

Avaliação da relação entre a Deposição de Resíduos Inertes na recuperação de uma pedreira e o Estado Qualitativo das Águas Subterrâneas

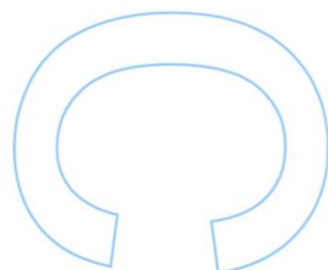
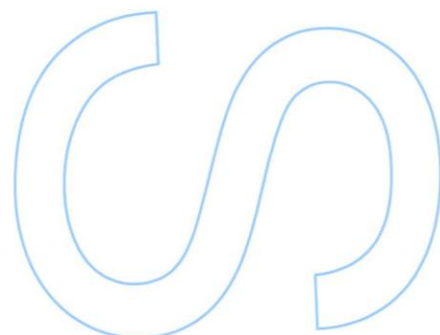
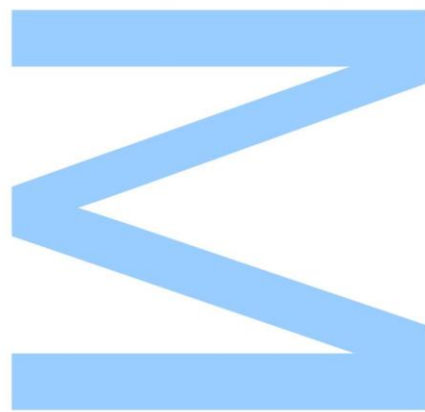
Inês Patrícia Machado Costa

Mestrado em Geologia

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2018

Orientador

Prof. Dr. António José Guerner Dias, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto

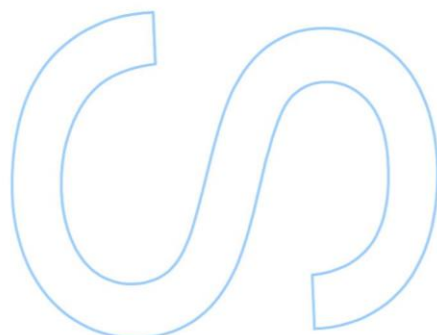
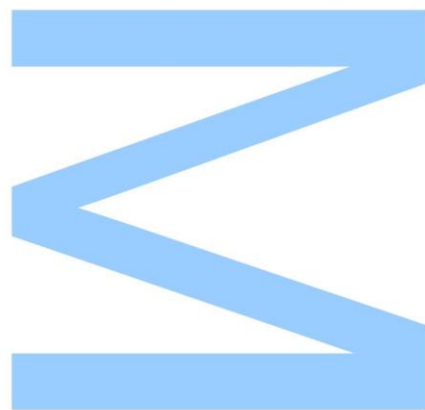




Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

Durante a realização da presente dissertação, contei com o apoio direto ou indireto de múltiplas pessoas, às quais estou profundamente grata. Sem aqueles contributos, esta investigação não teria sido possível.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor António Guerner, Orientador da minha dissertação, por todo o apoio, confiança e acompanhamento durante a realização da dissertação.

Quero agradecer também à Doutora Cândida Neto e ao Renato Guimarães pela disponibilização do material e pela ajuda e apoio na realização do ensaio laboratorial.

Agradeço também aos meus colegas e amigos, em especial à Paula ao André, à Alexandra e à Flávia que estiveram ao meu lado durante esta fase, dando-me apoio, força, paciência e companheirismo.

Por último, tendo consciência que sozinha nada disto teria sido possível, quero agradecer à minha família, especialmente à minha irmã, ao meu pai e à minha mãe, por serem modelos de esforço e dedicação, pelo apoio incondicional, paciência e ajuda na superação de obstáculos, e também ao meu namorado, por ter caminhado ao meu lado, pela sua paciência, compreensão, amizade, e ajuda prestada.

A todos um grande Obrigada!

Inês Costa

Resumo

A área de estudo insere-se na Pedreira da Quinta do Moinho, ou mais comumente designada de Pedreira da Madalena que se situa na freguesia de Canidelo, concelho de Vila Nova de Gaia. Atualmente a pedreira encontra-se na fase de recuperação paisagística, estando a ser reabilitada pelo método do enchimento completo ou parcial, em que os resíduos recebidos estão a ser utilizados para o preenchimento do vazio resultante da escavação. Os resíduos utilizados nesta atividade industrial são classificados como resíduos inertes, contudo se não forem monitorizados, podem gerar, por processos de lixiviação, contaminantes suscetíveis de degradar a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Por isso, torna-se necessário estudar e analisar estes resíduos.

O principal objetivo da presente dissertação consistiu em avaliar solos, provenientes de zonas industriais desativadas, para verificar a sua admissibilidade num aterro para resíduos inertes. Para isso, tendo em conta a situação atual da pedreira da Madalena, nomeadamente as campanhas de monitorização dos recursos hídricos subterrâneos, entre outros aspetos, a metodologia utilizada na presente dissertação compreendeu a execução de um ensaio de lixiviação de acordo com a norma EN12457-2:2002, para obtenção de um eluato que foi, posteriormente, enviado para análise. Os resultados foram obtidos através de análises aos solos e aos eluatos, com o intuito de verificar se os valores obtidos estão dentro dos valores limites estipulados de acordo com as normas e Decretos-Lei e, por sua vez, determinar se os resíduos/solos poderão ser admitidos no aterro para resíduos inertes, de modo a que possam ser depositados na pedreira da Madalena. Foram amostrados três solos, provenientes de três zonas industriais desativadas localizadas no Porto, Braga e São João da Madeira. Os resultados laboratoriais aos solos e aos eluatos, permitiram concluir que o solo do Porto é um resíduo admissível num aterro para resíduos inertes. Por outro lado, o solo de Braga é um resíduo que não pode ser admitido num aterro de resíduos inertes, logo não pode ser depositado na pedreira da Madalena. No caso do solo de São João da Madeira, apesar de ter sido realizado o ensaio de lixiviação, os resultados obtidos não foram conclusivos.

Palavras-chave

Aterro de resíduos inertes, Águas Subterrâneas, Lixiviação, Reabilitação, Recuperação Ambiental, Resíduos de Construção e Demolição.

Abstract

This study concerns the Quinta do Moinho Quarry, generally known as Madalena Quarry, located in Canidelo, Vila Nova de Gaia. Currently, the quarry is at the stage of landscape restoration, being rehabilitated by means of a full or partial filling method, in which the deposited waste is used to fill the hole resulting from the excavation. The waste exploited in this industrial activity is inert waste. However, if left unmonitored, it can produce contaminants, by leaching processes, which are prone to degrade the quality of groundwater resources. Thus, it is necessary to study and examine this waste.

The main objective of this dissertation was to assess soils from recovering industrial areas in order to determine if that type of waste could be deposited in an inert waste landfill. For this purpose, and in view of the current situation of the Madalena quarry, in particular the monitoring of groundwater resources, the methodology used in this thesis included the completion of a leaching test according to EN12457-2:2002 to obtain the eluate which was later sent to laboratory analysis. The results were obtained through the soils and eluates analysis, with the intent to verify if the values obtained are within the limit values stipulated in accordance with the regulations and decree-laws, in turn, to determine if the waste/soil can be admitted to the landfill for inert waste, so that they can be deposited in the Madalena quarry. Three soils from disused industrial zones located in Porto, Braga and São João da Madeira were sampled. The soils and eluate laboratory results allowed us to conclude that the Porto soil is an admissible waste in a landfill for inert waste. On the other hand, the Braga soil is a waste that can not be admitted in an inert waste landfill, so that, it can not be deposited in the Madalena quarry. In the case of the São João da Madeira soil, although the leaching test was carried out, the results were not conclusive.

Keywords

Landfill of Inert Waste, Groundwater, Leaching, Rehabilitation, Environmental Recovery, Construction and Demolition Waste

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Palavras-chave	III
Abstract	V
Keywords	V
Índice	VII
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tabelas	XI
Abreviaturas	XIII
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização do caso em estudo	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado da arte	5
2.1. Indústria extrativa	5
2.2. Importância socioeconómica em Portugal	6
2.3. Impacte ambiental das pedreiras.....	10
2.3.1. Pedreiras Abandonadas (Passivos Ambientais).....	12
2.4. Recuperação paisagística de pedreiras.....	14
2.4.1. Vazios Resultantes da Exploração.....	17
2.4.2. Escombreiras.....	18
2.4.3. Deposição de Resíduos Inertes em Aterros	19
2.5. Fator ambiental: os recursos hídricos subterrâneos	23
2.5.1. Ciclo Hidrológico	25
2.5.2. Aquíferos	27
2.5.3. Composição Química das Águas Subterrâneas	29
2.5.4. Propriedades Físicas das Águas Subterrâneas	32
2.6. Poluição e contaminação das águas subterrâneas.....	33
2.6.1. Fontes de contaminação.....	35
2.7. Gestão e monitorização das águas subterrâneas.....	37
3. Caso de estudo: a pedreira da Madalena, Vila Nova de Gaia	41
3.1. Localização Geográfica	42
3.3. Enquadramento Geomorfológico e Geológico	44
3.2. Enquadramento Ambiental	49
3.4. Enquadramento Hidrogeológico	52

3.5. Tipos de recuperação paisagística e ambiental	56
3.5.1. Resíduos depositados em aterros.....	57
3.6. Situação atual da pedreira da Madalena	58
3.6.1. Gestão e Monitorização dos recursos hídricos subterrâneos na área da pedreira da Madalena	59
3.6.2. Análise dos resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização	60
4. Metodologia	71
4.1. Amostragem de Solos	71
4.2. Ensaio de Lixiviação.....	72
4.2.1. Norma EN1457-2:2002	73
4.2.2. Materiais e equipamentos utilizados	74
4.2.4. Procedimentos.....	76
5. Resultados e Discussão.....	79
5.1. Análise de solos	79
5.2. Análise ao eluato.....	85
6. Considerações finais.....	91
7. Referências Bibliográficas.....	93
Anexos	101
Anexo I	103
<i>Tabelas dos resultados obtidos nas campanhas de monitorização nos três Piezómetros.....</i>	103

Índice de Figuras

Figura 1 - Localização das principais ocorrências de massas minerais (LNEG, 2010). 7
Figura 2 - Distribuição dos materiais extraídos por subsector no ano de 1998 (Figueiredo, 2001). 8
Figura 3 - Percentagem de Rochas ornamentais (Adaptado de SIMPLEX, 2016)..... 9
Figura 4 - Principais centros de produção de granitos, calcários, mármore e xistos ornamentais (Adaptado de LNEG, 2010). 10
Figura 5 - Pedreiras inativas/abandonadas (CCDR-N, 2008). 14
Figura 6 - Tipos de intervenção na recuperação de minas e pedreiras a céu aberto (Adaptado de Basto e Silva, 2006)..... 17
Figura 7 - Tipo de recuperação com a utilização de uma escombreira (Adaptado de Correia e Sousa, 2012). 19

