo pela Geosonda (2001) e Carreira et al. (2005).

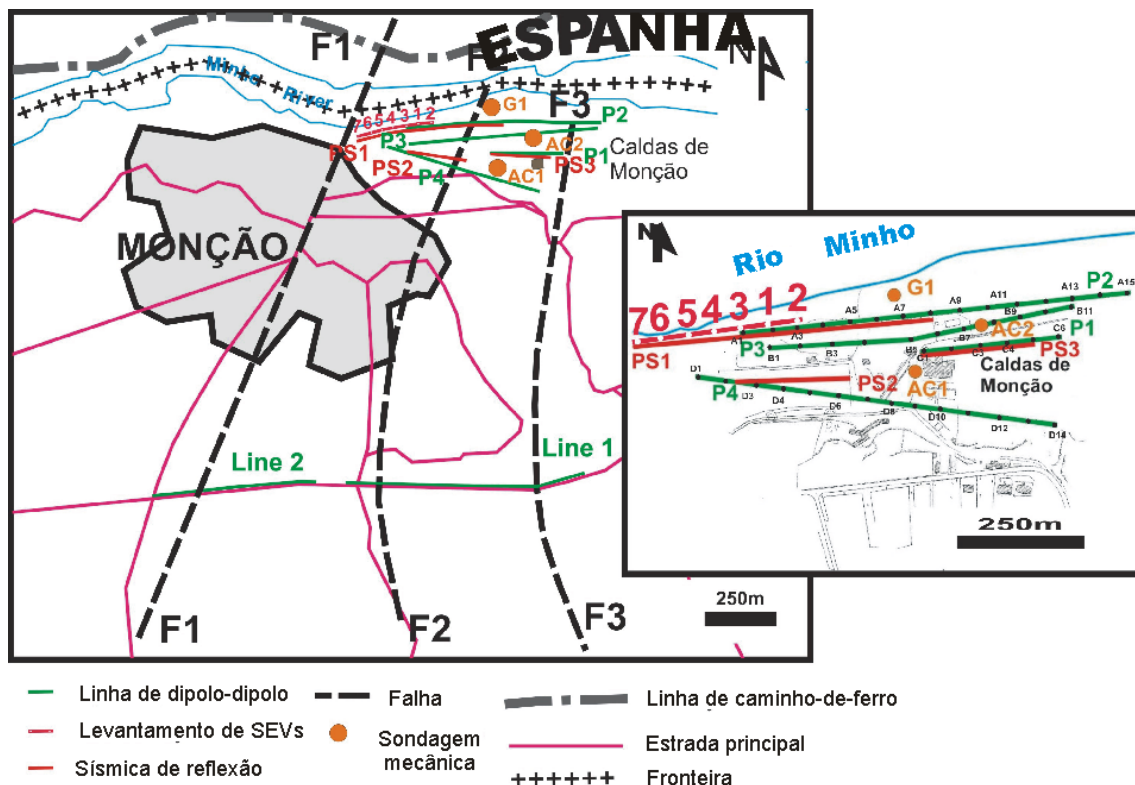


Fig. 4.27 – Localização dos levantamentos geofísicos levados a cabo na zona das Caldas de Monção, com base em Carta Militar (Ramalho et al., 2012c).

É o caso do exemplo que se apresenta na Fig. 4.28, onde se mostra a informação que serviu para a construção do modelo esquemático bi-dimensional baseado no perfil sísmico PS1, no perfil eléctrico dipolo-dipolo P2 e na SEV2, localizada no ponto A3 do perfil dipolo-dipolo.

Este modelo foi construído tendo em consideração as propriedades eléctricas e sísmicas dos diferentes materiais que se sabem constituir o sistema (Tabela 4.7). Assim, as aluviões que apresentam resistividades eléctricas elevadas, mas com velocidades de ondas P mais baixas são facilmente distinguíveis da zona de granito fracturado, imediatamente subjacente. Da mesma forma, os granitos pouco alterados a profundidades próximas dos 200 m exibem características eléctricas e sísmicas substancialmente diferentes dos granitos alterados (Tabela 4.7). A identificação de

falhas que se prolongam em profundidade foi possível graças à interpretação da sísmica de reflexão; as falhas F1 e F2 (Fig. 4.27) podem interpretar-se como barreiras geológicas para a circulação de água termal.

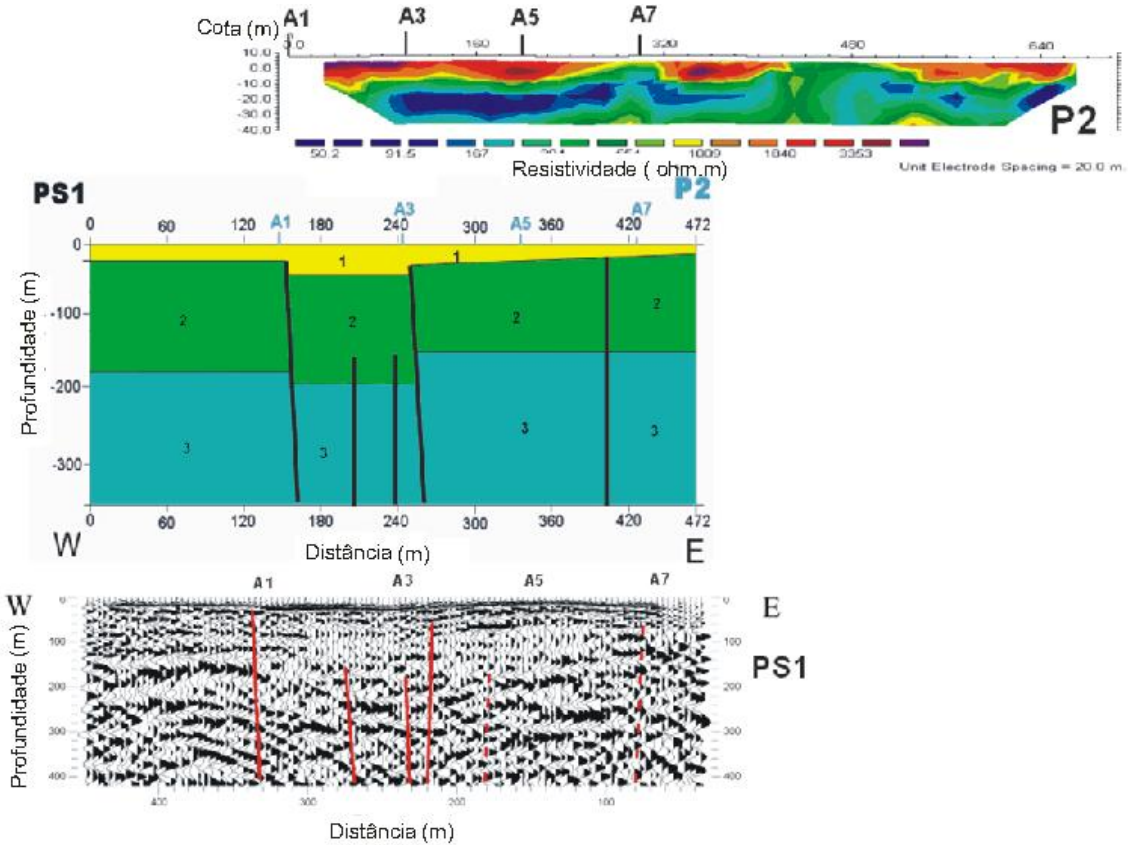


Fig. 4.28 – Modelo esquemático bidimensional (ao meio) baseado no perfil sísmico PS1 (em baixo), no perfil eléctrico P2 (em cima). Os pontos A# da Fig. 4.27 encontram-se sobrepostos, para uma melhor visualização da escala horizontal (Ramalho et al., 2012c).

Tabela 4.7 – Características físicas atribuídas aos materiais do modelo conceptual do Perfil PS1. As grandes variações na velocidade das ondas P do material 2 são atribuídas ao grau de fracturação.

Material	Características	ρ (ohm.m)	V_p (m/s)
1	Aluvião	>2000	550-1175
2	Granito alterado	400-1000	2244-4440
3	Granito pouco alterado	>2000	3848-4447

Abaixo dos 150-200 m, a sísmica de reflexão detecta uma zona de reflectores que pode representar características geológicas distintas no seio dos granitos. Pela interpretação conjunta das suas características, foi ao longo deste perfil que foi escolhido o local para a perfuração da nova captação G1, na zona de colapso entre as falhas F1 e F2 ou nas proximidades do ponto A7. Por razões logísticas, acabou por ser escolhida esta última localização para a perfuração da captação, que atingiu a profundidade de 250 m a captar abaixo dos 130 m, com um caudal de 12,5 l/s, temperatura de 47 °C, transmissividade de cerca de 100 m²/dia e artesianismo de cerca de +5 m.

Este trabalho demonstra a importância da integração dos métodos geofísicos de superfície como ferramenta de preservação ambiental de aquíferos, aquando da substituição de nascentes de água mineral natural por captações profundas em zonas cristalinas.

4.5. Breve análise custos-benefícios da prospecção geofísica em estudos ambientais

O grande número de variáveis interagindo de forma complexa envolvidas na avaliação e no diagnóstico adequados de zonas ambientalmente críticas exige um programa de investigação que defina as condições para se atingir o nível de precisão desejado, cumprindo o objectivo do projecto com o orçamento disponível (Benson et al., 1982).

Os factores dos quais dependem uma solução técnica e um orçamento que sejam compatíveis e que satisfaçam os objectivos a atingir são de difícil avaliação prévia (Benson et al., 1982). A necessária flexibilidade a nível técnico-orçamental, dado geralmente as situações em estudo terem alguma complexidade, não permite efectuar um plano técnico detalhado e, por isso, podem sempre ocorrer alterações inesperadas que exijam aplicação de métodos não planeados inicialmente. Por isso, tecnicamente, de acordo com o ambiente geológico e os objectivos do trabalho, torna-se uma boa prática fazer em primeiro lugar levantamentos espaciais utilizando os métodos geofísicos que comprovadamente cubram maiores áreas num espaço de tempo mais curto. Só após estes levantamentos iniciais se escolhem os locais para cirurgicamente utilizar os métodos geofísicos mais onerosos e/ou que envolvam mais meios humanos, encarecendo as campanhas. Por outro lado, a estimativa do seu custo depende das condições locais e topográficas do terreno, da dimensão da área, da grelha e número de pontos do levantamento, dos instrumentos utilizados, da precisão requerida, da profundidade de penetração e das exigências do processamento e grau de detalhe da interpretação. Na Tabela 4.8 apresentam-se alguns valores indicativos de custos para cada método geofísico, incluindo o processamento da informação (Unidade de Recursos Minerais e Geofísica, 2009; Geosurveys, 2012).

Pelas suas respostas no campo e pelo número reduzido de operadores, a combinação da EM e GPR permite uma primeira avaliação de locais de risco ambiental, com uma economia de tempo e dinheiro, que não são possíveis com a utilização de resistividade eléctrica/IP, que se utiliza em geral apenas depois de identificadas as zonas contaminadas (Martinho, 2003).

Tabela 4.8 – Valores indicativos de custos para cada método geofísico, incluindo o processamento da informação (Unidade de Recursos Minerais e Geofísica, 2009 e cortesia da Geosurveys, 2012). Poderão variar em função da localização do levantamento, condições do terreno, espaçamento das estações e volume de trabalho. Os valores finais são sempre estimados em orçamento específico para o trabalho a efectuar.