Figura 8 - Distribuição da água na terra (Adaptado de Instituto Geológico e Mineiro, 2001).	24
Figura 9 - Ciclo Hidrológico (Teixeira, 2011).	25
Figura 10 - Zonas de circulação da água subterrânea (Rodrigues, 1984).	27
Figura 11 - Tipos de Aquíferos; A - Aquífero poroso; B - Aquífero fraturado/fissurado; C - Aquífero cárstico (Adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	28
Figura 12 - Pedreira da Madalena no ano de 2015 delimitada a vermelho (Fonte Google Earth).	41
Figura 13 - Localização geográfica do concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a área em estudo, representada a vermelho no excerto da folha 122 da carta Militar de Portugal na escala 1/25 000, editada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1999 (A) e no Google Earth (B).	43
Figura 14 - Localização da área em estudo, em modelo digital de terreno da área a sul da Foz do Douro (Adaptado de Monteiro, 2008).	44
Figura 15 - Esboço geotectónico regional da faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha, no setor entre a cidade de Vila Nova de Gaia e Aveiro (Chaminé, 2000).	45
Figura 16 - Distribuição dos granitoides variscos sin-D3 e tardi-pós-D3 na Zona Centro-Ibérica com realce para a localização da pedreira da Madalena (Adaptado de Azevedo e Valle Aguado, 2013).	46
Figura 17 - Localização da área em estudo, em extrato da Folha 9-C da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal.	49
Figura 18 - Gráfico do uso do solo na freguesia de Canidelo (Moreno et al., 2005). ..	50
Figura 19 - Fontes de Poluição do tipo A e B na envolvente da área em estudo, representada no excerto da folha 122 da carta Militar de Portugal na escala 1/25 000, editada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1999 e no Google Earth.	51
Figura 20 - Localização da área em estudo, em extrato da Folha 1 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1/200000, editada pelo Instituto Geológico e Mineiro.	53
Figura 21 - Valores de precipitação total (mm) para o concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a localização da área em estudo (retirado do Atlas do Ambiente disponível em: https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt e editado no programa Google Earth.	54
Figura 22 - Valores do escoamento superficial (mm) para o concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a localização da área em estudo (retirado do Atlas do Ambiente disponível em: https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt e editado no programa Google Earth).	55

Figura 23 - Valores de evapotranspiração real (mm) para o concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a localização da área em estudo (retirado do Atlas do Ambiente disponível em: https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt e editado no programa Google Earth).	55
Figura 24 – Intervenções de recuperação paisagística por meio de Enchimento completo (A) e Enchimento parcial (B) (Adaptado de Basto e Silva, 2006).	56
Figura 25 - Localização dos piezómetros resultantes das campanhas de monitorização no excerto da Folha 122 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000, editada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1999.	60
Figura 26 - Concentração do parâmetro cálcio total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).	64
Figura 27 - Concentração do parâmetro magnésio total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).	64
Figura 28 - Concentração do parâmetro manganês total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).	65
Figura 29 - Concentração do parâmetro sódio total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).	65
Figura 30 - Concentração do parâmetro potássio nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3). ..	66
Figura 31 - Concentração do parâmetro bicarbonatos nos piezómetros 1 e 3 (P1 e P3).	66
Figura 32 - Concentração do parâmetro cloretos nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).	67
Figura 33 - Concentração do parâmetro sulfatos nos piezómetros 1, 2 e 3 (P1, P2 e P3).	68
Figura 34 - Variação da condutividade elétrica nos piezómetros 1, 2 e 3 (P1, P2 e P3).	69
Figura 35 - Solos amostrados e homogeneizados; A – solo do Porto “Pz15 – 1,5 m”; B – solo de Braga; C – solo de São João da Madeira.	72
Figura 36 - Material utilizado para o ensaio de lixiviação. A – Peneiro de malha 4 mm; B – Frascos de polietileno de 1 l com tampas de material inerte; C – Aparelho de agitação rotativo com tubos de 15 ml; D - Bomba para filtração a vácuo, Kitassato de 500ml e Funil de Büchner; E - Membranas de filtro de 5.5 cm; F - Ácido nítrico (HNO ₃) 69% PA-ACS-ISSO.	75
Figura 37 - Solos antes e depois de serem colocados na estufa. A – Solo “Porto” húmido; B – Solo “Porto” seco; C – Solo “Braga” húmido; D – Solo “Braga” seco; E - Solo “São João da Madeira” húmido; F – Solo “São João da Madeira” seco.	75
Figura 38 - Quartilhamento da amostra de Braga.	76

Figura 39 - Redução da amostra para inferior a 4 mm através do peneiro de malha de 4 mm.	76
Figura 40 - Procedimentos do ensaio de lixiviação; A – Amostra num frasco de polietileno misturada com 900ml de água; B – Agitação da amostra durante 24h.....	77
Figura 41 - Procedimentos do ensaio de lixiviação; A – Filtração a vácuo da amostra; B – Obtenção de 600 ml de eluato.	77

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Quantidade de material processado no setor pedreira no ano de 1998(Adaptado de Figueiredo, 2001).....	8
Tabela 2 – Iões fundamentais e iões menores.	30
Tabela 3 - Concentrações e VMR dos catiões.....	30
Tabela 4 - Concentrações e VMR dos aniões.....	31
Tabela 5 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização no Piezómetro 1. ..	61
Tabela 6 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização no Piezómetro 2. ..	62
Tabela 7 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização no Piezómetro 3. ..	63
Tabela 8 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização nos Piezómetros 1, 2 e 3, para o parâmetro condutividade elétrica.	68
Tabela 9 – Resultados das análises aos solos do Porto.....	80
Tabela 10 – Resultados das análises aos solos de Braga.	83
Tabela 11 – Resultados analíticos do eluato obtido com o ensaio de lixiviação para o solo do Porto.	86
Tabela 12 – Resultados analíticos do eluato obtido com o ensaio de lixiviação para o solo de Braga.....	88

Abreviaturas

AIA – Avaliação de Impacte Ambiental

CA – Comissão de Acompanhamento

CCDR – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional

CCDR-N – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte

DIA – Declaração de Impacte Ambiental

DREN – Direção Regional da Economia do Norte

EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro

EIA - Estudo de Impacte Ambiental

EVT – Evapotranspiração

IGM – Instituto Geológico e Mineiro

INE – Instituto Nacional de Estatística

PARP – Plano Ambiental e Recuperação Paisagística

Pdm – Plano Diretor Municipal

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

PGR – Plano de Gestão de Resíduos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SGIR – Sistema de Gestão da Informação sobre Resíduos

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação de Ambiente

SOLUSEL – Sociedade Lusitana de Obras e Empreitadas

SR – Situação de Referência

VMA – Valores Máximos Admissíveis

VMR – Valores Máximos Recomendáveis

ZCI – Zona Centro Ibérica

ZCPT – Zona de Cisalhamento Porto-Tomar

ZOM – Zona Ossa Morena

1. Introdução

A indústria extrativa constitui uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento socioeconómico de um país. Contudo, a sua ocorrência interfere com o meio ambiente gerando alguns impactes ambientais significativos, o que leva a estabelecer regras, diretivas e regulamentações severas com o intuito de minimizar e controlar os efeitos nocivos, em particular, durante e após a sua atividade.

Portugal é um país que possui uma fortíssima atividade mineira que se desenvolveu a partir de 1989. Dado o número e diversidade de pedreiras e minas ativas, encerradas e abandonadas, Portugal apresenta vastas regulamentações jurídicas e legislativas com o intuito de controlar e reduzir os potenciais impactes provocados pela sua atividade.

Uma pedreira é uma exploração a céu aberto, cuja atividade compreende a extração de massas minerais para posterior transformação, seguida, ou não, de exportação, constituindo assim um grande impacte na economia tanto a nível regional, como nacional. Sendo uma atividade que interfere bastante com o meio ambiente, leva a gerar impactes significativos, não só durante a sua atividade, mas também após o seu encerramento ou abandono. Assim, uma das regulamentações obrigatórias, quando uma pedreira é encerrada ou abandonada, é a sua recuperação paisagística.

A recuperação paisagística de uma pedreira pode compreender diversas formas, dependendo de diversos fatores. Uma das formas de recuperação é a deposição de resíduos em vazios resultantes da exploração.

Embora os resíduos depositados em aterros sejam normalmente resíduos inertes, a sua deposição não é uma solução absolutamente fiável, uma vez que podem ocorrer fenómenos de lixiviação que podem levar à contaminação de solos e, consequentemente, dos recursos hídricos subterrâneos. Assim, torna-se necessário e importante monitorizar e gerir os resíduos resultantes da exploração, mas também aqueles que venham a ser depositados e cuja origem é externa à exploração bem como a sua permanente deposição.

1.1. Contextualização do caso em estudo

A presente dissertação insere-se no Mestrado em Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e tem como tema “Avaliação da relação entre a

Deposição de Resíduos Inertes, na recuperação de uma pedreira, e o Estado Qualitativo das Águas Subterrâneas”. De um modo mais específico, o caso em estudo compreende a dispersão de contaminantes em meio rochoso fraturado que, por infiltração, contaminam as águas subterrâneas.

A importância deste estudo deve-se ao facto de pôr em causa, não só a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, mas também, por consequência, a saúde pública, uma vez que a área de estudo se insere numa zona urbana, nomeadamente num aterro resultante da recuperação de uma antiga pedreira.

A pedreira da Quinta de Moinho, ou mais comumente designada de pedreira da Madalena, situa-se na freguesia de Canidelo, concelho de Vila Nova de Gaia, e a sua atividade iniciou-se em 1971. Só a partir do ano 2000 a pedreira começou a receber resíduos inertes de múltipla natureza resultantes da demolição de edificações e blocos e de escavações, nomeadamente terras e rochas, para posterior deposição. São estes os resíduos a serem estudados na presente dissertação. Com base na análise de solos e no ensaio de lixiviação, pretende-se avaliar se os resíduos que são recebidos pela pedreira da Madalena são resíduos suscetíveis para serem admitidos em aterro.

1.2. Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho consistiu em avaliar solos, provenientes de zonas industriais desativadas, de modo a verificar se são resíduos admissíveis num aterro para resíduos inertes. Assim, pretende-se saber se os solos recebidos pela pedreira da Madalena, são resíduos inertes que podem ser depositados neste tipo de aterro.

Para a consecução do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos secundários:

- Identificar as potenciais fontes de contaminação na envolvente da área de estudo;
- Avaliar o estado de contaminação dos solos a receber.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos:

No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução, com o intuito de enquadrar o tema em questão, a contextualização do caso em estudo e os seus objetivos.

O segundo capítulo refere-se ao estado de arte onde são apresentadas as noções e conceitos no âmbito do tema em estudo, nomeadamente a recuperação paisagística de pedreiras e a poluição das águas subterrâneas.

O terceiro capítulo trata-se do caso em estudo onde é feito, não só, o enquadramento ambiental, geomorfológico, geológico e hidrogeológico da área de estudo, mas também uma abordagem sobre o tipo de recuperação e sobre a situação atual da pedreira da Madalena.

No quarto capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo, nomeadamente o ensaio de lixiviação.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados e a discussão dos dados obtidos pela metodologia descrita no quarto capítulo.

Por fim, no capítulo seis serão evidenciadas as principais conclusões, obtidas com o desenvolvimento deste estudo e que poderão dar resposta aos objetivos propostos no primeiro capítulo.

2. Estado da arte

2.1. Indústria extrativa

O interesse do Homem pelos recursos minerais adveio do período paleolítico, vulgarmente designado de Idade da Pedra, em que o ser humano pré-histórico começou a produzir os primeiros artefactos em pedra lascada. Posteriormente, no neolítico, houve a descoberta dos metais, nomeadamente do bronze, do ferro e do cobre. Desde essa altura a procura pelos melhores recursos minerais desempenhou um papel essencial na sobrevivência e evolução da humanidade (Carreto, 2012). Por esse motivo, a atividade extrativa é considerada como uma das atividades básicas do ser humano (Brodtkom, 2000), que se desenvolveu e se tornou importante para a sociedade e para a economia.

Relativamente à sua definição e segundo o Instituto Geológico e Mineiro (IGM), 1999, a indústria extrativa é uma atividade de exploração que abrange o reconhecimento, a preparação e a extração do minério bruto do solo, bem como o tratamento e a sua respetiva transformação (Instituto Geológico e Mineiro, 1999; Gonçalves, 2014). Existem quatro tipos de exploração:

- Subterrânea – quando as escavações não estão em contacto com o ar livre, encontrando-se rodeadas pelos terrenos do subsolo;
- A céu aberto – quando as escavações estão em contacto com o ar livre;
- A partir de perfurações – quando o jazigo é explorado sem necessidade de se abandonar à superfície, por exemplo, a partir de sondagens (é o caso de algumas explorações de minerais uraníferos, sal gema, petróleo, etc.);
- Hidráulica – consiste em utilizar a força hidráulica (normalmente água) para o desmonte do minério (pode ser subterrânea ou a céu aberto).

No entanto, a partir dos anos oitenta, a exploração dos recursos minerais teve e continua a ter pouca visibilidade, sofrendo de uma imagem pública negativa, isto é, a sociedade receia os efeitos negativos que a exploração possa exercer tanto no meio ambiente como na saúde pública. O que a sociedade desconhece é que, embora seja impossível evitar completamente certos aspetos durante o trabalho de exploração (como o ruído, as vibrações, as poeiras e o trânsito de viaturas), a indústria extrativa tem tentado reduzir o mais possível o impacte da sua atividade no ambiente e os incómodos daí resultantes para as populações locais (Brodtkom, 2000). Assim, a atividade extrativa trabalha sob regras e diretivas severas e tem uma considerável

autodisciplina relativamente a todas as suas atividades, cumprindo com medidas que minimizam em grande parte os efeitos nocivos. Essas medidas incluem a Avaliação do Impacte Ambiental (AIA), as licenças de exploração, os planos de recuperação, etc. Para além disso, a exploração de recursos e a proteção do meio ambiente só serão possíveis com uma adequada política de ordenamento de território (Valadares, 2015), de modo a que haja uma exploração sustentável com o envolvimento de todas as entidades económicas e administrativas nacionais, regionais e locais, formando um Plano Municipal de Ordenamento do Território.

A consultoria técnica especializada em geologia aplicada e gestão ambiental desempenham um papel fundamental no mercado e na sociedade, uma vez que podem fornecer aos seus clientes, na área de indústria extrativa, um acompanhamento legislativo e técnico nas mais variadas vertentes, desde a fase inicial de licenciamento até à desativação e encerramento da exploração (Carreto, 2012).

A atividade de exploração de uma pedreira é uma atividade industrial que, em termos gerais, consiste num conjunto de operações de movimentação de terras e/ou rochas, perfuração e desmonte com o objetivo de extrair uma massa mineral, tendo em vista a sua transformação e valorização como matéria-prima industrial ou rocha ornamental (SIMPLEX, 2016).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro, que veio adequar o Decreto-Lei n.º 270/2001, de 6 de outubro, uma pedreira é um conjunto formado por qualquer massa mineral que foi objeto de licenciamento, incluindo instalações necessárias à sua lavra, área de extração e zonas de defesa, depósitos e massas minerais extraídas, estéreis (escombreiras) e terras removidas (pargas) e seus anexos.

2.2. Importância socioeconómica em Portugal

As massas minerais (ou recursos minerais) são rochas e ocorrências não qualificadas legalmente como depósito mineral (Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro). Enquadram-se neste conceito os calcários, os basaltos, os granitos, as argilas, as areias e os cascalhos que podem ser utilizados para fins industriais ou ornamentais (VISA Consultores, 2012).

Os minerais não-metálicos produzidos na Europa dividem-se em duas grandes categorias (Brodtkom, 2000) (Figura 1): aqueles que estão relacionados com a

construção, correspondentes às Rochas Ornamentais e os que estão ligados a outras indústrias, correspondentes às Rochas Industriais. As rochas ornamentais (como por exemplo os mármore, granitos, calcários sedimentares, etc.) podem ser vendidas em blocos ou transformadas para aplicação, nomeadamente em pavimentos e revestimentos, construção civil, decoração, arte fúnebre, escultura, cubos, paralelepípedos e guias de passeios (Figueiredo, 2001; SIMPLEX, 2016).

As rochas industriais são utilizadas numa variedade de outras indústrias, ainda que alguns produtos acabem por ir parar ao setor da construção, tais como o talco, o calcário, o feldspato, o caulino, as argilas, a sílica, etc. (Brodtkom, 2000). As rochas industriais (como os calcários, granitos, areias, argilas, etc.) destinam-se a fornecer as matérias-primas necessárias para, por exemplo, o fabrico de cimento, cal, papel, vidro, tijolo, telha e inertes para a construção civil e obras públicas (SIMPLEX, 2016).

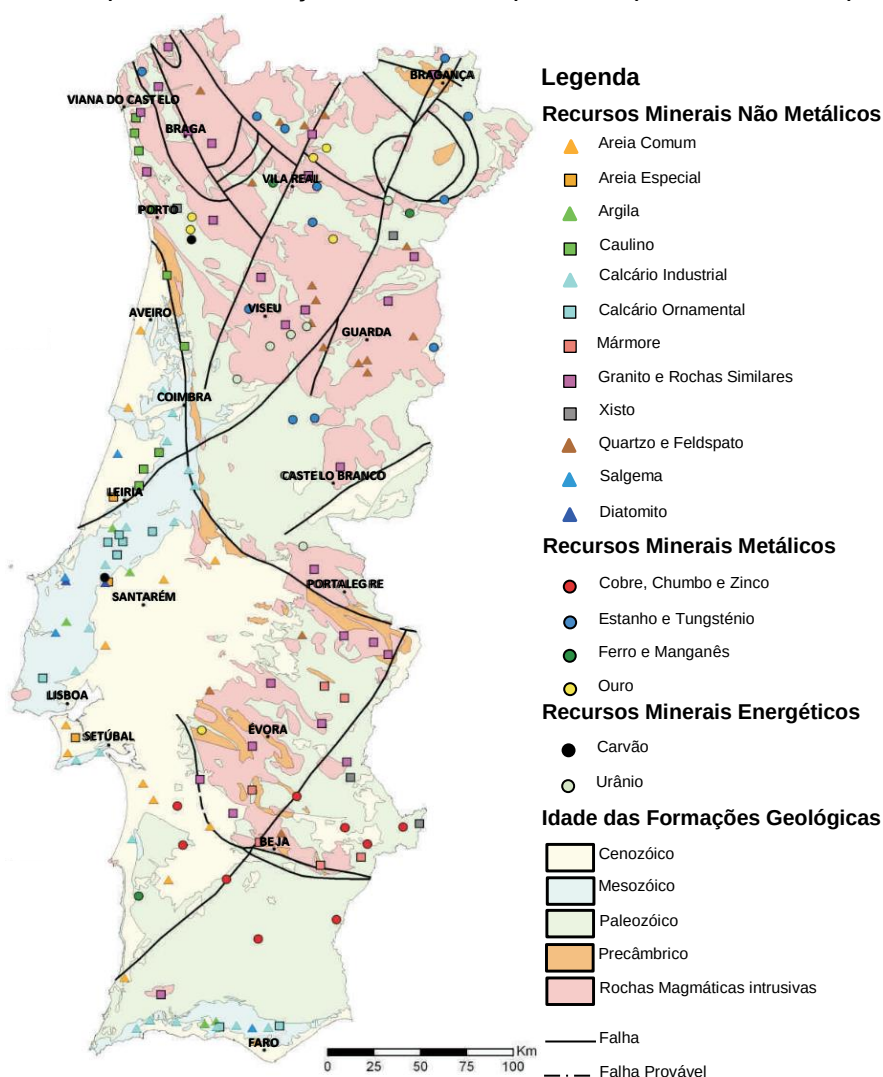


Figura 1 - Localização das principais ocorrências de massas minerais (LNEG, 2010).

Portugal possui uma fortíssima tradição mineira (Carreto, 2012) e as pedreiras tem um grande impacto na economia, quer das regiões onde ocorrem, quer a nível nacional, sendo relevante o papel desempenhado no plano das exportações (SIMPLEX, 2016). O setor das pedreiras é composto por três tipos de empresas: as que se dedicam unicamente à extração de pedra (pertencentes às rochas ornamentais); as que se dedicam exclusivamente à transformação da pedra (pertencentes também às rochas ornamentais); e as que se dedicam à extração e transformação de pedra (pertencentes às rochas industriais e algumas ornamentais) (Figueiredo, 2001).

Segundo os dados do IGM e do Instituto Nacional de Estatística (INE), no ano de 1998, foram processadas cerca de 94 milhões de toneladas de pedra, relativos a extração e importação. Do total de rocha extraída apenas 2% dizem respeito ao subsector de rochas ornamentais sendo o subsector das rochas industriais responsável por 98% do material extraído (Figura 2). As empresas de extração e transformação (rochas industriais) destinam-se quase exclusivamente ao mercado nacional, representando as exportações apenas 0.2% do material extraído nas pedreiras e as importações apenas 1%. Por outro lado, as empresas pertencentes às rochas ornamentais, a exportação é de 58% e as importações de apenas 6% do total de rocha processada (Figueiredo, 2001) (Tabela 1).

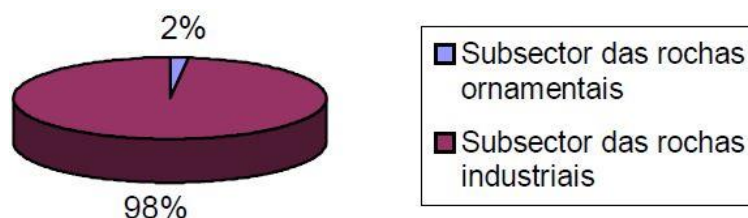


Figura 2 - Distribuição dos materiais extraídos por subsector no ano de 1998 (Figueiredo, 2001).

Tabela 1 - Quantidade de material processado no setor pedreira no ano de 1998 (Adaptado de Figueiredo, 2001).

	Quantidade (t/ano)		
	Produção / Extração	Importação	Exportação
Rochas Ornamentais	1 923 677	112 824	1 122 230
Rochas Industriais	90 619 872	1 259 149	188 422
Total	92 543 549	1 371 973	1 310 652

Nos últimos anos assistiu-se ao declínio da construção civil e, conseqüentemente, a diminuição da produção de agregados e rochas industriais com conseqüente estabilização da procura face à oferta (SIMPLEX, 2016).

Recentemente, as pedreiras com produção no ano de 2015 produziram 45,7 milhões de toneladas. O valor das exportações nas rochas ornamentais regista uma tendência crescente, com uma taxa média anual de 4%, o que tem dinamizado a procura de novos núcleos de exploração para obter novas tipologias de rochas, bem como criar alternativas ao esgotamento eminente das reservas de algumas das pedreiras existentes (SIMPLEX, 2016).

No total do valor de exportação nacional de 2015 da indústria extrativa, verifica-se que as rochas ornamentais ocupam um papel importante, sendo responsáveis por 44% desse valor total (SIMPLEX, 2016) (Figura 3).