Método geofísico	Mínimo (€)	Máximo (€)
Diagrafias de Furo (por sonda, sondagem de 150m)	796	1591,5
FDEM EM-34 (por ponto)	2,5	4,5
Espectrometria Gama (autoportada, por km de perfil)	7	14
Espectrometria Gama (apeada) (por ponto)	2	5
Gravimetria (com topografia) (por ponto)	22,5	54
Gravimetria (sem topografia) (por ponto)	13,5	36
Magnetometria (por ponto)	17	31
Resistividade (por ponto)	21,5	40,5
IP (por ponto)	24	56
Reflexão Sísmica (por tiro)	14,5	24
Refracção Sísmica (por km de perfil)	1872	2808
GPR (por m)	1,91	2,23

Apesar de cada caso divergir consoante o tipo de ambiente geológico, o orçamento disponível e os objectivos a atingir, torna-se conveniente do ponto de vista económico o uso da EM e GPR antes da resistividade/IP, ou sísmica de reflexão, bem como a aplicação integrada destes métodos geofísicos. Em relação aos métodos de resistividade/IP, o dispositivo electrónico utilizado, seja ele dipolo-dipolo, Wenner ou Schlumberger, têm igualmente influência nos custos, quer pela rapidez de avanço, quer pelo número de operadores necessários (Martinho, 2003).

Por outro lado, o custo dos projectos de investigação também está directamente relacionado com a existência de sondagens mecânicas e a informação que existe acerca delas, uma vez que os custos da aplicação da geofísica de superfície são inferiores aos custos de perfuração. Quando uma investigação ambiental é feita com o recurso a sistemas integrados que incluam geofísica e sondagens mecânicas, a sua progressão torna-se significativamente menos onerosa, tal como se pode ver na Fig. 4.29, de Benson et al. (1982). A partir da figura, é igualmente possível verificar que os sistemas integrados se tornam mais caros à medida que o número de sondagens mecânicas necessárias para o projecto aumenta.

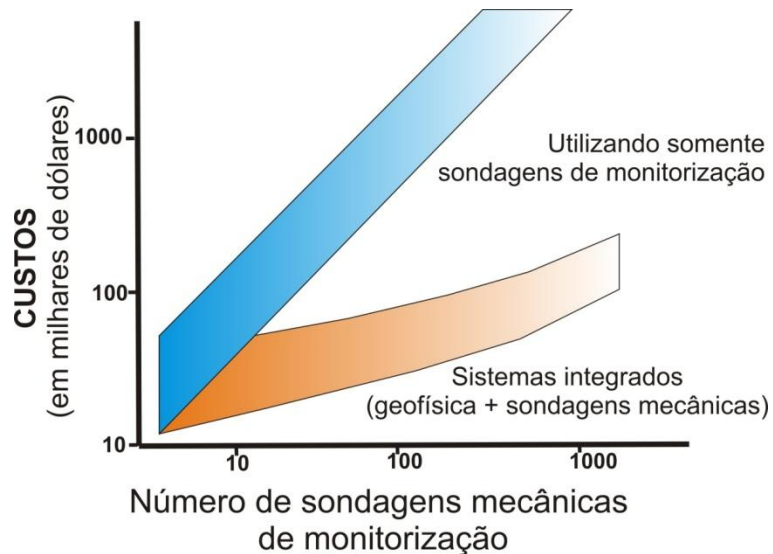


Fig. 4.29 – Curva de comparação de custos, furos-sistemas integrados, para a investigação de um local de resíduos perigosos (adaptado de Benson et al., 1982).

4.6. Artigos do SCI – justificação da sua inclusão e participação da autora

Neste capítulo e associados à temática da geofísica de superfície aplicada ao Ambiente foram incorporados 5 artigos escritos em co-autoria em revistas de circulação internacional com arbitragem científica com factor de impacto definido pelo Science Citation Index, sendo eles: (i) *A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill*, publicado em 1994 no *Journal of Applied Geophysics* e com 21 citações no Scopus; (ii) *Assessment of the leachate movement in a sealed landfill using geophysical methods*, publicado em 2012 na *Environmental and Earth Science*; (iii) *Environmental assessment of an uranium experimental rock blasting in Portugal, using geophysical and hydrogeological methods* publicado em 2012 no *Journal of Geophysics and Engineering*; (iv) *Understanding the 3D structure of a thermal water fissured granite aquifer with geophysical studies* publicado em 2012 na *Pure and Applied Geophysics* e (v) *Using geophysical methods to characterize an abandoned uranium mining site, Portugal*, publicado em 2009 no *Journal of Applied Geophysics* e com 6 citações no Scopus. Justifica-se seguidamente a sua inclusão nesta dissertação com uma curta análise dos mesmos, bem como se descreve sucintamente em que é que consistiu a participação da autora desta dissertação em todos eles.

4.6.1. Senos Matias, M. J., Marques da Silva, M. A., Ferreira P. L. e Ramalho E. C. (1994) – *A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill. Journal of Applied Geophysics*, nº32, pp.155-162.

A deposição de resíduos sólidos urbanos em lixeiras com pouco ou nenhum controle foi durante décadas em Portugal a solução clássica para eliminação de resíduos. Durante os últimos anos tem havido uma crescente preocupação sobre o efeito das

lixeiros na saúde pública, uma vez que a água lixiviada pode contaminar os aquíferos próximos. Como tal, os estudos hidrogeológicos são muito importantes para investigar e solucionar estes eventuais problemas de contaminação, mas um uso integrado de ambos os métodos geofísicos e hidrogeológicos pode ser ainda mais eficaz.

Neste trabalho, a contaminação das águas subterrâneas por uma lixeira, localizada em formações muito porosas e permeáveis próximas de Ovar, é avaliada por ambas as técnicas de prospecção geofísica de superfície e hidrogeológica. Tendo em conta as características geológicas e hidrogeológicas da área, foram escolhidos métodos eléctricos para realizar o levantamento geofísico. Numa primeira fase, contudo, foram usados métodos electromagnéticos e realizou-se uma pesquisa da condutividade eléctrica do solo para delimitar a pluma de contaminação. Em seguida, foi realizado um levantamento de SEVs e foram obtidas secções de pseudo-resistividade, de modo que um estudo mais pormenorizado da contaminação fosse levado a cabo. A partir da interpretação dos dados geofísicos, foram perfurados piezómetros estrategicamente localizados, obtidas amostras de água e realizadas análises químicas. Finalmente, os resultados globais são integrados e discutidos, bem como as vantagens e desvantagens das técnicas que foram utilizadas.

Este trabalho foi citado e descrito como exemplo, no livro *Environmental and Engineering Geophysics*, pp.282-283, por convite do Prof. P.V. Sharma. O livro foi editado em 1997 pela Cambridge University Press, ISBN 0 521 57240 1 4. Além disso, apareceu ainda como exemplo no *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts (2004)*, Volume 32, Issue 2, February 1995, pp.A57-A58.

A contribuição da autora da dissertação para o trabalho de Senos Matias et al. (1994) consistiu na realização de todo o trabalho de campo de geofísica de superfície, acompanhamento e controlo da execução dos piezómetros, processamento e análise de todos os dados de geofísica de superfície. Além disso, procedeu à integração dos dados e análise crítica dos mesmos.

4.6.2. Ramalho, E. C., Carvalho Dill, A. e Rocha, R. (2012a) – Assessment of the leachate movement in a sealed landfill using geophysical methods. *Environmental and Earth Science*. DOI 10.1007/s12665-012-1742-8.

Este trabalho descreve um caso de estudo que engloba a utilização de métodos geofísicos integrados aplicados à avaliação ambiental de um aterro selado de um antigo depósito de resíduos sólidos urbanos (RSU) e industriais, localizado em Gaeiras, no centro de Portugal. A situação em questão esteve relacionada com o excesso de produção de lixiviados neste aterro, que se tornou um problema ambiental a necessitar de uma avaliação urgente, para o planeamento de uma solução. Devido à falta de informação precisa em relação à forma, história e evolução do aterro sanitário, optou-se pela utilização de um conjunto de métodos geofísicos clássicos, uma vez que estes são não-invasivos e não-destrutivos. Uma vez que a área disponível era pequena, quase restringida à superfície do aterro, foram planeadas e realizadas

campanhas de prospecção electromagnética (RF-EM e Geonics EM34), SP, SEVs prospecção magnética para compreender os vários problemas que poderiam estar relacionados com o excesso de produção de lixiviados. A utilização conjunta destes métodos geofísicos clássicos foi orientada para investigar em profundidade o *bedrock* e a estrutura (RF-EM, EM34 e SEVs), os resíduos e as características dos lixiviados (EM34 e magnética) e fluxo de água subterrânea (SP) no interior do aterro sanitário. Os resultados geofísicos foram correlacionados com informações hidrogeológicas, integrados e interpretados, usando ferramentas de SIG. Os resultados obtidos foram importantes para compreender os mecanismos geológicos responsáveis pela superprodução de lixiviados e sugerir medidas mitigadoras. A importância deste trabalho está relacionada com o facto de por não ter sido feito um diagnóstico inicial rigoroso do problema, houve a necessidade de se recorrerem a métodos alternativos para proceder a um redimensionamento técnico do aterro, o que encareceu substancialmente todo o processo.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Ramalho et al. (2012a) consistiu na coordenação, realização, processamento e interpretação de todos os dados de geofísica de superfície à excepção do RF-EM. Procedeu à integração de todos os dados de hidrogeologia e geofísica na interpretação dos resultados. Concebeu e coordenou a realização do artigo.

4.6.3. Ramalho, E. C., Midões, C., Lourenço, M. C., Costa, A. e Monteiro Santos, F. A. (2012b) – Environmental assessment of an uranium experimental rock blasting in Portugal, using geophysical and hydrogeological methods. *Journal of Geophysics and Engineering*, nº9, pp.433-446.

O depósito de urânio de Nisa, localizado no centro de Portugal, é conhecido desde os anos 1960, tendo algumas áreas sido exploradas na época. Hoje, restam algumas cortas mineiras e escombrelas, que são uma preocupação para as autoridades locais. Para avaliar os problemas geoambientais causados por um desmonte experimental na exploração mineira principal, foram realizados levantamentos de FDEM e feitos modelos 3D de condutividade e resistividade eléctrica que serviram de base ao desenvolvimento de um modelo hidrogeológico, em regime estacionário, que pretendeu avaliar a possibilidade de transporte de contaminantes radioactivos, tais como o urânio, a partir do depósito de urânio para uma albufeira situada nas proximidades. Estes modelos 3D serviram para identificar variações da espessura da camada de alteração e as zonas de falhas em profundidade que controlam a circulação de águas subterrâneas. Também foram realizados levantamentos radiométricos de superfície com espectrometria nos canais do U, Th e K e correlacionados com a geologia e a estrutura geoelectrica. Toda esta informação foi utilizada para a construção do modelo 3D hidrogeológico em regime estacionário do desmonte experimental do depósito uranífero de Nisa. Neste modelo, foram simulados o fluxo de água subterrânea e as zonas de transporte preferencial de contaminantes. Algumas áreas apresentam valores radioactividade muito elevados, resultantes das características geológicas e formação de antigas escombrelas. No entanto, os

resultados da avaliação ambiental utilizando métodos geofísicos e hidrogeológicos apontam para uma situação crítica restrita apenas à área do desmonte experimental do depósito de urânio de Nisa e respectivas escombrelas.

A contribuição da autora da dissertação para o trabalho de Ramalho et al. (2012b) consistiu na coordenação e aquisição dos levantamentos electromagnéticos e radiométricos na zona do desmonte experimental. Realizou o processamento e interpretação dos dados electromagnéticos em 3D. Acompanhou o inventário hidrogeológico e a execução do modelo hidrogeológico em regime estacionário. Efectuou igualmente uma análise crítica da correlação dos dados obtidos com a geofísica de superfície. Concebeu e coordenou a realização do artigo.

4.6.4. Ramalho, E. C., Carvalho, J. P., Gonçalves, R. e Monteiro Santos, F. A. (2012c) – Understanding the 3D structure of a thermal water fissured granite aquifer with geophysical studies. *Pure and Applied Geophysics*, nº 169, pp.2031-2046.

As termas das Caldas de Monção, localizadas no norte de Portugal, são abastecidas por água proveniente de um aquífero hidrotermal que pelas suas características deve ser preservado da poluição e dos efeitos antrópicos. É para isso necessário ter um conhecimento complementar sobre o aquífero no sentido de realizar uma gestão sustentável da água. Tal deverá ser levado a cabo através da substituição das nascentes naturais por captações profundas, menos vulneráveis à poluição. Várias investigações foram realizadas com essa finalidade, para rever informação geológica e hidrogeológica da área. Por esta razão, foram reprocessados levantamentos geofísicos e outros foram realizados e de forma que se pudesse elaborar um modelo conceptual em 3D do fluxo das águas subterrâneas. Foi feita aquisição de três perfis de reflexão sísmica com o objectivo de localizar falhas profundas com capacidade de transportar água subterrânea para a superfície e para complementar a informação acerca características superficiais disponíveis antes da prospecção sísmica. Esta informação incluiu um levantamento dipolo-dipolo levado a cabo em 2001, que atingiu uma profundidade de investigação de aproximadamente 40 m, e as duas captações superficiais realizadas após uma prospecção profunda realizada na década de 1980, para substituir as nascentes. Além dos perfis sísmicos de reflexão, também foi feita a aquisição de sete SEVs e a interpretação da refacção dos primeiros dados de reflexão sísmica. Após a interpretação e correlação lateral das estruturas encontradas nos perfis geofísicos, foi construído o modelo conceptual 3D em profundidade com a integração da geologia, informações hidrogeológicas e geofísica. Este modelo foi a base para o planeamento no local de uma captação profunda entretanto realizada. A partir de duas posições iniciais favoráveis para o aparecimento de água termal, foi escolhido um local para perfurar uma terceira sondagem de forma a fornecer as instalações das termas. Esta atingiu 250 m de profundidade, uma temperatura de aproximadamente 50 ° C, e um caudal de 12,5 l/s. Este exemplo mostra a importância de usar métodos integrados de geofísica de superfície para aumentar o conhecimento sobre a circulação de águas subterrâneas e detectar áreas favoráveis para a

perfuração de captações de água termal para substituir as nascentes naturais clássicas, com o objectivo de proteger os aquíferos da poluição.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Ramalho et al. (2012c) consistiu na análise da informação das sondagens mecânicas e métodos eléctricos, e na correlação de toda a informação existente. Concebeu e coordenou a realização do artigo, efectuando igualmente uma análise crítica da integração dos dados obtidos.

4.6.5. Ramalho, E., Carvalho, J., Barbosa, S. e Monteiro Santos, F. A. (2009) – Using geophysical methods to characterize an abandoned uranium mining site, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, nº67, pp.14-33.

No âmbito de um plano que integra Portugal Continental foi contemplada a hipótese de utilizar cortas mineiras a céu aberto de minas de urânio abandonadas para locais de "Depósito de Contenção de Resíduos". Estas áreas têm o objectivo de armazenar os resíduos mineiros provenientes de outras minas adjacentes, pelo que a classificação de antigas áreas mineiras para esse tipo de uso é realizada segundo critérios relacionados com a sua localização, acessibilidade, condições geológicas e hidrogeológicas. No entanto, a deposição de resíduos mineiros nas minas a céu aberto pode causar problemas ambientais relacionados com as características geológicas e hidrogeológicas do local, que devem ser previstos e evitados antes de um local específico ser escolhido. Portanto, a identificação de falhas e zonas condutoras que podem promover a circulação de água subterrânea e a propagação de água contaminada é de grande importância, uma vez que a área circundante é altamente povoada. Os possíveis impactos ambientais negativos da presença de tais locais de eliminação de resíduos são passíveis de ser avaliados com métodos geofísicos e cartografia geológica através de estudos em várias áreas consideradas geológica e hidrogeologicamente críticas. A antiga mina de urânio da Quinta do Bispo é um desses locais. Esta corta mineira, escolhida como um dos locais a ser utilizado como um "Depósito de Contenção de Resíduos" (de acordo com os critérios acima referidos), teve que ser caracterizada em profundidade para evitar eventuais impactos ambientais negativos relacionados com a percolação da água contaminada através das falhas. Assim realizou-se aquisição, processamento e interpretação de levantamentos electromagnéticos, eléctricos e de sísmica de refração e reflexão. A partir desta informação, foram construídos modelos esquemáticos 2D, mostrando a alteração em profundidade e zonas de falha. Estas zonas de falha por sua vez controlam a circulação de águas subterrâneas e, portanto, problemas futuros com impacto ambiental negativo na água subterrânea podem ser previstos e evitados.

A contribuição da autora da dissertação para este trabalho de Ramalho et al. (2009b) consistiu na coordenação e realização nos levantamentos eléctricos e electromagnéticos, respectivo processamento, interpretação e integração com os dados da prospecção sísmica. Efectuou igualmente uma análise crítica da integração dos dados obtidos. Concebeu e coordenou a realização do artigo.

4.7. Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se a aplicação de um conjunto diversificado de métodos geofísicos de superfície convencionais para a caracterização de fluidos na resolução de problemas ambientais. Estes métodos foram aplicados em condições geologicamente diferentes e com objectivos distintos, pelo que o tipo de resultados obtido através de cada um é igualmente significativamente diferente.

Os resultados obtidos em várias situações mostraram ainda que a sua aplicação em simultâneo com a utilização de informação proveniente de vários tipos de sondagens mecânicas constitui uma mais-valia na interpretação e no diagnóstico em problemas ambientais. Uma aplicação integrada de métodos geofísicos de superfície que complemente a interpretação da informação proveniente de sondagens mecânicas constitui geralmente a solução mais eficaz para um diagnóstico ou avaliação ambiental (Benson et al., 1982) e para a caracterização de fluidos, na medida em que estas últimas permitem aferir resultados.

A informação obtida pode ser de vários tipos, pois as sondagens mecânicas a utilizar poderão igualmente ter diversas proveniências e ter ou não carotagem contínua. Neste trabalho, mostraram-se exemplos da utilização de captações mais ou menos profundas, piezómetros, poços superficiais ou tubos de biogás na recolha de informação de informação relevante para a interpretação de dados adquiridos com métodos geofísicos de superfície. Esta informação pode ter igualmente diversas formas, podendo ser utilizados os *logs* litológicos, a caracterização analítica (física e química, *in-situ* ou em laboratório) dos fluidos ou ainda diagrfias realizadas aquando da perfuração ou após o entubamento, que contribuem para a consistência das interpretações acerca da caracterização de fluidos, realizadas especialmente a partir da aplicação de métodos geofísicos de superfície.

Por sua vez, os métodos geofísicos de superfície têm diferentes aplicabilidades na caracterização dos fluidos. Assim, os métodos eléctricos e electromagnéticos têm uma reconhecida eficácia em ambientes sedimentares na caracterização de plumas de contaminação, como foi o caso da Lixeira de Ovar e até mesmo nas características físicas dos fluidos, em especial quando envolvem a incorporação de poluentes, tal como se verificou na Lixeira de Gaeiras. A aplicação da Lei de Archie torna ainda possível obter não só informações de algumas características químicas da água, como também para a caracterização de lixiviados no interior das lixeiras. Por outro lado, os métodos sísmicos podem ser utilizados com sucesso em ambientes cristalinos, na identificação de falhas e do seu comportamento em profundidade e ainda na identificação de estruturas com potencial para serem hidraulicamente condutoras. A aplicação de sísmica de reflexão em formações cristalinas para a identificação de falhas em profundidade poderá ser consideravelmente beneficiada quando utilizados métodos eléctricos e electromagnéticos em simultâneo, como foram os casos das Caldas de Monção ou da antiga Mina da Quinta do Bispo. Nos exemplos aqui apresentados, a espectrometria de radiação gama tem um importante campo de aplicação na investigação da contaminação por radionuclídeos e a prospecção magnética é eficaz na identificação de materiais metálicos ocultos.

Como foi visto neste capítulo, a aplicação conjunta de métodos eléctricos e/ou electromagnéticos e sísmicos convencionais, acaba por ser uma boa metodologia para utilizar, pois permite identificar falhas produtivas e é eficaz num conjunto vasto de situações ambientais, na medida em que o aumento da condutividade eléctrica causado por estas pode ser detectada. Além disso, é possível atribuir um conjunto de parâmetros físicos característicos de cada material, e, desta forma, estabelecer modelos conceptuais 2D ou 3D, que são de grande utilidade em avaliações ou projectos ambientais.

Esta informação acerca das características físicas dos materiais pode ser utilizada em modelos hidrogeológicos para definir camadas de alteração e/ou fracturação e ainda para a localização de barreiras hidrogeológicas, características e heterogeneidades espaciais das formações aquíferas e dos fluidos que estas contêm.

A aplicação de outros métodos geofísicos adicionais, como resposta a questões específicas decorrentes da avaliação de cada situação a investigar constitui um aspecto complementar particularmente interessante, quando é necessário eliminar incertezas e interpretações ambíguas, cuja utilização pode trazer benefícios não avaliados inicialmente.

5. Conclusões

5.1. Generalidades

Na sociedade em que vivemos a preservação do ambiente assume actualmente uma importância significativa, na medida em que desempenha um papel crucial na qualidade de vida das populações e no equilíbrio e sobrevivência dos ecossistemas. No entanto, além das alterações climáticas perspectivarem um futuro com escassez crescente de água, com períodos de seca cada vez mais acentuados e prolongados, o deficiente ordenamento do território das últimas décadas com zonas habitacionais de elevada densidade localizadas preferencialmente junto ao litoral gerou pressões que, na maior parte dos casos, atingiram um desenvolvimento demasiado rápido para a correspondente construção de infraestruturas de apoio. Isto deu origem a desequilíbrios ambientais severos que se acentuaram ao longo do tempo e ao surgimento e agravamento de problemas de contaminações nas águas e nos solos a par da cada vez mais difícil tarefa de reverter ou pelo menos, em muitos casos, parar todo esse processo.

Além disso, a proximidade do *peak oil* e as convulsões económicas que assolam o mundo, agravadas com a escalada galopante dos preços do petróleo, fazem com que a dependência dos combustíveis fósseis comece a assumir contornos preocupantes, sem que as alternativas estejam a surgir a um ritmo viável. A qualidade de vida das populações poderá, pois, degradar-se de uma forma assustadoramente rápida, o que terá consequências ambientais a curto e médio prazo nas gerações futuras, cujos efeitos são previsíveis, mas que também se poderão revelar em situações inesperadas.

Todos estes motivos obrigam, apesar do momento de crise que se atravessa, a olhar com especial atenção para as tecnologias financeiramente acessíveis a pequenas empresas, que permitam minimizar estes factores ambientais negativos, maximizando simultaneamente o acesso aos recursos com as ferramentas existentes. Para tal, torna-se necessário ponderar caso a caso a utilidade do investimento necessário para a utilização dos vários métodos ao dispor do tecido empresarial que permitam dar uma resposta mais eficaz na resolução destes problemas.

A par desta degradação ambiental, tem no entanto havido um esforço de mudança dos hábitos e culturas ambientais das populações, que ao longo das décadas tem vindo a dar mostras de uma melhoria lenta, sustentada sobretudo no investimento em educação ambiental escolar, da imposição legal de práticas ambientalmente mais sustentáveis e na recuperação de locais degradados por parte das entidades competentes. Esta problemática é ampla e afecta tanto o modo de captar águas subterrâneas para abastecimento público no que diz respeito à qualidade e quantidade e de forma que os aquíferos mantenham a sua integridade, como a avaliação de possibilidades alternativas para o fornecimento de energia a comunidades locais ou ainda na avaliação e recuperação de erros ambientais do passado.