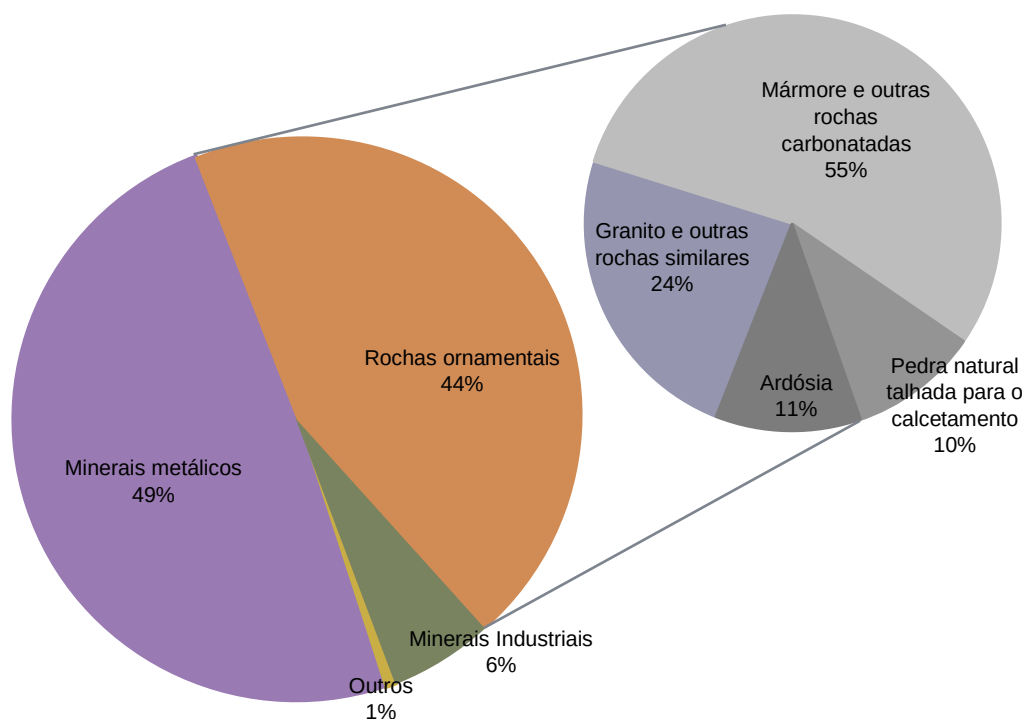


Figura 3 - Percentagem de Rochas ornamentais (Adaptado de SIMPLEX, 2016).

O subsetor das rochas ornamentais compreende a exploração de três grandes grupos principais: 55% dizem respeito a rocha do tipo “mármore e outras rochas carbonatadas”, 24% a rocha do tipo “granito e rochas similares” e 11% a rocha do tipo “ardósias e xistos ardosíferos”, do total de rocha extraída e transformada (Figueiredo, 2001) (Figura 4).

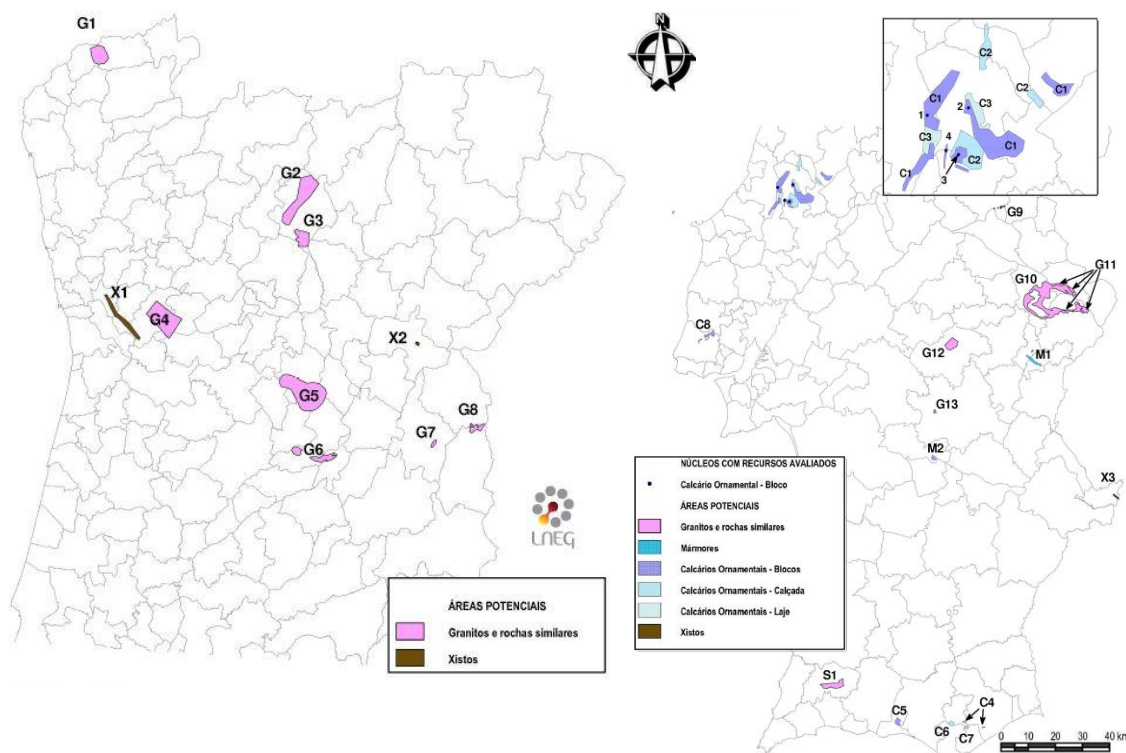


Figura 4 - Principais centros de produção de granitos, calcários, mármore e xistos ornamentais (Adaptado de LNEG, 2010).

2.3. Impacte ambiental das pedreiras

As explorações a céu aberto, como já foi referido anteriormente, são atividades que estão em contacto com o ar, causando, por isso, uma série de problemas significativos a nível ambiental, uma vez que interferem com o meio ambiente. Um exemplo dessas explorações são as pedreiras.

A atividade de exploração de uma pedreira interfere com os sistemas naturais, causando desequilíbrios e originando paisagens com reduzido valor estético, caso não sejam implementadas medidas de minimização e/ou correção adequadas ao local e às atividades desenvolvidas (Martins e Sousa, 2012).

Segundo Kraemer, 2000, citado por Gonçalves, 2014, entende-se por impacte ambiental qualquer alteração que se verifique na área de estudo e meio envolvente, ao nível das componentes ambientais em análise, e que advenha de forma direta e indireta dos trabalhos realizados. Os impactes ambientais causados pelas pedreiras são vários e encontram-se subdivididos em diversos fatores ambientais, mas, dado o objeto de estudo em que se insere a presente dissertação, destacam-se os fatores que podem

ser posteriormente recuperados após o encerramento da exploração (Martins e Sousa, 2012): o meio hídrico, o solo, a fauna e a flora e a paisagem.

No caso do meio hídrico, o impacto causado pela atividade extrativa ocorre essencialmente durante o desenvolvimento da escavação, bem como a criação e manutenção da escombreira, onde os aspetos mais afetados são: a drenagem superficial (com a intersecção/destruição ou ocupação de linhas de água); a intersecção e rebaixamento dos níveis freáticos (com a perturbação/alteração do regime de escoamento subterrâneo e alteração da qualidade das águas subterrâneas); e a alteração da qualidade das águas superficiais. O arrastamento, transporte e deposição de partículas sólidas e de resíduos potencialmente perigosos, sobretudo nos períodos de precipitações intensas constitui a maior problemática. Esta situação pode induzir não só a uma contaminação das linhas de água, mas também à deposição de partículas mais grosseiras que pode conduzir a algum assoreamento aquando de escorrências torrenciais associadas a pluviosidades elevadas (Martins e Sousa, 2012).

A degradação do solo são as alterações mais notórias, causadas pela exploração a céu aberto, onde estas alterações podem ser mínimas, profundas ou até mesmo totais nas áreas que estão sujeitas a desmatagem e decapagem. Quando as alterações são profundas e por vezes irreversíveis dificilmente são reunidas as características e as condições necessárias para uma organização estrutural e funcional da área e do meio físico envolvente (Guiomar, 2005). Contudo, o impacto ambiental é menos grave quando as áreas intervencionadas são constituídas por rocha aflorante e/ou solos esqueléticos. Outro impacto ambiental neste fator é o derramamento de combustíveis e outros produtos que concentram os poluentes no solo (Martins e Sousa, 2012).

Um outro fator ambiental também afetado pela desmatagem e decapagem é a fauna e a flora, pois aquelas ações são responsáveis pela destruição da flora nas zonas intervencionadas, que com a atividade permanente de equipamentos afasta alguma fauna.

A alteração da paisagem é o fator mais valorizado e/ou referido pela população em geral numa atividade extrativa, pois possui ações de intervenção direta e indireta indutoras de efeitos descaracterizadores da paisagem típica local (Martins e Sousa, 2012). Este impacto ocorre na fase inicial, onde se origina uma desorganização estrutural da paisagem (causada pelo desnudamento e mobilização do terreno, pela presença do equipamento e pelo depósito de materiais) e durante a fase de exploração, onde há alteração da estrutura e organização da paisagem e alteração do relevo.

Tendo em conta o que foi descrito anteriormente, relativamente aos fatores ambientais, é possível verificar que os fatores não atuam individualmente e alguns deles estão interligados entre si. Por isso, as medidas de minimização de impactes, quando aplicadas, têm efeitos complementares, pois geralmente os benefícios não se fazem sentir apenas no fator ambiental para que foram aplicadas.

2.3.1. Pedreiras Abandonadas (Passivos Ambientais)

Quando uma empresa, ao explorar certos recursos naturais, provoca a poluição do ambiente, esta deve promover investimentos em benefício ao meio ambiente. Contudo, nem sempre existe a capacidade de promover esses investimentos devido ao facto de não ser possível identificar o responsável pela poluição (princípio poluidor-pagador) ou quando o responsável pela poluição não pode ser responsabilizado pela força da legislação comunitária ou nacional (princípio da responsabilidade) ou ainda não ser possível obrigar o responsável pelos custos da recuperação (Agência Portuguesa do Ambiente, 2016).

A atividade extrativa constitui uma atividade económica suscetível de gerar passivos ambientais, devido ao seu impacto em diversas componentes, designadamente, paisagem, solo, água, fauna e flora. A intensidade dos impactes varia consoante as características morfológicas e ecológicas, os materiais extraídos, o processo utilizado, a visibilidade do local, a permeabilidade do solo, entre outras (CCDR-N, 2008).

No que diz respeito à exploração a céu aberto, nomeadamente às pedreiras, consideram-se passivos ambientais as pedreiras que se encontram abandonadas ou inativas (CCDR-N, 2008). Quando as fases de exploração ou de pesquisa e prospeção finda, quando a exploração é interrompida num período superior a dois anos ou quando o explorador obtém prévia autorização da entidade licenciadora para a suspensão das suas atividades, a pedreira considera-se abandonada (SIMPLEX, 2016; Guiomar, 2005). Nesta fase o explorador deve proceder à implementação de medidas de segurança e recuperação paisagística (Figueiredo 2001).

As pedreiras abandonadas constituem a maior causa de degradação ambiental da indústria extrativa a longo prazo, o que leva a suscitar um legado de desconfiança em relação à atividade extrativa (EDM, 2011). As pedreiras de média e grande dimensão são as mais significativas devido a provocarem maiores impactes (CCDR-N, 2008).

Os fatores ambientais, mais afetados pelas pedreiras abandonadas, são geralmente os solos, os recursos hídricos, a fauna e a flora. A alteração do solo, a remoção da vegetação, a deposição de resíduos de exploração indevida, taludes instáveis e contaminação, são os impactos mais significativos. Porém, o abandono das pedreiras pode gerar impactos positivos na fauna de vertebrados dado que proporciona a presença e adaptação de algumas espécies. As pedreiras abandonadas podem ainda servir de refúgio para certos animais e como habitat de alimentação, devido à acumulação de água (Guiomar, 2005).

A Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM) é, desde 2001, a empresa concessionária para a recuperação ambiental das zonas mineiras degradadas, pedreiras abandonadas que necessitam de intervenção ambiental e áreas de prospeção mineira que, embora abandonadas em estado embrionário, carecem de intervenção ao nível da segurança e prevenção de acidentes (Direção de Serviços de Ambiente – Divisão de Avaliação Ambiental, 2008). Entre 1993 e 1999 foi apresentando um programa de incentivos comunitários (II Quadro Comunitário de Apoio) que levou à resolução de problemas do quotidiano, tais como, o abastecimento de água, o tratamento de efluentes e dos resíduos sólidos urbanos e posteriormente procedeu-se à eliminação dos principais passivos ambientais resultantes da atividade industrial em geral e da atividade mineira em particular (EDM, 2011). A EDM tem dedicado particular atenção às pedreiras abandonadas, tendo-se responsabilizado por uma intervenção mais imediata, nas vertentes ambiental, paisagística e de segurança, prevendo a realização de um Programa para a Recuperação de Antigas Pedreiras Abandonadas e minas (CCDR-N, 2008).

Segundo os dados da Direção Regional da Economia do Norte (DREN) disponibilizados pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional Norte CCDR-N (Figura 5) existem na Região do Norte 153 pedreiras inativas ou abandonadas, em que cerca de 77,1% (118) são pedreiras de granito (CCDR-N, 2008).

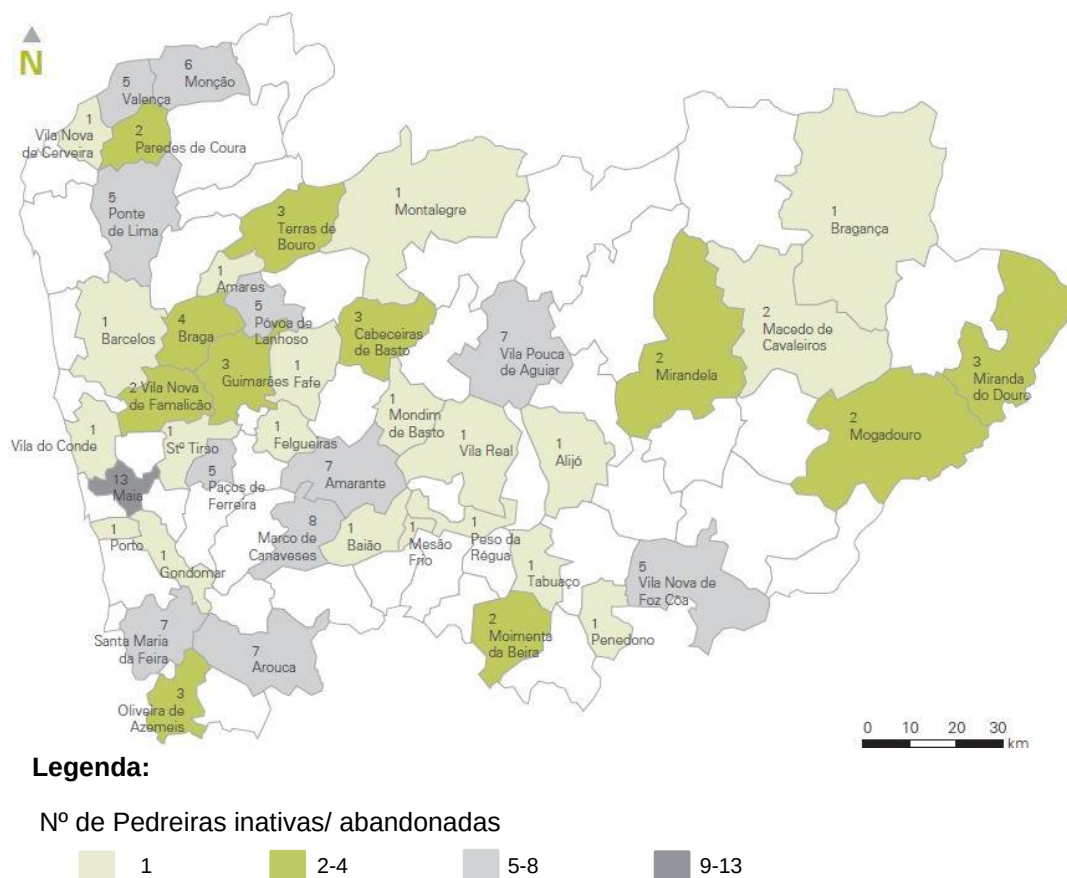


Figura 5 - Pedreiras inativas/abandonadas (CCDR-N, 2008).

2.4. Recuperação paisagística de pedreiras

A indústria extrativa é um setor que se rege por muitas regulamentações jurídicas a nível ambiental e de ordenamento do território, uma vez que apresenta vastas implicações no ambiente e na saúde pública. Portugal possui uma vasta regulamentação e legislação, que tem como principal objetivo controlar e mitigar os impactos ambientais provocados por esse tipo de atividade (Carreto, 2012).

O Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro, que veio alterar o Decreto-Lei n.º 270/2001, de 6 de outubro, também designado como “lei de pedreiras”, estabelece o regime jurídico de pesquisa e exploração de “massas minerais”, bem como o encerramento das pedreiras. Os pedidos de licenciamento de explorações de massas minerais, conduzem à obtenção das licenças de pesquisa ou exploração, que são os títulos que legitimam o seu titular para o desenvolvimento da atividade extrativa (SIMPLEX, 2016).

Segundo o Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro, a licença de exploração é o título que legitima o seu titular a explorar uma determinada pedreira, isto é, a extrair a massa mineral de acordo com o Plano de Pedreira aprovado nos termos do presente diploma e das condições da licença (SIMPLEX, 2016). Esse plano é, por sua vez, constituído pelo Plano de Lavra e pelo Plano Ambiental e de Recuperação Paisagística (PARP).

O PARP é um documento técnico que tem como objetivo a reabilitação das áreas a afetar pela exploração propriamente dita e infraestruturas conexas e irá atender à localização, características e enquadramento das áreas que se pretendem recuperar (VISA Consultores, 2012). Este documento integra não só as medidas ambientais e de recuperação paisagística, mas, também, a proposta de solução para o encerramento da pedreira (Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de Outubro; Gonçalves, 2014).

Os principais elementos técnicos do PARP são o Plano de Desativação e o Plano de Recuperação (Bastos e Silva, 2006). Quando a exploração é concluída, quando o explorador abandona a exploração ou a licença cessa nos termos do Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro, deverá proceder-se à recuperação de acordo com o PARP aprovado. É, portanto, um documento importante no contexto de Gestão Ambiental da indústria extrativa, na medida em que fornece as linhas orientadoras não só para a atividade de extração, mas também para a recuperação paisagística (Gonçalves, 2014).

A recuperação paisagística consiste num processo que visa reabilitar ou requalificar uma área degradada, com o intuito de restabelecer ou criar condições que valorizem o espaço em termos ecológicos, produtivos e estéticos, integrando-o ambiental e paisagisticamente na envolvente (VISA Consultores, 2012). É um imperativo legal, ou seja, é um dever dos exploradores quando as reservas se encontram esgotadas na pedreira ou em parte dela. Uma pedreira de grandes dimensões, esteja ela situada numa zona rural ou urbana, já não pode ser encerrada sem o mínimo de recuperação. Por isso, a recuperação paisagística é de uma importância crescente, sendo planeada durante as fases iniciais do projeto de extração (Correia e Sousa, 2012).

O termo recuperação, quando utilizado no âmbito de recursos geológicos, tem uma aplicação lata, contudo os seus objetivos principais incluem: a estabilização do terreno, a garantia da segurança pública, a melhoria estética e a devolução do espaço para algo considerado, dentro do contexto regional, um propósito útil (Bastos e Silva, 2006; Correia e Sousa, 2012).

Existem diversas formas de recuperação de pedreiras que dependem do projetista, do promotor, da função e dos objetivos definidos para cada espaço, das condicionantes do local, dos materiais disponíveis e do capital que se pretende investir. No entanto, existem diferentes modelos de recuperação que podem ser agrupados em três tipos principais (Bastos e Silva, 2006; Correia e Sousa, 2012): Restauração, Reabilitação e Reconversão.

A Restauração é um tipo de recuperação que visa a restituição do estado original da zona afetada, removendo a causa de degradação. É um método inviável e completamente desadequado, uma vez que a reposição mais pura possível do estado preexistente, só se justifica se existirem meios para restabelecer a morfologia, a qualidade dos solos, etc., bem como, quando a qualidade do meio ambiente original é suficientemente importante para justificar essa opção. Para além disso, é muito dispendiosa e, quando possível, pode demorar algumas décadas.

A Reabilitação pressupõe uma recuperação das funções e processos naturais dentro do contexto da perturbação e produz um ecossistema alternativo compatível com a envolvente. As medidas adotadas tenderão a aproximar a zona perturbada o mais possível da situação ideal (antes da perturbação). Este tipo de solução é o mais usado na recuperação de áreas intervencionadas pelas pedreiras, mais fácil e o que reúne maior consenso entre as entidades licenciadoras, assentando principalmente na revegetação ou florestação das áreas afetadas.

A Reconversão tem o intuito de reutilizar o espaço afetado pelas explorações para outros usos, diferentes do estado original, sem a preocupação de reposição do ecossistema autóctone, não obrigando assim, à revegetação das áreas. Encontra-se limitado por dois aspetos principais: a inexistência de usos futuros para os espaços, consignados nos instrumentos de ordenamento do território atuantes sobre a área e a inexistência de expectativas concretas futuras por parte de projetistas e promotores. Contudo, há muitos exemplos de antigas pedreiras que contribuíram para o bem-estar dos habitantes locais ao serem reconvertidas em espaços verdes ou parques de recreio, campos para prática de atividades radicais, campos de futebol, centros comerciais, etc. Por isso, a reconversão é uma medida de enorme importância, uma vez que, além dos benefícios ecológicos, socioculturais e de bem-estar para as populações locais, algumas soluções podem ser rentáveis a médio-longo prazo.

As principais medidas de recuperação ambiental e paisagística devem ser tomadas após o encerramento da pedreira, tendo em consideração, o modelo de

recuperação e o uso escolhido e, sobretudo, o tipo de pedreira e a zona que se pretende recuperar (Correia e Sousa, 2012). Essas medidas atuam em vazios resultantes da exploração e escomboreiras.

2.4.1. Vazios Resultantes da Exploração

O tratamento dos vazios ou depressões resultantes da exploração deverão ser objeto de ações que maximizem a instalação da cobertura vegetal, em que uma das primeiras e principais ações será o enchimento (Correia e Sousa, 2012). Existem quatro tipos de enchimentos (Figura 6): o Renivelamento (enchimento completo), o Enchimento Parcial ou Médio (enchimento quase completo, enchimento reduzido e enchimento pouco significativo), a Manutenção (enchimento mínimo) e o Abandono Controlado (ausência de enchimento) (Basto e Silva, 2006).

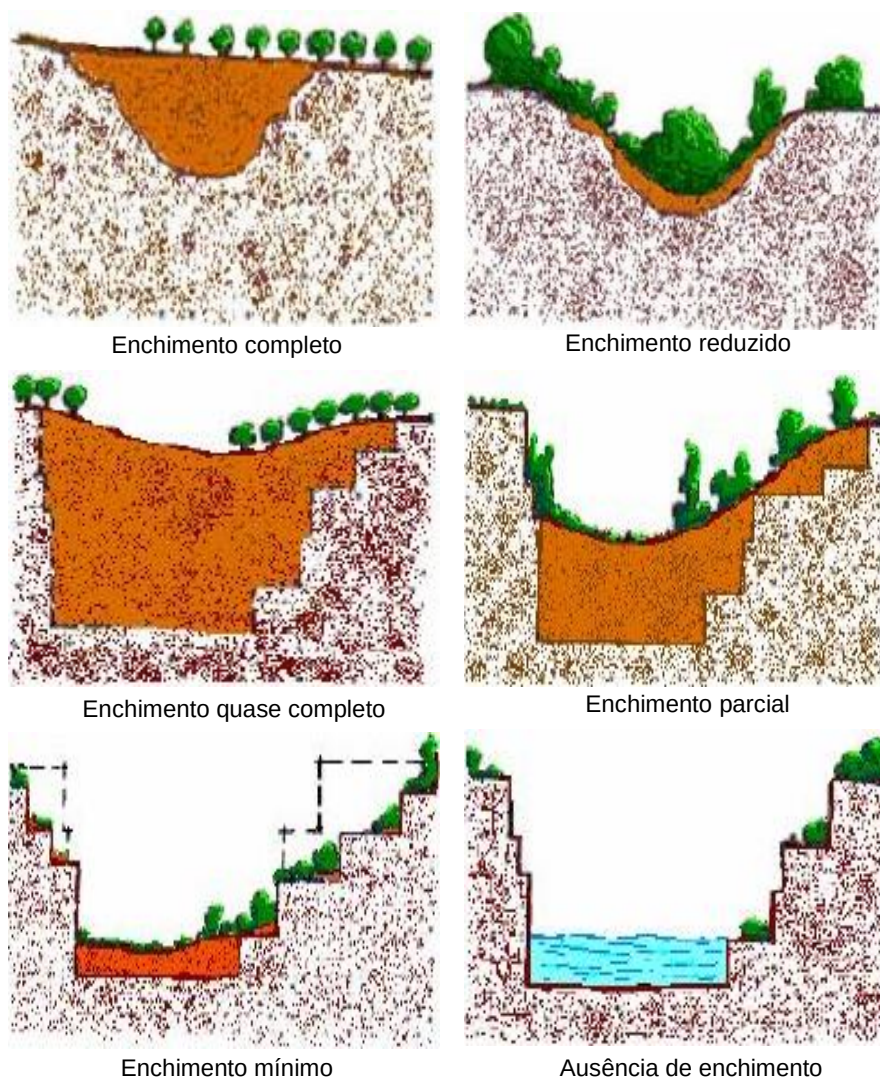


Figura 6 - Tipos de intervenção na recuperação de minas e pedreiras a céu aberto (Adaptado de Basto e Silva, 2006).

O Renivelamento é procedido com a finalidade de obter as superfícies finais com um aspeto mais natural e ser um substrato adequado para receber solo fértil para a revegetação. Este enchimento deve ser efetuado com os resíduos da exploração, com o solo adequado e, sempre que possível, com os materiais removidos na decapagem (Correia e Sousa, 2012). Neste tipo de intervenção é ainda possível aplicar o conceito da restauração.

Quando a quantidade de resíduos disponível não é suficiente para o preenchimento total da escavação nem é possível utilizar materiais de outros locais, a solução é o Enchimento Parcial. A reabilitação por revegetação é a solução mais comum, porém, caso esteja localizada em zona urbana ou periurbana, a reconversão do local pode ser uma solução eficaz (Correia e Sousa, 2012).

A Manutenção ou enchimento mínimo limita-se apenas ao tratamento das superfícies originadas, tirando partido dos desníveis criados. Os processos de tratamento consistem em sanear as zonas instáveis ou eliminar algumas irregularidades, de forma a garantir a estabilidade do maciço. É uma das soluções menos dispendiosas, que se insere no domínio da reconversão, podendo desenvolver-se nesses locais, áreas de lazer, reservatórios para água, construção de aterros, etc. (Correia e Sousa, 2012).

Quando as pedreiras são pequenas e estão há muito abandonadas, ou não há viabilidade económica para uma solução de restauração ou reconversão, poderá ser aceitável um processo de regeneração natural, ou seja, de Abandono Controlado. Neste caso é necessária uma ação mínima de controlo de forma a garantir as condições de segurança, para as pessoas e animais e evitar a transformação do local em vazadouro de resíduos (Correia e Sousa, 2012).

2.4.2. Escombreyras

As escombreyras, resultantes da indústria extrativa, constituem um dos elementos de maior impacte paisagístico, uma vez que provocam alteração da fisiografia do local e perda de estética. A recuperação de uma escombreyra deve ocorrer em simultâneo com a exploração de modo a minimizar os impactes ambientais e facilitar a gestão dos resíduos (Correia e Sousa, 2012) (Figura 7). Existem três tipos de intervenções de recuperação de escombreyras: obras de estabilização e drenagem, ocultação e revegetação e reutilização dos estereis.

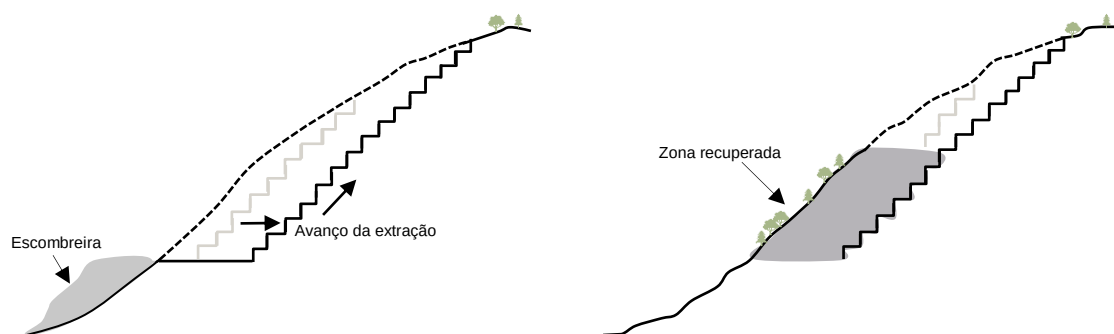


Figura 7 - Tipo de recuperação com a utilização de uma escombreira (Adaptado de Correia e Sousa, 2012).

Após a construção de uma escombreira e antes de implantar a cobertura vegetal ou dar uso aos terrenos, é necessário adotar uma série de medidas de sustentação. Essas medidas consistem na diminuição da inclinação, de modo a reduzir as forças desestabilizadoras, na construção de muros (em betão, alvenaria, terra armada, etc.) na base da escombreira e na implementação de um sistema de drenagem, com o intuito de minimizar o efeito erosivo/desestabilizador da água (Correia e Sousa, 2012).

As escombreiras com formas suaves e de dimensão reduzida serão mais facilmente integradas na paisagem e a revegetação completa das escombreiras é preferível à implementação de uma cortina arbórea. O recobrimento com terra vegetal diminui o contraste cromático e facilita o enraizamento das espécies vegetais. Estas características contribuem para a diminuição da volumetria e o esbatimento das formas geométricas (Correia e Sousa, 2012).

A reutilização dos estéreis consiste no aproveitamento dos resíduos para o enchimento das cavidades deixadas pela exploração à medida que a exploração prossegue para não onerar em demasia as operações finais de recuperação (Correia e Sousa, 2012).

A escolha do local para a implementação de uma escombreira depende do volume total de estéril a transportar, da necessidade de minimizar a área afetada, dos impactes na zona circundante e da possibilidade de integração e restauração da estrutura final da exploração (Moura e Sousa, 2012).

2.4.3. Deposição de Resíduos Inertes em Aterros

Segundo a VISA Consultores, 2012, a licença de exploração integra ainda o Plano de Deposição e o Plano de Gestão de Resíduos (PGR), em que a correta e bem planeada política de gestão proporciona a conservação dos recursos naturais, a

proteção da qualidade do ambiente e, conseqüentemente, o desenvolvimento sustentável.

O Plano de Deposição é um documento técnico constituinte do Plano de Lavra (Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro) e define a metodologia de gestão de resíduos da atividade extrativa, incluindo a sua produção, valorização, reciclagem, tratamento, armazenagem e eliminação, tendo como objetivo minimizar os impactos ambientais negativos e os riscos de segurança.

O Plano de Gestão de Resíduos (PGR) tem como objetivos (Decreto-Lei n.º 10/2010, de 4 de fevereiro):

- evitar ou reduzir a produção de resíduos e a sua perigosidade;
- promover a valorização dos resíduos de extração através da reciclagem, reutilização ou recuperação dos mesmos, com o respeito pelo ambiente;
- garantir a eliminação segura dos resíduos de extração tendo particularmente em conta, durante a fase de projeto, o modelo de gestão a observar durante o funcionamento e no pós-encerramento da instalação de resíduos.

A elaboração do PGR deve ter em consideração as soluções de integração paisagística consignadas no PARP.

A produção de resíduos mineiros da pedreira (estéreis) é caracterizada e avaliada criteriosamente, de modo a definir um modelo de gestão de resíduos. Este modelo considera o planeamento da deposição de resíduos mineiros a gerar e tem como objetivo a minimização dos impactos ambientais negativos e dos riscos de segurança (VISA Consultores, 2012).

O Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, adaptado do Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio, estabelece o regime jurídico da deposição de resíduo em aterro e os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros. Ainda nesse mesmo documento, é reforçada a aplicação do princípio da hierarquia de gestão de resíduos, prevendo a minimização da deposição em aterro dos resíduos que tenham potencial de reciclagem e valorização.

Assim, os principais objetivos do presente Decreto-Lei são evitar ou reduzir os efeitos negativos, sobre o ambiente, da deposição de resíduos em aterro, quer à escala local, em especial a poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e da

atmosfera, quer à escala global, em particular o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana.

Compete às Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) o licenciamento de todo o tipo de aterros, com a exceção dos abrangidos pelo anexo I do Decreto-Lei n.º 69/2000, de 3 de Maio, relativo aos projetos sujeitos à Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) e dos associados a atividades industriais licenciadas por outras entidades da administração.

Para obter uma licença de deposição de resíduos em aterro, o requerente deve solicitar à CCDR territorialmente competente o parecer sobre a compatibilidade da localização pretendida com os instrumentos de gestão territorial aplicáveis excetuando-se quando:

- o aterro está sujeito a AIA;
- o aterro se localize em área expressamente destinada a esse uso prevista em instrumento de gestão territorial;
- o aterro esteja inserido num estabelecimento sujeito ao regime de exercício de atividade industrial, cuja a localização tenha sido apreciada no âmbito do respetivo procedimento para instalação e exploração de estabelecimento industrial.

No caso dos aterros que se encontram sujeitos a AIA, o pedido de licença, segundo o regime jurídico de AIA aprovado pelo Decreto-Lei n.º 69/2000, de 3 de Maio, é entregue após: a emissão da Declaração de Impacte Ambiental (DIA) favorável ou condicionalmente favorável, no caso da AIA decorrer em fase de projeto de execução; a emissão do parecer relativo à conformidade do projeto de execução com a DIA, no caso do procedimento de AIA decorrer em fase de estudo prévio; a emissão de declaração relativa à dispensa do procedimento de AIA; ou, o decurso do prazo necessário para deferimento tácito nos termos previstos pelo regime jurídico de AIA (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto).

A AIA efetua assim, um estudo que identifique e valorize os impactes mais significativos, antes e durante a implementação do projeto, assim como propor as medidas que evitem ou atenuem os potenciais efeitos negativos em articulação com as soluções propostas, isto é, apresenta a Declaração de Impacte Ambiental (DIA). Esta declaração é emitida após a avaliação do Estudo de Impacte Ambiental (EIA) e de acordo com uma Comissão de Acompanhamento (CA), constituída pelas entidades relacionadas com o processo (Ambiente e Economia) e pelas consideradas importantes

em função das particularidades do projeto em causa (Martins e Sousa, 2012; Afonso e Sousa, 2012).