A utilização cada das águas subterrâneas em aglomerados populacionais de pequena e média dimensão como recurso de reserva ao abastecimento de água proveniente das albufeiras em períodos de estiagem ou seca mais ou menos prolongada é cada vez mais frequente. No caso de escassez ou de má qualidade das águas superficiais é necessário encará-las numa óptica de recurso de reserva, a preservar mesmo em épocas de não utilização. Este facto leva a que seja de todo desejável o investimento na construção de captações de água subterrânea que permita uma utilização duradora, de longo prazo, que garanta a não deterioração dos equipamentos de bombagem devido aos períodos de paragem, ao mesmo tempo que favoreça a preservação dos recursos hídricos. Por isso, esta preservação deverá ser assegurada recorrendo à execução de sondagens e captações de água profundas tecnicamente bem executadas cuja utilização suprima vários tipos de necessidades em quantidade e qualidade, nomeadamente a nível de abastecimento de água e regadio. Estas poderão assim constituir uma solução satisfatória que preserve os recursos hídricos de efeitos antrópicos negativos para os ecossistemas, garantindo em simultâneo as necessidades em água de conjuntos habitacionais mais ou menos alargados.

Por outro lado, as consequências ambientais das práticas muito discutíveis de ordenamento urbano, industrial e de exploração de recursos minerais que tiveram lugar durante décadas, sem obediência a regras e eliminando com frequência qualquer cuidado na preservação do ambiente em prol do lucro fácil, tornam-se difíceis de avaliar em toda a sua extensão e profundidade, quer a nível de protecção de aquíferos, como do diagnóstico e avaliação das contaminações. É importante, pois, o conhecimento actualizado das consequências de tais práticas ao longo de décadas, através de monitorizações periódicas e pela utilização de métodos que permitam estabelecer comparações evolutivas ao longo do tempo, para que se possam proceder regularmente ao controlo destes processos e mitigar os seus efeitos e que é

necessário minimizar. As metodologias referidas nesta dissertação envolvem a execução de estudos deste âmbito que poderão atingir profundidades apreciáveis e que por sua vez estão dependentes da construção de captações que pelas suas características envolvem riscos de insucesso elevados.

No que concerne ao fornecimento energético, factor fundamental de equilíbrio e bem-estar que permite a manutenção de uma qualidade de vida adquirida ao longo de décadas, a procura de energias alternativas aos combustíveis fósseis tem tido na Geotermia um campo de aplicação muito limitado em Portugal Continental, até agora na melhor das hipóteses circunscrito a aproveitamentos em cascata de ocorrências termais portuguesas com temperaturas em geral superiores a 50 °C (Lourenço e Cruz, 2005). Estes aproveitamentos em cascata englobam a exploração de algumas estufas e aquecimentos de piscinas e de edifícios, nas instalações de estabelecimentos termais concessionados e em funcionamento ou muito próximas destes, na chamada Geotermia clássica (Ferreira Gomes, 2005). No entanto, actualmente assiste-se em vários países ao desenvolvimento de alguns projectos de Geotermia Estimulada, ou *Enhanced Geothermal Systems* (EGS), que oferece novas perspectivas para o aproveitamento energético em zonas que não se podem considerar geotermicamente anómalas, mas que exigem um conhecimento geológico e geotérmico a profundidades da ordem de quilómetros (Lund, 2007). Neste caso, embora a conjuntura económica actual não seja favorável aos investimentos avultados necessários ao desenvolvimento desta técnica, a dependência crescente de combustíveis fósseis cada vez mais onerosos reforça a importância de manter as alternativas em aberto através de um conhecimento actualizado o mais rigoroso possível dos parâmetros que envolvem a investigação e o levantamento das condições do país para este tipo de projectos, que por sua vez poderão permitir a sua implementação rápida num futuro mais favorável.

5.2. Problemas e desafios

A necessidade de preservar a integridade dos aquíferos qualquer que seja o tipo de actividade antrópica praticada torna desejável não só a melhoria das rotinas das práticas de trabalho comuns como também conhecer com o maior rigor possível as formações e estruturas geológicas que dominam as áreas a estudar, de forma a que seja possível a conceptualização de modelos geológicos e hidrogeológicos. Pretende-se que estes modelos sejam satisfatórios na obtenção de respostas realistas e tecnicamente fundamentadas relativamente aos problemas a enfrentar, quer estes sejam relacionados com a realização de captações, quer se relacionem com problemas ambientais de origens diversas.

Nestes casos, o investimento em métodos geofísicos de superfície que detectem em profundidade a ocorrência e desenvolvimento de armadilhas hidrogeológicas é amplamente justificado, em especial na utilização conjunta de métodos eléctricos, electromagnéticos e sísmica de reflexão, cuja informação pode ser integrada e claramente beneficiada se utilizada em conjunto com diagrfias realizadas nas

sondagens mecânicas e captações de água subterrânea existentes nas proximidades. Por esse motivo, a utilização de geofísica de profundidade em captações profundas de rochas cristalinas permite a obtenção de um conhecimento muito mais rigoroso, das propriedades mecânicas das formações atravessadas, do modo como os fluidos ocorrem, através da identificação de fracturas produtivas e de zonas de alteração e das suas características relacionadas com a qualidade e a temperatura. No caso de zonas sedimentares detríticas, mostrou-se nesta dissertação a importância que esta informação tem na qualidade da água nativa a captar e na produtividade das captações.

A taxa de insucesso das captações do Maciço Antigo do Norte e centro de Portugal diminui com a utilização sistemática de prospecção geofísica (Carvalho, 2006), uma vez que esta tem um papel muito importante na elaboração de modelos conceptuais hidrogeológicos. Foi mostrada nesta dissertação a relação de alguns parâmetros hidráulicos dos aquíferos com a geofísica de superfície e de profundidade. O desenvolvimento destas metodologias em escala alargada e regional em rochas cristalinas parece ser um aspecto importante a desenvolver no futuro. Por outro lado, em zonas sedimentares, Marques da Silva (1990), Ramalho et al. (2009) e esta dissertação mostraram claramente as vantagens da sua utilização no sucesso final de uma captação.

A escassez financeira e de meios que assola as várias franjas da nossa sociedade obriga a que a especialização existente se centre em meios técnica e financeiramente acessíveis de maneira a produzir informação de qualidade de uma forma rotineira que não sobrecarregue excessivamente os trabalhos a efectuar e constitui um claro desafio dos tempos que correm fazer mais com menos.

A Tabela 5.1 mostra uma análise SWOT para a utilização de métodos geofísicos em trabalho de investigação de Hidrogeologia, Geotermia e Ambiente.

Tabela 5.1 – Análise SWOT para a utilização de métodos geofísicos em trabalho de investigação de Hidrogeologia, Geotermia e Ambiente.

		Envolvente Interna	
		Pontos fortes	Pontos fracos
Envolvente Externa	Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> • grande diversidade de parâmetros medidos • elevado <i>know-how</i> • componente científica do LNEG enquanto Laboratório de Estado 	<ul style="list-style-type: none"> • antiguidade de equipamentos • falta de pessoal • manutenção de equipamentos
	Ameaças	<ul style="list-style-type: none"> • diminuição de procura externa pela crise financeira • diminuição da capacidade financeira institucional 	<ul style="list-style-type: none"> • criação e manutenção de parcerias institucionais • partilha de equipamento inter-institucional

5.3. Linhas metodológicas a promover

Apesar de terem sido referidos nesta dissertação vários modos de caracterizar fluidos com diferentes objectivos e metodologias, relacionados com Hidrogeologia, Geotermia e Ambiente, muito ficou ainda por abordar, uma vez que há um sem número de situações distintas relacionadas com diferentes ambientes geológicos cuja resolução pode igualmente ser beneficiada com a aplicação de métodos geofísicos e explorando a sua relação com a informação proveniente de sondagens mecânicas.

Exploraram-se aqui essencialmente métodos geofísicos clássicos, de profundidade e de superfície, e todo o trabalho foi direccionado no sentido de tirar o melhor partido prático de informação variada com vários objectivos distintos, relacionados com a qualidade das captações de água, diagnósticos ambientais e características dos fluidos em profundidade.

Assim sendo, no âmbito dos assuntos abordados neste trabalho, sugere-se:

- (i) O estabelecimento de linhas orientadoras para o futuro, englobando quatro aspectos fundamentais, relacionados com a educação, a formação, a prevenção e o diagnóstico dirigidas a várias populações-alvo, que se destacam pelas suas valências, englobando a sociedade no geral.
- (ii) O incentivo à introdução da ciência experimental nos curricula das disciplinas de Ciências da Natureza dos programas dos ensinos básico e secundário, de forma que os alunos tomem contacto directo e realista com estas problemáticas. Em alternativa, a utilização de conteúdos didácticos interactivos disponíveis *online* e de utilização de *download* livres (Ramalho et al., 2010; Silva e Fernandes, 2010; Rosa e Pinto, 2010), fazendo consulta através dos *websites* correspondentes do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Universidade do Minho ou do programa Ciência Viva, apenas para citar alguns.

- (iii) A inclusão do tema diagrfias como uma parte integrante de relevo nos programas das disciplinas das áreas de Hidrogeologia e Geofísica no 1º ciclo dos cursos universitários ligados às geociências, acabando as suas matérias por serem complementares no domínio teórico e aplicado. Neste ciclo, sugere-se dar início à exploração da temática relacionada com a utilização de diagrfias convencionais no que concerne aos seus conceitos físicos subjacentes e aplicações potenciais em diferentes tipos de ambientes geológicos.
- (iv) A existência de uma disciplina de 2º ciclo dos cursos universitários ligados às geociências que desenvolva a temática iniciada no 1º ciclo e vá mais além das diagrfias convencionais aplicadas em Hidrogeologia utilizadas nos vários modos de caracterizar os fluidos. Nesta disciplina seriam abordadas de uma forma técnico-prática as diagrfias menos comuns, integrando problemas práticos reais de índole diversa a resolver pelos alunos.
- (v) O incentivo da utilização de diagrfias convencionais por parte das empresas de sondagens, através do incremento da actividade nesta área, salientando os benefícios da sua utilização por rotina, em especial em ambientes sedimentares detríticos, onde apenas com a utilização de uma única sonda e a leitura de 3 parâmetros (SP, SPR e radiação gama natural) se obtêm informações que podem ser de enorme importância para a preservação dos aquíferos, relacionadas com uma colocação dos tubos-ralos mais adequada, identificação de litologias, estimativa da qualidade química da água nativa, etc.
- (vi) O fomento do conhecimento nestas áreas para os técnicos envolvidos em Hidrogeologia, ministrando com uma regularidade periódica cursos de formação e sessões de esclarecimento teóricas e práticas em colaboração estreita com as associações profissionais do sector, dentro da filosofia do DL nº 133/2005, de 16 de Agosto.
- (vii) Uma intervenção mais proactiva por parte do Laboratório Nacional de Energia e Geologia no âmbito das suas competências consignadas no DL nº 145/2012, de 11 de Julho, e da Estratégia Nacional para os Recursos Geológicos – Recursos Minerais, no âmbito da Resolução do Conselho de Ministros n.º 78/2012, de 11 de Setembro, relacionada com a aplicação e reinterpretação de diagrfias em projectos de investigação, processos de consultadoria em situações específicas, aconselhamento técnico às empresas de perfuração e colaboração na organização de cursos de formação que se adequem às necessidades técnicas do mercado empresarial.
- (viii) No caso de diagnósticos e avaliações ambientais em situações diversas, foi comprovada a aplicabilidade da utilização de métodos geofísicos convencionais envolvendo custos de aquisição e processamento moderados. Estes métodos poderão ainda fornecer informação espacial e em profundidade para incluir em modelos conceptuais e matemáticos, geológicos e hidrogeológicos.