A melhor estratégia de gestão dos resíduos, a adotar pela indústria extrativa, é a política dos três R's: Reduzir, Reutilizar e Reciclar. Os resíduos, que não podem ser aplicados nessas três estratégias, têm como destino final a sua eliminação, os quais poderão passar por aterro (Meira, 1999).

Um aterro é uma instalação de eliminação de resíduos através da sua deposição acima ou abaixo da superfície natural que inclui: as instalações de eliminação internas, isto é, onde o produtor de resíduos efetua a sua própria eliminação de resíduos no local de produção; e uma instalação permanente, onde o aterro, que tiver uma vida útil superior a um ano, é usado para armazenagem temporária (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto).

Os resíduos que são admissíveis em aterros têm de ser objeto de tratamento e respeitarem os critérios de admissão definidos no Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, para a respetiva classe de aterro, excepcionando-se do primeiro requisito os resíduos inertes cujo tratamento não seja tecnicamente viável ou os resíduos cujo tratamento se comprove não contribuir para os objetivos estabelecidos no mesmo documento.

Os aterros podem ser classificados em três tipos de classes: aterros para resíduos inertes; aterros para resíduos não perigosos e aterros para resíduos perigosos. Esses aterros, em função da sua respetiva classe, estão sujeitos ao cumprimento dos requisitos técnicos, no qual fazem parte integrante, referentes à localização, ao controlo de emissões e proteção do solo e das águas, à estabilidade, aos equipamentos, às instalações e infraestruturas de apoio e ao encerramento e integração paisagística (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto).

A recuperação paisagística de pedreiras, através da deposição de resíduos em aterro é uma prática bastante frequente, mas o tempo que poderá ter para o seu enchimento, depende de muitas características, tais como o fluxo de inertes do local ou de materiais externos (Valadares, 2016). Na maioria dos casos, o aterro é feito com materiais rejeitados da exploração das massas minerais e outras matérias, reconstituindo-se a forma do terreno o melhor possível (Meira, 1999; Valadares, 2016). A deposição de resíduos inertes em aterros é uma forma de contornar a deposição ilegal das descargas no meio ambiente (Valadares, 2016).

Segundo o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, define-se resíduo qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer. Quanto à sua perigosidade, existem diferentes tipos de resíduos que podem ser: resíduos inertes, resíduos industriais e resíduos perigosos.

Os resíduos inertes são resíduos que não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não podem ser solúveis nem inflamáveis, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química, não podendo ser biodegradáveis, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entrem em contacto de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana e, ainda, a sua lixiviabilidade total, conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e/ou subterrâneas.

Os resíduos resultantes da extração são, nomeadamente, solos e fragmentos de rocha que, devido principalmente a condicionantes geológicas, não apresentam valor comercial. Estes resíduos são depositados em aterros de superfície (escombreyras) e são acomodados à medida que a exploração evolui e que posteriormente poderão ser utilizados para a recuperação paisagística e ambiental. Não são considerados perigosos, mas a deposição não controlada ou incorretamente planeada pode estar na origem de acidentes e ocasionar impactes ambientais graves. Deve-se, por isso, garantir que o armazenamento dos solos não seja negligenciado, de modo a preservar o quanto possível o seu estado original, para uma correta reconstituição do terreno e da flora de acordo com as medidas de recuperação paisagística (Moura e Sousa, 2012).

2.5. Fator ambiental: os recursos hídricos subterrâneos

Como já foi referido nos subcapítulos anteriores, as pedreiras interferem, durante e após a sua atividade, em diversos fatores ambientais, nomeadamente a paisagem, os solos e os recursos hídricos. Após a sua atividade de exploração e durante a sua recuperação paisagística, é importante ter em conta os fatores ambientais que foram ou que podem vir a ser afetados, de modo a reduzir e minimizar o seu impacto no meio ambiente.

Tendo em conta o contexto em que se desenvolve o tema da presente dissertação, procurou-se abordar, sobretudo os subcapítulos que se seguem, o fator ambiental que tem vindo a ser um dos mais afetados, as águas subterrâneas.

A água é um recurso essencial à vida no planeta, pois muitos seres vivos dependem dela e/ou são compostos em grande proporção por ela. De acordo com a Figura 8, a grande reserva de água encontra-se nos oceanos, sob a forma de água salgada, com um volume de 97% das reservas totais. Dos restantes 3%, que representa a água doce, 77% encontra-se retida nos glaciares e icebergs, 22% constituem a água subterrânea e os restantes 1% corresponde aos rios e lagos (Rodrigues, 1984; Instituto Geológico e Mineiro, 2001; Fetter, 2001). São, portanto, excluindo os glaciares e icebergs, as águas subterrâneas que apresentam maior domínio relativamente às águas superficiais.

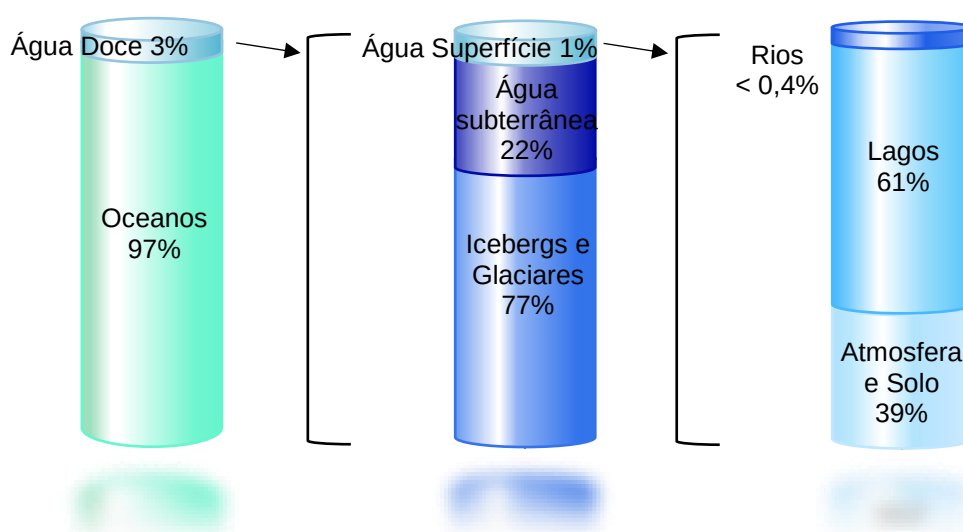


Figura 8 - Distribuição da água na terra (Adaptado de Instituto Geológico e Mineiro, 2001).

Em Portugal Continental, estima-se que as reservas de águas subterrâneas superem largamente as reservas superficiais das albufeiras. Cerca de 44% da população portuguesa do continente é servida por águas subterrâneas, por outro lado, essa percentagem nas regiões autónomas da Madeira e dos Açores são cerca de 93% e 99% respetivamente. O volume de águas subterrâneas anualmente captado para abastecimento urbano, no continente, corresponde a cerca de 37% do volume total, isto é, 399 hm³ de 1086 hm³ (Leitão, 2010).

As águas subterrâneas são o recurso geológico que mais condiciona o Ordenamento do Território pela continuidade da distribuição das rochas, onde estão contidas, pela vulnerabilidade à poluição de muitas dessas unidades hidrogeológicas e pela importância que revestem para a vida das populações e dos ecossistemas que delas dependem (Carvalho, 1999).

2.5.1. Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 9) consiste na circulação contínua de água que se inicia com a passagem da água, proveniente dos oceanos e vaporizada através da ação solar, para a atmosfera (Rodrigues, 1984). A partir daí, através da precipitação, do escoamento superficial e da circulação das águas subterrâneas, regressa novamente para os oceanos (Hiscock e Bense, 2014).

O vapor de água na atmosfera passa novamente à fase líquida e cai sobre a superfície como precipitação. Dessa água precipitada, uma parte é evaporada novamente para a atmosfera, outra escorre pela superfície para os rios, retornando assim para os oceanos e, uma outra, infiltra-se no subsolo. A água infiltrada é a que irá constituir a água subterrânea que poderá, por sua vez, ter vários caminhos, pois ela pode voltar a sair para a superfície pouco tempo depois, pode ser consumida por evaporação direta do solo, pela transpiração das plantas ou por extração do homem, ou então alimentar os reservatórios mais profundos e seguir um percurso mais longo até ao seu retorno à superfície (Rodrigues, 1984).

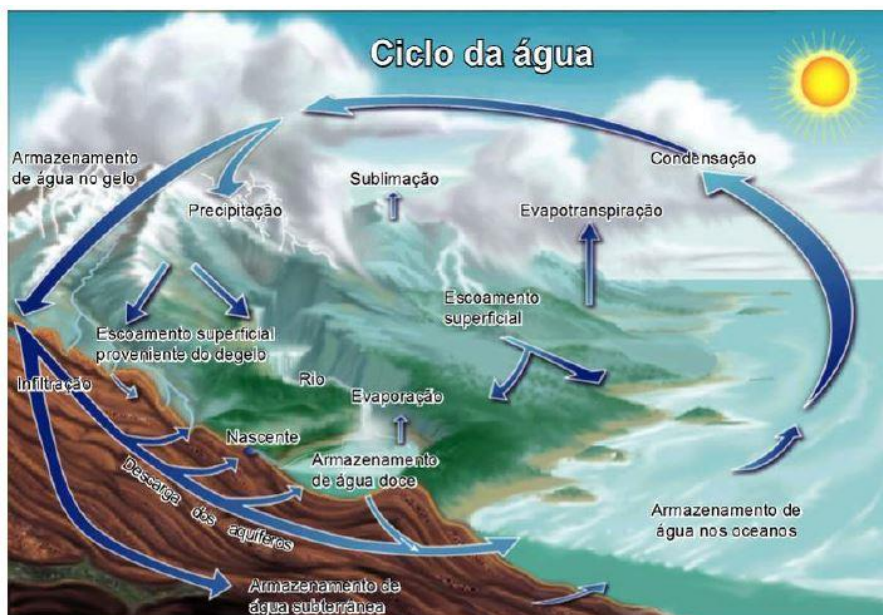


Figura 9 - Ciclo Hidrológico (Teixeira, 2011).

2.5.1.1. Circulação da água subterrânea

A água subterrânea traça um subciclo dentro do ciclo hidrológico (Silva, 2013). Este subciclo inicia-se com a recarga das águas subterrâneas que é feita através da precipitação e consequente infiltração no solo e nas rochas subjacentes, constituindo assim o escoamento subterrâneo. A precipitação é o fenómeno básico deste subciclo,

uma vez que é a origem imediata das águas subterrâneas (Rodrigues, 1984). A contínua infiltração da água leva a atingir a zona saturada das rochas, entra na circulação subterrânea e contribui para um aumento da água armazenada, isto é, contribui para a recarga dos aquíferos (Instituto Geológico e Mineiro, 2001). A quantidade de infiltração de água depende de diversos fatores, tais como (Chernicoff e Venkatakrishnan, 1995): a quantidade de precipitação; o tipo e abundância de vegetação na área; o tipo de solo e a morfologia da superfície; e as características da área topográfica.

As chuvadas muito intensas mesmo as de curta duração, resultam de um escoamento superficial elevado e reduzida infiltração de água (Rodrigues, 1984). A maior parte da água precipitada é absorvida pela vegetação ou evaporada novamente para a atmosfera, antes de chegar ao solo. Por isso, para haver uma maior infiltração de água, os terrenos têm de ter uma reduzida cobertura vegetal. Por outro lado, a infiltração de água no solo pode ser facilitada através dos caminhos abertos provocados pelas raízes das plantas e árvores (Chernicoff e Venkatakrishnan, 1995). Contudo, cerca de um quarto da água precipitada que chega à superfície evapora-se nela, circula sob a forma de fluxo ou é temporariamente armazenada em lagos ou glaciares (Chernicoff e Venkatakrishnan, 1995).