- (ix) Algumas situações práticas aqui abordadas envolvendo diagnósticos ambientais em antigas áreas mineiras abandonadas deverão ser objecto de implementação regular no domínio da Estratégia Nacional para os Recursos Geológicos – Recursos Minerais.
- (x) A utilização dos métodos geofísicos com fins ambientais no domínio 4D mostra ainda que estas metodologias são também eficazes na avaliação e delimitação da evolução de contaminações, num sem número de situações e aplicando apenas métodos convencionais de prospecção com uma excelente relação custo-benefício. Nesse sentido parece importante, tal como demonstrado nesta dissertação, em especial relativamente aos trabalhos de investigação relacionados com a evolução temporal de plumas de contaminação, que exista uma continuação periódica da monitorização dos resultados obtidos ao longo dos anos em locais críticos, aproveitando as infraestruturas já criadas, para avaliar a recuperação dos ecossistemas em ambientes geológicos e com tipos de contaminações diferentes.
- (xi) A implementação de um programa investigação a nível nacional, com uma duração suficientemente longa que permita compreender em toda a sua extensão as consequências ambientais da exploração mineira, deposição de lixos domésticos e industriais a céu aberto, selagens de lixeiras tecnicamente mal fundamentadas, passíveis de ser fonte de contaminação de aquíferos e que tenha uma filosofia fundamentalmente de prevenção.
- (xii) A obrigatoriedade para as empresas seguirem Cadernos de Encargos que exijam especificações técnicas rigorosas, mas que no sentido de serem cumpridas com qualidade, não enveredem por condições técnico-financeiras de difícil satisfação.
- (xiii) O fomento de um sistema de acreditação de empresas e dos técnicos envolvidos através de uma maior intervenção das associações do sector, em que este constitua um passaporte para o reconhecimento da qualidade técnica das empresas e da sua habilitação a operar no mercado pelas entidades competentes.
- (xiv) A continuação e aperfeiçoamento da elaboração da cartografia geotérmica, eventualmente em colaboração com Espanha, utilizando a experiência passada comum dos dois países e incrementar a elaboração de projectos conjuntos.
- (xv) O desenvolvimento de outros trabalhos de investigação que envolvam as metodologias apresentadas nesta dissertação no sentido de preservar aquíferos, fazer diagnósticos de situações ambientalmente críticas e buscar energias alternativas, ambientalmente mais limpas.

5.4. Reflexões finais

O momento de crise financeira vivido actualmente não é favorável à implementação de rotinas tendentes à utilização de métodos geofísicos de profundidade em investigações hidrogeológicas ou da aplicação de um conjunto diversificado de

métodos geofísicos de superfície em avaliações ambientais. Pelas suas características, relacionadas com a morosidade dos trabalhos de campo de alguns métodos, bem como o número operadores e técnicos envolvidos em todo o processo de aquisição, processamento e interpretação, há em geral a tendência para se optarem por métodos que acarretem menores custos, mesmo que isso signifique o sacrifício de obter informação espacial e em profundidade sobre vários parâmetros que se possam correlacionar com as características físicas, e em certos casos químicas, das formações geológicas e hidrogeológicas. Da mesma forma, como não é possível prever ou avaliar com exactidão os benefícios obtidos no final, pelo acréscimo financeiro que a utilização de diagrfias acarreta no processo de perfuração de uma sondagem mecânica e a exigência de uma capacidade técnica que por vezes as empresas de sondagens a operar no mercado não possuem, elas são geralmente eliminadas dos correspondentes cadernos de encargos. Tal como demonstrado nesta dissertação, é possível fazer uma caracterização do modo de ocorrência dos fluidos com base num número reduzido de diagrfias, em especial em sondagens realizadas em aquíferos multicamada localizados em zonas sedimentares e constituídos por alternância de facies arenosa e argilosa. Os benefícios obtidos em termos ambientais superam largamente os custos que estas possam ter, pois o risco do contacto de aquíferos com águas de diferentes qualidades aquando do entubamento final das captações diminui significativamente.

Actualmente, com a incerteza quanto ao futuro que Portugal se confronta, parece inquestionável que das poucas coisas que esta geração tem para deixar às próximas é a preocupação com a sua sobrevivência enquanto indivíduos, parte integrante de um ecossistema global. Para tal, somos moralmente obrigados a zelar pela qualidade do ambiente que nos rodeia, preservando o que ainda está intacto, remediando os erros do passado e garantindo, tanto quanto possível, alternativas ainda que locais à sobredependência que actualmente se vive dos combustíveis fósseis.

6. Referências bibliográficas

- ACavaco (1982) – Estudo hidrogeológico das nascentes minerais de Monção. Plano de trabalhos.
- Almeida, C., Mendonça, J. J., Jesus, M. R. and Gomes, A. J. (2000) – Sistemas aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia da FCUL / Instituto da Água. Lisboa, 649p.
- Almeida, L. C. (1992) – Prospecção geotérmica – Determinação de gradientes geotérmicos em furos de sonda. *Boletim Informativo do INMG*.
- Almeida, L. C. (1993) – Prospecção geotérmica – Cálculo de condutividades térmicas em amostras de rochas. *Boletim Informativo do INMG*. 7p.
- Amaral, H., Fernandes, H., Berg, M., Schwarzenbach, R. e Kipfer, R. (2009) – Assessing TNT and DNT groundwater contamination by compound-specific isotope analysis and 3H – 3He groundwater dating: A case study in Portugal. *Chemosphere*, n.77, pp.805-812.
- Antunes, M. T., Elderfield, H., Legoinha, P., Nascimento, A. e Pais, J. (1999) – A stratigraphic framework for the Miocene from the Lower Tagus Basin (Lisbon, Setúbal Peninsula, Portugal). Depositional sequences, biostratigraphy and isotopic ages. *Bol. Soc. Geol. España*, Madrid, v.12(1), pp.3-15.
- Antunes, M. T., Legoinha, P., Cunha, P. e Pais, J. (2000) – High resolution stratigraphy and Miocene facies correlation in Lisbon and Setúbal Peninsula (Lower Tagus Basin, Portugal). *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, nº 14, pp.183-190.
- Archie, G. E. (1942) – The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers/Petroleum Division*, nº 146, pp.54-62.
- Bahaa-eldin, E., Rahim A., Yusoff, I., Samsudin, A. R. e Yaacob, W. Z. W. & Rafek, A. G. M. (2010) – Deterioration of groundwater quality in the vicinity of an active open-tipping site in West Malaysia. *Hydrogeology Journal*, n.18, n.4, pp.997–1006.
- Baron, L. e Chappelier, D. (1998) – Nuclear well logging in soils calibration of slim hole nuclear tools gamma-gamma and neutron-thermal neutron. *Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section)*, Barcelona, pp.275-278.
- Basham, I. R., Vairinho, M. M. B. e Bowles, J. F. W. (1982) – Uranium bearing accessory minerals in the S. Pedro do Sul Granite, Portugal. *Vein-Type and Similar Uranium Deposits in Rocks Younger than Proterozoic*. Proc. Tech. Comm. Meet., Lisbon, pp. 279-298.

- Batista, M. J., Torres, L., Leote, J., Prazeres, C., Saraiva, J. e Carvalho J. (in press) – *Carta de Taxa de Exposição Natural à escala 1:500.000*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Batista, M.J., Figueiredo, M. O., Silva T., Costa, A., Lourenço, C., Midões C., Ramalho, E., Solá R., Prazeres C., Fernandes J., Ferreira, M. L., Leote, J., Ribeiro L. e Martins, L. (2009) – Caracterização Geoambiental do depósito uranífero de Nisa. Relatório Final. Relatório produzido no âmbito de uma prestação de serviço à empresa EDM. 28p, Anexo I-22p; Anexo II -95p; Anexo III-65p; Anexo IV-15p.
- Batista, M. J., Fernandes, J., Ramalho, E., Quental, L., Dias, R., Milisse, D., Manhiça, V., Ussene, U., Cune, G., Daudi, E. X. e Oliveira, J. T. (2011) – Geochemical characterization of soils and sediments of the city of Beira, Mozambique: a preliminary approach. In: *Mapping the Chemical Environment of Urban Areas*. Christopher Johnson, Alecos Demetriades, Juan Locutura and Rolf Tore Ottesen, John Wiley & Sons, Eds., 584p.
- Bayó Dalmau, A. (1988) – Otros registros usuales para aguas subterráneas. Aguas subterráneas: Instrumentacion, Medida y toma de muestras. Prensa XXI S.A. – Barcelona.
- Bear (1972) – *Dynamics of Fluid in Porous Media*. Elsevier.
- Beck, A. E. (1981) – *Physical principles of exploration methods*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Beck, A. E. e Balling, N. (1988) – Determination of virgin rock temperatures. In: Haenel, R. Rybach, L. and Stegena (Editors), *Handbook of Terrestrial Heat Flow*, Chapter 3, Solid Earth Sciences Library, Kluwer Academic Publishers.
- Benson, C. R., Glaccum, A. R. e Noel, R. M. (1982) – *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*. Technos, Inc., 236 pp.
- Bernardes, L. (2010) – Hidratos de CO₂ como estratégia de mitigação das alterações climáticas: definição de zonas de estabilidade no deep *offshore* de Portugal Continental. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade de Évora. 120p.
- Camelo, S. M. (1987a) – Analysis of bottom-hole temperature and preliminary estimation of heat flow in Portuguese sedimentary basins. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.5, pp.139-142.
- Camelo, S. M. (1987b) – Fluxo de calor terrestre de Portugal Continental. Relatório Interno do INMG.
- Carman P.C. (1937) – Fluid flow through granular beds. *Transactions, Institution of Chemical Engineers, London*, nº 15, pp.150-166.
- Carman, P. C. (1956) – *Flow of Gases Through Porous Media*. Butterworths.
- Carpenter, P.J., Ding, A., Cheng, L., Liu, P. e Chu, F. (2009) – Apparent formation factor for leachate-saturated waste and sediments: examples from the USA and China. *Journal of Earth Science*, v. 20, n. 3, pp.606-617, DOI 10.1007/s12583-009-0050-7.
- Carreira, P. M., Marques, J. M., Monteiro Santos, F. A., Andrade, M., Matias, H., Luzio, R. e Nunes, D. (2005) – Role of geophysics, geochemistry and environmental isotopes in the assessment of Caldas de Monção low-temperature geothermal system (Portugal). *Geothermal Resources Council Transactions*, V. 29, pp.209-213.
- Carvalho Dill, A., Müller, I., Costa, A. M. e Monteiro, J.P. (1998) – Importância do uso de métodos geofísicos electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e Radio Magnetotelluric – Resistivity (RMT-R) no estudo de aquíferos cársicos do Alentejo e do Algarve, 4º Congresso da Água, Lisboa.
- Carvalho, J. M. (1996) – Mineral water exploration at the Portuguese Hercynian Massif. *Environmental Geology*. v.27, pp.252-258.
- Carvalho, J. M. (2006) – *Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 292p.
- Carvalho, J., Ramalho, E. C. e Barbosa, S. (2005) – Using geophysical methods to identify alteration zones in an abandoned mining site. *Journal of the Balkan Society*, v. 8, Sup. 1, pp.459-463. ISSN-1302-1672.
- Carvalho, L. (2004) – *Potential of borehole systems in Portugal*. MsC Thesis, Luleå Tekniska Universitet. 38p+annexes.
- Cermak, V. e Rybach, L. (1982) – Thermal conductivity and specific heat of minerals and rock. In: G. Angenheister (Editor), *Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series, Group V*, vol. 16, Springer-Verlag, Berlin.
- Chappelier, D. (1992) – *Well logging in hydrogeology*. A.A. Balkema Publishers, 175p.

- Clavier, C., Coates, G. e Dumanoir, R. (1984) – The theoretical and experimental bases for “dual water” model for the interpretation of shaley sands. *Society of Petroleum Engineering Journal*, nº 4, pp.153–168.
- COLOG (1993) – Borehole effects on gamma log response. Technical Notes, v. 1, n.3, pp.1-2.
- Conaway, J. (1987) – Temperature logging as an aid to understanding groundwater flow in boreholes. Paper F MGLS, pp.51-59.
- Condesso Melo, M. T., Fernandes, J., Neves, C., Miraldo Ordens, C., Barreiras, N., Vandenbohede, A., Amaral, H., Ramalho, E., Batista, M. J., Gonçalves, C., Almeida, J. A., Quental, P., Brito, G., Viana, P., Gama, A. C., André, S., Silva, E., Grangeia, C., Senos Matias, M., Inácio, M., Marques da Silva, M., Patinha, C., Khalil M., Monteiro Santos F., Danko, A. e Sá Pereira P. (2012) – Aplicação de uma metodologia multidisciplinar para a caracterização da contaminação das águas subterrâneas por contaminantes orgânicos. Resumo apresentado no *11º Congresso da Água*, 2012.
- Correia, A., Duque, R., Maciel, C., Camelo, S., Almeida, L.C. e Mendes-Victor, L. A. (1982) – Primeiras determinações do fluxo de calor em Portugal. *INMG, Boletim Informativo*, nº56, pp.3-13.
- Correia, A., Mendes-Victor, L. e Espírito Santo, V. (1988) – Portuguese Contribution for the Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. Haenel, R. and Staroste, E. (Eds) *Verlag Th. Schaefer, Hannover*. 74p. 110 plates.
- Correia, A. (1994) – A magnetotelluric study in the region of the intersection of the Messejana Fault and the Ferreira-Ficalho Overthrust in Portugal. University of Alberta. PhD Thesis. 345p.
- Correia, A. (1995) – Determinação da produção de calor em amostras rochosas. Aplicação a amostras portuguesas, *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, Tomo 81, pp.39-46.
- Correia, A. e Jones, F.W. (1997) – On the existence of a geothermal anomaly in southern Portugal, *Tectonophysics*, 271, 123-134.
- Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – New heat flow density determinations in Southern Portugal: a geothermal anomaly revisited. *Tectonophysics*, nº 291, pp.55-62.
- Correia, A. e Ramalho, E. C. (2005) – Updated surface heat flow density map in Mainland Portugal. CD dos *Proceedings of the World Geothermal Congress, 2005*, Antalya, Turquia. 5p.
- Correia, A. e Ramalho, E. C. (2009) – Heat flow density estimations in the Portugueses Northern Hercynian Massif using silica geothermometry. *Transactions Geothermal Resources Council Annual Meeting 2009*.
- Correia, A. e Ramalho, E. C. (2010) – Update heat flow density Map for Portugal. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonésia.
- Correia, A., Jones, F.W., Dawes, G.K. e Hutton, V.R.S. (1993) – A magneto-telluric deep crustal study in south-central Portugal, *Studia Geophysica et Geodaetica*, n. 37, pp.331-344.
- Correia, A., Ramalho, E. C., Lourenço, M. C. e Cruz, J. (1997) – Thermal investigation in S. Pedro do Sul low enthalpy geothermal field (Portugal). *Proceedings of the Geothermal Resources Council 1997 Annual Meeting*, Outubro, S. Francisco. *Transactions*, v. 21, pp.165-170.
- Correia, A., Ramalho, E., Rodrigues da Silva, A. M., Mendes-Victor, L. M., Duque, M. R., Aires-Barros, L., Santos, F.M. e Aumento, F. (2002) – Portugal – In: *Atlas of Geothermal Resources in Europe* (Eds: Suzanne Hurter and Ralph Haenel), GGA, Hannover, Germany. 92p., 89 plates. pp.47-49. ISBN92-828-0999-4.
- Costa, C., Dill, A., Costa, A., Fernandes, J., Sampaio, J., Ramalho, E., Rocha, R., Castro, R., Lopes, M., Avillez, G., Curto, P. e Riscado, J. (2002) – Estudo geológico e hidrogeológico para o controlo dos lixiviados da Lixeira de Gaeiras. *Relatório para a Resioeste efectuado por IGM, CIGA/UNL, AMBIOPOLIS*. 82p. + anexos.
- Costa, J. B. (1985) – *Caracterização e constituição do solo*. Fundação Calouste Gulbenkian, 3ª ed. 527p.
- Crowder, R., Paillet, F. e Hess, A. (1994) – High resolution flowmeter logging – a unique combination of borehole geophysics and hydraulics; Part I: Flowmeter techniques and equipment development. *Proceedings of the 1994 EEGS*, pp.361-380.
- Cruz, J. F., Lourenço, M. C., Rodrigues da Silva, A. M., Ramalho, E. C. e Correia A. (1996) – Breve caracterização das ocorrências termais com temperatura superior a 20°C em Portugal Continental, *Boletim de Minas*, 33 (2), pp.129-137.

- Cruz, R. J. L., Figueiredo, F. P. O. e Pratas, J. A. M. S. (2006) – Estudo da pluma de contaminação de uma antiga lixeira pelo método electromagnético de prospecção – Lixeira de Vila Moreira, Alcanena. *VII Congresso Nacional de Geologia*, pp.339-342.
- Custodio, E. e Llamas, M.R. (1996) – *Hidrología Subterranea*, 2nd edn. Publicaciones Omega.
- Departamento de Geociências (1991) – Estudo Hidrogeológico da área entre Nisa e Monte Claro. *Universidade de Aveiro*, 74p+anexos.
- Dias, R., Oliveira, J. T., Milisse, D., Ussene U. V. (2011) – Carta Geológica da Região da Grande Beira, Moçambique, escala 1:50.000 e Notícia Explicativa. *Versão em formato digital*.
- Dias, R., Oliveira, J. T., Ramalho, E. C., Batista, M. J., Fernandes, J., Quental, L., Milisse, D., Manhiça, V., Ussene, U., Cune, G. e Daudi, E. X. (2010) – Cartografia Geológica e Geoambiental da Beira, Moçambique, à escala 1:50000 – resultados preliminares. *Congresso Nacional de Geologia 2010*. 4p.
- Direcção Geral de Geologia e Minas (1982) – Relatório do furo SDFA-1. *Relatório não publicado*.
- Doveton, J. H. (1994) – *Geologic log interpretation*. SEPM Short Course nº 29, 169p.
- Dowdle, W. C. e Cobb, W. M. (1975) – Static formation temperature from well logs - an empirical method. *Journal of Petroleum Technologies*. nº27, pp.1326-1330.
- Drury, M. J., Jessop, A. M. e Lewis, T. J. (1984) – The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes. *Geothermics*, v. 13, nº 3, pp.163-174.
- Duque, M. R. (1987) – Geothermal heat flow anomalies caused by thermal conductivity contrast. *Revista Brasileira de Geofísica*. v.5, pp.111-115.
- Duque, M. R. (1991) – *Contribuição do fluxo de calor para a caracterização da litosfera na região do Alentejo*. Tese de Doutoramento. Universidade de Évora, 130p.
- Duque, R. e Mendes-Victor, L. A. (1993) – Heat flow and deep temperature in South Portugal. *Studia Geoph. et Geod.* v.37, pp.279-292.
- Duque, M. R., Santos, F. M. and Mendes Victor, L. (1998) – Heat Flow and deep temperatures in the Chaves Geothermal System, Northern Portugal. *Geothermics*, 27, 1, 75-87.
- Ellis, D. V. (1987) – *Well Logging for Earth Scientists*. Elsevier.
- Exmin (2000-2001) – Estudo director de áreas mineiras radioactivas, 1ª fase. *Relatório Interno da Exmin*.
- Exmin (2002-2003) – Estudo director de áreas mineiras radioactivas, 2ª fase. *Relatório Interno da Exmin*.
- Fernandes, J., Batista, M. J., Ramalho, E., Quental, L., Dias, R., Oliveira, T., Cune, G., Daudi, E., Milisse, D., Ussene, U and Manhiça, V. (2010) – Utilização de metodologias integradas na produção da Carta Geoambiental da cidade da Beira, Moçambique. *10º Congresso da Água*, Faro.
- Fernandes, J., Ramalho, E., Batista, M. J., Dias, R., Oliveira, J. T., Quental, L., Daudi, E. X., Milisse, D., Cune, G., Ussene, U. e Manhiça, V. (2012) – Metodologias para Cartografar Águas Salgadas e Salobras Aprisionadas em Formações Geológicas da Beira, Moçambique. *Actas do 11º Congresso da Água: valorizar a água num contexto de incerteza*. APRH, Porto, 6 a 8 de Fevereiro de 2012, 369 p.
- Fernandéz, M., Almeida, C. e Cabal, J. (1995) – Heat flow and heat production in Western Iberia. *Proceedings of World Geothermal Congress'95*, v. 2, pp. 745-749.
- Fernandéz, M., Marzan, I., Correia, A. e Ramalho, E. C. (1998) – Heat flow and lithospheric regime in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, nº 291, pp.29-53.
- Ferreira Gomes, L. M. (2005) – As águas minerais termais. Desafios sobre as suas aplicações para o futuro. *XV Encontro Nacional de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros*, Ponta Delgada, pp.187-205.
- Ferreira Gomes, L.M., Mendes, E., Almeida Soeiro, C.N.M. e Sousa Oliveira A. (2008) – Sondagens de Prospecção Mecânica com objectivo à classificação de uma nova Água Mineral Termal em Penamacor. *Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*, pp.64-72.
- Figueiras, J., Mateus, A., Marques, F. O., Gonçalves, M., Monteiro Santos, F. A. e Mota, R. (2009) – Initial stages of pollutants dispersion around municipal waste disposal facilities; a case study in northern Portugal. *Journal of Environment and Waste and Management*. Vol. 4, No.3/4, pp.341-365.

- Figueiredo, F.P.O., Barreira, C., Dinis, P.A., Catarino, L., Azevedo, J.M. (2011) – Aplicação do método electromagnético de prospecção no estudo de plumas de contaminação associadas a cemitérios. Caso de estudo do cemitério da Ega, Condeixa-a-Nova. *Proceedings do 8º Seminário sobre Águas Subterrâneas*. Lisboa. 5p.
- Förster, A. e Merriam, D. F. (1999) – *Geothermics in basin analysis*. Springer, 241p.
- Frohlich, R. K., Urish, D. W., Fuller, J. e Reilly M. O. (1994) – Use of geoelectrical method in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics*, V.32, pp.139-154.
- Geonics Ltd. (1990) – *EM34-3 and EM34-3XL Operating Instructions*.
- Geosonda (2001) – *Trabalhos de Prospecção Geofísica para a implantação de furos de captação de água termo-mineral*. 9p. + anexos.
- Geosurveys (2012) – Comunicação pessoal.
- Gomes da Costa, T. e Ferreira Gomes, L. (2011) – Elementos sobre a construção de uma captação profunda no maciço granítico de Santa Comba Dão. *Actas do 11º Congresso da Água*. 12p.
- Gonçalves, C. (1966) – Prospecção Géophysique à Nisa. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, separata do Tomo L, pp.131-144.
- Gonçalves, R. (1999) – Prospecção geolétrica na Bacia da Ribeira da Chaminé (Beja). *Relatório Interno do IGM para o projecto ERHSA*, 22p.
- Gonçalves, C. S. M. (2011) – *Implementação do método analítico para a determinação de compostos poli-nitroaromáticos (explosivos) em solos e águas – aplicação a um caso de estudo do Seixal*. Tese de Mestrado, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia. 71p.
- Greenwood, W. J., Kruse S. e Swarzenski, P. (2006) – Extending electromagnetic methods to map coastal pore water salinities. *Groundwater*, v.44, nº2 pp.292-299.
- Gretner, P. F. (1967) – On the thermal stability of large wells – an observational report. *Geophysics*, v. 32, pp.727-738.
- 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. e Wheildon (1980) – *Atlas of Subsurface Temperature in the European Community*, Th. Schafer Druckerei GmbH, Hannover, 36p., 43 maps.
- Haenel, R., Rybach, L. e Stegena, L. (1988) – *Handbook of terrestrial heat flow determination: with guidelines and recommendations of the International Heat Flow Commission*. Springer, 486p.
- Haenel, R. e Staroste (1988) – *Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland*, E. Verlag Th. Schaefer, Hannover. 74p, 110 plates.
- Hermozilha, H., Grangeia, C. e Senos Matias, M. (2010) – An integrated 3D constant offset GPR and resistivity survey on a sealed landfill — Ílhavo, NW, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, v.70, nº 1, pp-58-71.
- Howard, K. W. (1990) – Geophysical well logging methods for the detection and characterization of fractures in hard rocks. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Stanley H. Ward Ed., IG v.5, nº 1: Review and Tutorial, pp.287-306.
- <http://www.dct.uminho.pt/mictic/intro.html> (2012)
- <http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/dossiers> (2012)
- Hurter S. Haenel, R. (2002) – *Atlas of Geothermal Resources in Europe*. Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. GGA, Hannover, Germany. 92p., 89 plates. pp.47-49. ISBN92-828-0999-4.
- Hurter, S. e Schellschmidt, R. (2003) – Atlas of Geothermal Resources in Europe. *Geothermics*, V.32, nº 4–6, pp.779–787.
- Hurtig, E., Cermak, V., Haenel, R. e Zui, V. (1992) – Geothermal Atlas of Europe. Hermann Haack, Potsdam, 155p.
- IHFD Commission (2012) – <http://www.geophysik.rwth-aachen.de/IHFC/heatflow.html>, em 05/07/2012
- Jessop, A. M. (1990) – *Thermal Geophysics. Developments in solid Earth Geophysics*. Elsevier. 306p.
- Kappelmeyer, O. e Haenel, R. (1974) – *Geothermics with special reference to application*. Geoexploration Monographs, Series 1, 4251p.

- Keys, W. S. (1990) – *Borehole geophysics applied to groundwater investigations*. Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey, book 2, chapter E2, 150p.
- Keys, W. S. e MacCary, L. M. (1971) – Application of Borehole Geophysics to Water Resources Investigations. *Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Book 2, Collection of Environmental Data, US Geological Survey, Chapter E1, 124p.
- Keys, W. S., Crowder, R. E. e Heinrich, W. J. (1993) – Selecting geophysical logs for environmental applications. *7th National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Groundwater Monitoring and Geophysical Methods*, Nevada, USA.
- Khalil, M. A., Hafez, M. A, Monteiro Santos, F., Ramalho, E. C., Mesbah, H. S. e El-Gady, G. M. (2010) – An approach to estimate porosity and groundwater salinity of shallow aquifers by combined application of GPR and VES: a case study in the Nubian sandstone aquifer. *Journal of Near-Surface Geophysics*, v.8, n. 3, pp.223-233.
- Khalil, M., Ramalho, E. C. e Monteiro Santos (2011) – Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of Nubian Sandstone aquifer in southern Egypt. *Journal of Near Surface Geophysics*, v. 9, nº 4, pp.349-355.
- Kozeny J. (1927) – Ueber kapillare Leitung des wassers in Böden. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, nº 136, pp.271-306.
- Kwader T. (1986) – Use of geophysical logs for determining formation water quality. *Groundwater*, nº 24, pp.11-15.
- Leblanc, Y., Pascoe, L. J. e Jones, F. W. (1981) – The temperature stabilization of a borehole. *Geophysics*, v. 46, nº 9, pp.1301-1303.
- Lemos, L. S., Moreira, A. D., Nolasco Silva, M. C., Pires, M. R. e Sousa, P. O. (1992) – Contribuição para a investigação do campo geotérmico de S. Pedro do Sul. *Estudos, Notas e Trabalhos*, D.G.G.M., t. 34, pp.107-138.
- Lopes M., Avillez, G., Costa, C. e Almeida, J. A. (2006) – Groundwater contamination plume monitoring in sealed waste dumps. *Engineering Geology*, v.85, nºs 1-2, pp.62-66.
- Lourenço, C. M. e Cruz, J. (2005) – Aproveitamentos geotérmicos em Portugal Continental. *XV Encontro Nacional do Colégio Nacional de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros*, Ponta Delgada, 9p.
- Lund, J. (2007) – Characteristics, Development and utilization of geothermal resources", *Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin* (Klamath Falls, Oregon: Oregon Institute of Technology), v. 28, v. (2), pp.1–9, ISSN 0276-1084, <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull28-2/art1.pdf>.
- Machado, M. J. C. (1994) – Aplicabilidade dos geotermómetros químicos na determinação da temperatura dos reservatórios das águas gasocarbónicas. *Estudos, Notas e Trabalhos do IGM*, v.36, pp.43-52.
- Marques da Silva, M. (1990) – *Hidrogeologia del sistema multiaquifero Cretácico del Bajo Vouga*. Tesis Doctoral. Univ. Barcelona. 436p.
- Marques da Silva, M. (1992) – Camadas-guia do Cretácico de Aveiro e sua importância hidrogeológica. *Geociências*,v.7, pp.111-124.
- Marques da Silva, M., Ramalho, E. C. e Melo, M. T. (2000) – The use of electrical logs to predict groundwater quality in multilayered aquifers. *Actualidad de las Técnicas Geofísicas Aplicadas en Hidrogeología*. Eds: M. Olmo Alarcón e J.ª Lopes Geta. pp.287-293.
- Marques, F. O., Mateus, A., Gonçalves, M. A., Figueiras, J., Monteiro Santos, F. A., R. e Mota, Amaral, H. (2005) – The effectiveness of “clay” liners as basal isolation of landfills: A case study. *Environmental Geology*, v.47, pp.1128-1137.
- Marrero Diaz, R. (2012) – Comunicação pessoal.
- Martinho, E. (2003) – *Estudo integrado de problemas ambientais por métodos geofísicos*. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, 269p.
- Martinho, E. e Almeida, F. (2006) – 3D behavior of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal. *Environmental Geology*, 49, pp.1071–1078.
- Monteiro Santos F. A., Almeida, E. P., Castro, R., Nolasco, R. e Mendes-Victor, L. (2002) – A hydrogeological investigation using EM34 and SP surveys. *Earth, Planets and Space*, V. 54, pp. 655-662.
- Monteiro Santos, F. A. (2004) – 1-D laterally constrained inversion of EM-34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*, nº56, pp.123-134.

- Monteiro Santos, F. A. (2006) – Instructions for running EM34-2D and EM34-3D. V.1.0.
- Mota, R. (2006) – Prospecção geofísica pelo método da resistividade eléctrica, no âmbito do projecto Gabardine, em Conceição, Faro. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Nota Técnica 6/2006 – NGE/DG (Núcleo de Geologia de Engenharia), 20p.
- Mota, R. (2008) – *Metodologias de prospecção geofísica aplicadas a problemas ambientais e geotécnicos. Aplicação conjunta de métodos eléctricos e sísmicos*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 190p.
- Müller, I. e Carvalho Dill, A. (1996) – Advances on electromagnetic prospecting to survey shallow aquifers and contaminated sites. *Proceedings of the International Congress on Environment/Climate*, Rome, March 4-8.
- Nazari, A., Salarirad, M. M. e Bazzazi, A. A. (2011) – Landfill site selection by decision-making tools based on fuzzy multi-attribute decision-making method. *Environmental Earth Sciences*. DOI 10.1007/s12665-011-1137-2
- Oliveira, J. P. L. (2009) – *Caracterização da pluma de contaminação numa antiga lixeira com o método da resistividade eléctrica*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 64p.
- Oliveira, J. T., Dias, R., Milisse, D., Ramalho, E., Quental, L., Fernandes, J., Batista, M. J., Daudi, E., Ussene U., com a colaboração de Nave, S., Rebelo, L., Cune, G., Manhiça, V., Balate, G. (2011) – Projecto: Carta Geológica e Geoambiental da Região da Grande Beira, Moçambique, escala 1:50000. Relatório Final, Vols. II, III.
- Paillet, F., Crowder, R. e Hess, A. (1994) – High resolution flowmeter logging – a unique combination of borehole geophysics and hydraulics; Part II: Borehole applications with the heat pulse flowmeter. *Proceedings of the 1994 EEGS*.
- Pais, J., Lopes, C. S., Legoinha, P., Ramalho, E., Ferreira, J., Ribeiro, I., Amado, A. R., Sousa, L., Torres, L., Baptista, R. e Pena dos Reis, R. (2002) – The Belverde Borehole (Lower Tagus Basin, Setúbal Península, Portugal). Livro de Resumos das XVIII Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología, II Congreso Ibérico de Paleontología, Salamanca, 24-29 de Setembro de 2002, pp.198-199.
- Paralta, E. (2001) – *Hidrogeologia e Modelação Estocástica da Contaminação por Nitratos do Aquífero Gabro-diorítico da Região de Beja*. Tese de Mestrado em Georrecursos, IST. 157p.
- Patnode W.H. e Wyllie M.R.J. (1950) – The presence of conductive solids in reservoir rocks as factor in electric log interpretation. *Petroleum Transactions American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, nº 189, pp.47-52.
- Pereira P., e Lima, O. A. L. (2007) – Estrutura eléctrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curtime no município de Alagoinhas, Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, nº 25, v.1, pp.5–19.
- Pereira, E. e Ferreira, N. (1985) – Geologia e controlo regional das nascentes termais de S. Pedro do Sul. *Com. Serv. Geol. Portugal*, t. 71, fasc. 1, pp.17-25.
- PERSU (1997) – *Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU)*, Ministério do Ambiente, 146p.
- Prol-Ledesma, R. M. e Juarez, G. (1986) – Geothermal Map of Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.28, pp.351-362.
- Quental L., Ramalho, E., Daudi, E., Batista, M. J., Fernandes, J., Milisse, D., Dias, R. e Oliveira, J. T. (2011) – Carta Geoambiental da Região da Grande Beira. *Versão em formato digital*.
- Ramalho, E. C. (1996) – Relatório final do Projecto nº JOU2-CT93-0298, "Atlas de Recursos Geotérmicos da Europa" (DRHG, Dezembro). *Relatório interno do IGM no âmbito do Projecto Atlas de Recursos Geotérmicos da Europa*.
- Ramalho, E. C. (1998) – Relatório das diagrfias efectuadas no furo SDH1-Beja (DG, Novembro de 1998). *Relatório interno no âmbito do Projecto ERHSA*, 10p.
- 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, pp.1.41-1.44.
- Ramalho, E. C. (2000a) – Relatório das diagrfias efectuadas na sondagem SDH2-Santo António das Paredes (Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do-Chão). *Relatório interno no âmbito do Projecto ERHSA*, 11p.
- Ramalho, E. C. (2000b) – Relatório das diagrfias efectuadas na sondagem SDH3-Lobata (Área de Beja-Serpa). *Relatório interno no âmbito do Projecto ERHSA*, 12p.

- Ramalho, E. C. (2000c) – Relatório das diagrfias efectuadas na sondagem SDH1-Azinhal (Sistema Aquífero de Monforte-Alter-do-Chão). *Relatório interno no âmbito do Projecto ERHSA*, 13p.
- Ramalho, E. C. (2000d) – Relatório das diagrfias efectuadas no furo SDH-7 (Sistema Aquífero do Anticlinal de Estremoz). *Relatório interno no âmbito do Projecto ERHSA*, 10p.
- Ramalho, E. C. (2000e) – Relatório das diagrfias efectuadas na sondagem SDH4-Monte Peixoto (Particular) (Área de Beja-Serpa). *Relatório interno no âmbito do Projecto ERHSA*, 10p.
- Ramalho, E. C. (2003) – Relatório das diagrfias efectuadas no furo LS-1 (Montemor-o-Velho). *Prestação de serviços para Leirisonda*. 9p.
- Ramalho, E. C. (2007) – Electromagnetics EM-34 – Data processing from the Ribeira da Chaminé Basin area (Beja). *INETI Internal Report*, 19p.
- Ramalho, E. C., Marques da Silva, M. A., Senos Matias, M. J. e Valente, M. V. (1998) – Diagnóstico e recuperação ambiental da zona envolvente da Lixeira de Maceda (Ovar). *Actas do V Congresso Nacional de Geologia*, Fasc. 2, pp.E-78-E-81.
- Ramalho, E. C. e Correia, A. (1998) – General overview of geothermal characteristics in Mainland Portugal. *Actas of the Geothermal Resources Council 1998 Annual Meeting, Outubro, San Diego. Transactions, Vol. 22*, pp.89-93.
- Ramalho, E. C., Paralta, E. e Torres, L. (2000) – Electrical, nuclear and fluid column logging as preliminary contribution to the hidrogeological characterization of Serpa and Beja areas (Portugal). *Actualidad de las Tecnicas Geofísicas Aplicadas en Hidrogeología*. Eds. M. Olmo Alarcon and J. A. Lopez Geta. pp.279-285.
- Ramalho, E. C., Gonçalves, R., Nogueira, A., Torres, L. e Peneda, C. (2002) – Use of geoelectrical methods to evaluate industrial contamination, near Setúbal, Portugal. *Proceedings do VIII Environmental and Engineering Geophysics ES Meeting, Aveiro, 3-8 de Setembro*, pp. 367-370.
- Ramalho, E. C. e Correia, A. (2006) – Contributo para a caracterização térmica em Portugal Continental – Análise e processamento de dados geotérmicos compilados até 1996. *Relatório Interno do INETI*. 31p.
- Ramalho, E. C., Marques da Silva, M. e Correia, A. (2009) – *Diagrfias Aplicadas à Hidrogeologia*. Editora Palimage. 282p.
- Ramalho, E., Carvalho, J., Barbosa, S. and Monteiro Santos, F. A. (2009b) – Using geophysical methods to assess geoenvironmental impacts in the Quinta do Bispo abandoned uranium mining site, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, nº67, pp.14-33.
- Ramalho, E. C., Santana, H., de Oliveira, D., Henriques, P. e Falé, P. (2010) – Aplicação multimédia na temática dos Recursos Minerais para a diversificação de estratégias de desenvolvimento de competências no ensino básico. *Revista Electrónica de Ciências da Terra Geosciences On-line Journal*, 4p.
- Ramalho, E. C., Carvalho Dill, A. e Rocha, R. (2012a) – Assessment of the leachate movement in a sealed landfill using geophysical methods. *Environmental and Earth Science*. DOI: 10.1007/s12665-012-1742-8.
- Ramalho, E. C., Midões, C., Lourenço, M. C., Costa, A. and Monteiro Santos, F. A. (2012b) – Environmental assessment of an uranium experimental rock blasting in Portugal, using geophysical and hidrogeological methods. *Journal of Geophysics and Engineering*, nº9, pp.433-446.
- Ramalho, E. C., Carvalho, J. P., Gonçalves, R. e Monteiro Santos, F. A. (2012c) – Understanding the 3D structure of a thermal water fissured granite aquifer with geophysical studies. *Pure and Applied Geophysics*, nº 169, pp.2031-2046.
- Ramalho, E. C., Carvalho, J., Barbosa, S. e Monteiro Santos F. (2012d) – Geophysical Studies to Evaluate Geological and Hydrogeological Features in Old Uranium Mines. Chapter in: *Uranium: Characteristics, Occurrence and Human Exposure*. Novapublishers Editors.
- Reynolds, J. M. (1997) – *An introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, 796p.
- Ribeiro, I., Ramalho, E., Torres, L. e Pais, J. (2003) – Sondagem de Belverde (Cenozoico, Península de Setúbal, Portugal) – Diagrfias. *Ciências da Terra*, nº15, pp.219-230.

- Ribeiro, O., Teixeira, C., Carvalho, H., Peres, A. e Fernandes, A. P. (1965) – Notícia explicativa da folha 28-B da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50.000. Serviços Geológicos de Portugal, 29p.
- Rocha, R. (2001) – *Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Área dos Barros de Beja; Parâmetros Hidrogeofísicos*. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa. 134p.
- Rocha, R., Ramalho, E. e Andrade Afonso A. (2003) – Estimativa de porosidades em rochas básicas a partir de diagrfias eléctricas e nucleares através de dois métodos - um estudo comparativo. Universidade Nova de Lisboa, *Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº esp. V, CD-ROM*, pp.E50-E53.
- Rosa, J. e Pinto, V. (2010) – Criação e implementação de um Manual Digital Multimédia no ensino dos recursos hidrológicos – Estudo de caso com alunos de Geologia do 12º ano. *Revista Electrónica de Ciências da Terra Geosciences On-line Journal*, 4p.
- Roseiro, C. M. S. D. (2009) – Recarga artificial de aquíferos: aplicação ao sistema aquífero da Campina de Faro. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 272p.
- Rybach, L. (1976) – Radioactive heat production in rocks and its relation to other physical parameters. *Pure and Applied Geophysics*, V. 114, pp.309-318.
- Rybach, L. (1988) – Determination of heat production rate. In: Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L. (Eds.), *Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination*. Kluwer, Dordrecht, pp.125-141.
- Rybach, L. e Cermak, V. (1982) – Radioactive heat generation in rocks. In: G. Angenheister (Editor), *Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series, Group V, vol. 1a*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 353-371.
- Saraiva, J., Torres, L. M. e Leote do Rego, J. (1997) – Aplicações da cartografia radiométrica na protecção ambiental e na prospecção de recursos. *Actas da 1ª Asambleia Luso-Espanhola de Geodesia y Geofísica*, Almeria, Espanha, S07-20, 5p.
- Schlumberger (1972) – *Log Interpretation*. Volume I – Principles. 111p.
- Schlumberger (1982) – Well evaluation developments. *Ed. Schumberger - Paris*.
- Sen P. N., Goode P. A. e Sibbit A. (1988) – Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. *Journal of Applied Physics*, nº63, pp.4832-4840.
- Senos Matias, M., Hermosilha, H., Ramalho, E. C., Costa, A., Pereira, A. P. e Santos, R. (2007) – Hydrogeophysical survey in a hydrocarbon contaminated site. *Proceedings of Near Surface Geophysics 2007*, Istambul. 4p.
- Senos Matias, M. (2001) – Geofísica aplicada ao ambiente: objectivos, âmbito e alguns exemplos. *Comunicações do Instituto Geológico Mineiro*, t. 88, pp.223-236.
- Senos Matias, M. J., Marques da Silva, M. A., Ferreira P. L. e Ramalho E. C. (1994) – A geophysical and hidrogeological study of aquifers contamination by a landfill. *Journal of Applied Geophysics*, nº32, pp.155-162.
- Senos Matias, M., Marques da Silva, M., Cabral, B. e Tareco H. (2000) – An EM and GPR survey to study and monitor aquifers contamination by a landfill. *European Association of Geoscientists and Engineers*, Glasgow, England. Extended Abstracts V. 2, P106, ISBN 90-73781-12-4.
- Senos Matias, M., Marques da Silva, M., Ramalho, E. C., Matos, J. e Teixeira, F. (1999) – De volta à Lixeira de Ovar. *Actas do 6º Congresso Nacional da Qualidade do Ambiente*, Costa da Caparica, FCT-UNL, 20-22 de Outubro de 1999, V. 3, pp.143-152.
- Sharma, P. V. (1997) – *Environmental and Engineering Geophysics*, Cambridge University Press, 475p.
- Shell Prospex Portuguesa (1974) – Geothermal gradient. *Relatório inédito oferecido por João Pacheco ao LNEG*. Arquivo do LNEG.
- Shon, J. H. (1996) – Physical properties of Rocks – Fundamentals and Principles of Geophysics. *Handbook of Geophysical Exploration – Seismic Exploration*. Klaus Helbig and Sven Treitel (Editors), v. 18. Pergamon, 583p.
- Silva, R. e Fernandes, J. (2010) – Aplicação multimédia “Em Busca dos Fósseis ...” dirigida aos alunos do 3º ciclo. *Revista Electrónica de Ciências da Terra Geosciences On-line Journal*, 4p.
- SNIRH (2012) – http://snirh.pt/snirh/_atlasagua/sistemasaquiferos/mostra_ficha.php?aquif=M12, 14/05/2012.

- Solá, R. (1997) – *Relações Petrogeoquímicas dos Maciços Graníticos do NE Alentejano*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal, 405p.
- Sopris Signals (1997) – Estimate Hydrogeologic Parameters with MGXII Loggers. v.3, nº1, pp.1-3.
- Sousa, A. I., Catarino, L. M. G. e Figueiredo, F. P. O. (2010) – Aplicação do método electromagnético de prospecção ao estudo de plumas de contaminação (Lixeira de Tábua-Midões-Portugal). *VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física*, Universidade de Coimbra, 13p.
- Swanberg, C. H. e Morgan, P. (1979) – The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow: a new heat flow map of the United States. *Pure and Applied Geophysics*, v.117, pp.227-241.
- Swanberg, C. H. e Morgan, P. (1980) – The silica heat flow interpretation technique: assumptions and applications. *Journal of Geophysical Research*, n. 85, pp.7206-7214.
- Teixeira, C. (1962) – Notícia Explicativa da Folha 13-C – Ovar. *Serviços Geológicos de Portugal*, 18p.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. e Sheriff, R. E. (1995) – *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. New York. 770p.
- Torres, L. (1997) – *Carta de Taxa de Exposição Natural à escala 1:1.000.000*. Edição não publicada do Instituto Geológico e Mineiro.
- Truesdell, A. H. (1976) – Summary of section III, Geochemical Techniques in exploration. *Proceedings of the 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, Calif. VI, pp.53-79.
- Unidade de Recursos Minerais e Geofísica (2009) – *Geofísica Aplicada aos Recursos e Riscos Geológicos* – Laboratório de Geologia e Minas, LNEG, 18p.
- Venoff, J. A. (1966) – Water quality determination from spontaneous potential electric log curves. *Journal of Hydrology*, nº4, pp.341-347.
- Vitarello, I. e Pollack, H. (1980) – On the variation of continental heat flow with age and the thermal evolution of the continents. *Journal of Geophysical Research*, n. 85, v. B2, pp. 983-995.
- Waxman M. H. e Smits L. J. M. (1968) – Electrical conductivities in oil bearing sands. *Journal of the Society of Petroleum Engineers*, nº8, pp.107–122.
- Winsauer, W. O. e McCardell, W. M (1953) – Ionic double-layer conductivity in reservoir rock. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, nº198, pp.129-134.
- Winsauer, W. O., Shearin Jr, H. M., Masson, P. H. e Williams, H. (1952) – Resistivity of brine saturated sands in relation to pore geometry. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, nº6, pp.253–277.
- Worthington, P. F. (1993) – The uses and abuses of the Archie equations. 1. The formation factor-porosity relationship. *Journal of Applied Geophysics*, nº30, pp.215-228.
- Zbyszewski, G. e Moitinho de Almeida F. (1960) – Notícia Explicativa da Folha 26-D-Caldas da Rainha. *Serviços Geológicos de Portugal*, 57p.