A infiltração de água é promovida pelo tamanho de espaços vazios nos solos ou rochas. Quanto maior for o tamanho dos espaços vazios, maior será a facilidade de circulação da água. Como é o caso das areias não consolidadas e do cascalho. No caso das rochas, quanto mais porosas e/ou fraturadas forem, maior será a quantidade de água infiltrada. Por outro lado, as rochas consolidadas, constituídas por um aglomerado de pequenas partículas com pequenos espaços entre si, dificultam a infiltração de água. São, por exemplo, as rochas ígneas plutónicas (granitos e dioritos) e as rochas metamórficas de alto grau (gnaisses) (Chernicoff e Venkatakrishnan, 1995).

Os terrenos pouco inclinados levam a que a água da superfície escorra lentamente, dando tempo suficiente para que se infiltre no solo. Por outro lado, nas encostas íngremes e falésias, a água da superfície escorre mais rapidamente não tendo tempo para se infiltrar e alimentar os aquíferos (Chernicoff e Venkatakrishnan, 1995).

Assim que a água se infiltra no solo e durante o seu percurso descendente, esta atravessa diversas zonas, que são elas: a zona da evapotranspiração (EVT), a zona intermédia e a zona saturada (Figura 10).

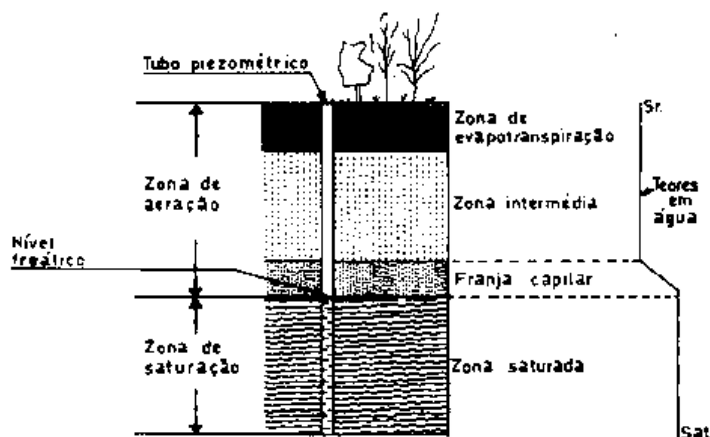


Figura 10 - Zonas de circulação da água subterrânea (Rodrigues, 1984).

A zona da evapotranspiração e a zona intermédia encontram-se na zona de aeração ou zona não saturada, isto é, na zona onde os espaços vazios dos solos ou rochas estão preenchidos por água e ar. A zona saturada inclui a zona de saturação, onde todos os espaços vazios estão preenchidos por água. O nível freático é o limite entre a zona de aeração e a zona de saturação e a franja capilar consiste na parte inferior, mais ou menos espessa, da zona de aeração (Chernicoff e Venkatakrishnan, 1995) onde a água sobe por capilaridade a partir da parte saturada (Rodrigues, 1984).

Na zona da evapotranspiração processam-se trocas com a atmosfera que podem ser por evaporação direta à superfície ou pelas plantas através do seu metabolismo, sob a forma de transpiração. Nos terrenos com vegetação, estes dois processos estão interligados e desenvolvem-se simultaneamente, pelo que é habitual reunirem-se num único termo designado por evapotranspiração (EVT). Este processo é extremamente importante para as águas subterrâneas porque ele atua no sentido de diminuir a quantidade de água acessível ao armazenamento subterrâneo (Rodrigues, 1984).

2.5.2. Aquíferos

Devido à diferente constituição e estrutura do substrato rochoso, pode-se identificar uma grande variedade de formações geológicas com capacidades diferenciadas para armazenar e transmitir água (Teixeira, 2011). Uma dessas formações geológicas são os aquíferos. Um aquífero é um reservatório de água e define-se como qualquer formação geológica subterrânea capaz de armazenar água e que permite a circulação desta através de poros, fissuras e fraturas, de modo a que a sua exploração seja economicamente rentável (Instituto Geológico e Mineiro, 2001;

Freitas, 2010). Existem essencialmente dois tipos de aquíferos, de acordo com as características hidráulicas e estruturais (Fetter, 2001; González de Vallejo *et al.*, 2002; Teixeira, 2011): aquífero livre e aquífero confinado.

Um aquífero livre é uma formação geológica saturada em água que pode estar próxima da superfície terrestre com camadas permeáveis no topo e na base (Fetter, 2001). Assim, a superfície da água subterrânea armazenada neste tipo de aquífero está à pressão atmosférica (Instituto Geológico e Mineiro, 2001; Teixeira, 2011) e o seu nível pode subir e descer livremente correspondendo ao nível freático. Este tipo de aquíferos é recarregado diretamente pela infiltração da água superficial com origem na precipitação e são, geralmente, muito vulneráveis a problemas de contaminação (Custodio e Llamas, 2001; Teixeira, 2011).

Um aquífero diz-se confinado quando a formação geológica que o constitui está limitada no topo e na base por camadas impermeáveis (Silva, 2013). Assim, a pressão da água na superfície do aquífero é superior à pressão atmosférica (Instituto Geológico e Mineiro, 2001; Teixeira, 2011).

Existem ainda três tipos de aquíferos no que diz respeito à sua estrutura: aquíferos porosos, aquíferos fraturados e/ou fissurados e aquíferos cársicos (Figura 11).

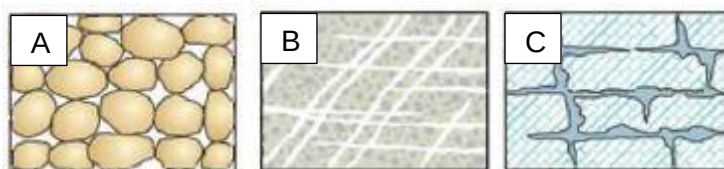


Figura 11 - Tipos de Aquíferos; A - Aquífero poroso; B - Aquífero fraturado/fissurado; C - Aquífero cársico (Adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2002).

Nos aquíferos porosos a sua permeabilidade deve-se essencialmente à sua porosidade intergranular, onde se incluem os cascalhos, areias e todos os materiais detríticos de pequenas dimensões (González de Vallejo *et al.*, 2002). A textura granular do meio permite que a água circule e se armazene entre os grãos constituintes. Contudo, uma vez que os meios porosos não são (a não ser a pequenas escalas) totalmente homogêneos, os espaços entre os grãos podem ser preenchidos por material granular mais fino dificultando a circulação e o armazenamento de água, ou até mesmo por material argiloso onde essa capacidade é praticamente nula (González de Vallejo *et al.*, 2002; Teixeira, 2011).

Os aquíferos cuja permeabilidade se deve a fissuras, falhas, fraturas e diáclases denominam-se de fissurados ou fraturados, que é o caso das rochas graníticas,

gnais, xistos, entre outras rochas cristalinas (González de Vallejo *et al.*, 2002; Freitas, 2010). A porosidade e permeabilidade destes aquíferos estão dependentes sobretudo da existência de falhas e fraturas, da sua quantidade, abertura e interconectividade (Teixeira, 2011).

Os aquíferos cársicos são geralmente pouco homogéneos e extremamente vulneráveis à poluição (Teixeira, 2011), embora possam, por vezes, apresentar uma homogeneidade mais consistente, devido a um processo de dissolução nas formações carbonatadas por ação da água, dando-se assim a carsificação (González de Vallejo *et al.*, 2002; Freitas, 2010). Caraterizam-se pela existência de cavidades, originadas pela dissolução da rocha que permitem o armazenamento e circulação da água (Teixeira, 2011). São exemplo deste tipo de aquíferos as rochas carbonatadas, nomeadamente os calcários e os dolomitos.

Considerando o conceito, tipo e estrutura do aquífero, a hidrodinâmica das águas subterrâneas resulta da junção da hidráulica com a geologia (Carvalho, 2006), isto é, os materiais geológicos controlam a capacidade da água se infiltrar, circular, ser armazenada ou extraída do subsolo (Teixeira, 2011).

Segundo Carvalho, 2006 as estruturas geológicas que condicionam o escoamento são: as paleoestruturas, as estruturas filonianas (veios, filões e diques), zonas de cisalhamentos, cavalgamentos, alternâncias de rochas de deformação frágil e o estado de deformabilidade do maciço rochoso.

2.5.3. Composição Química das Águas Subterrâneas

Nas águas subterrâneas a maioria das substâncias dissolvidas encontram-se em estado iónico (Custodio e Llamas, 2001). Estas substâncias podem ser divididas em iões fundamentais e iões menores que, por sua vez, são ambos subdivididos em aniões e catiões.

Os iões fundamentais encontram-se representados na Tabela 2, sendo aqueles que se encontram quase sempre presentes e a sua soma representa quase a totalidade dos iões dissolvidos. O resto dos iões e de substâncias dissolvidas encontram-se, no geral, em quantidades notavelmente mais pequenas que os iões anteriores e chamam-se iões menores correspondendo, habitualmente, a menos de 1% do conteúdo iónico total (também representados na Tabela 2) (Custodio e Llamas, 2001). A composição química das águas subterrâneas em rochas cristalinas é caracterizada pela baixa concentração de iões menores (Hiscock e Bense, 2014).

Tabela 2 – Iões fundamentais e Iões menores.

Iões fundamentais		Iões menores	
Catiões	Aniões	Catiões	Aniões
Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺	NO ₃ ⁻
Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Fe ²⁺	NO ₂ ⁻
Mg ²⁺	CO ₃ H ⁻	NH ₄ ⁺	F ⁻
		Sr ²⁺	CO ₃ ²⁻

Existem, ainda, gases considerados como fundamentais, tais como o dióxido de carbono (CO₂) e o oxigénio (O₂). Entre as substâncias dissolvidas, pouco iónicas ou coloidais, é importante destacar os ácidos e aniões derivados da sílica (SiO₂).

As águas subterrâneas doces contêm um máximo de 1000 a 2000 ppm de substâncias dissolvidas (Silva, 2013). As substâncias dissolvidas mais importantes nas águas subterrâneas apresentam variadas concentrações e diferentes valores máximos recomendáveis (VMR) de acordo com Anexo I do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto, representados resumidamente na Tabela 3 e 4:

Tabela 3 - Concentrações e VMR dos catiões.

Iões	Concentrações em	
	água doce (ppm)	VMR
	<u>Catiões</u>	
Sódio (Na ⁺)	1 a 150	0,2
Potássio (K ⁺)	0,1 a 10	10
Cálcio (Ca ²⁺)	10 a 250	100
Magnésio (Mg ²⁺)	1 a 100	30
Manganês (Mn ²⁺)	<0,2	20
Amoníaco (NH ₄ ⁺)	<0,1	-
Alumínio (Al ³⁺)	0,005 a 0,3	-

Tabela 4 - Concentrações e VMR dos aniões.

iões	Concentrações em água doce (ppm)	VMR
<u>Aniões</u>		
Cloro (Cl⁻)	10 a 250	200
Sulfato (SO₄⁻)	2 a 150	150
Bicarbonato e Carbonato (CO₃H⁻ e CO₃²⁻)	Bicarbonato: 50 a 350	-
Nitrato (NO₃⁻)	0,1 a 10 (em águas poluídas pode chegar a 200 ppm)	25
Fluoreto (F⁻)	0,1 a 1	0,7-1,0
Boro (B³⁺)	<0,1	1,0
Sulfureto (S²⁻)	<1	-

Desde sua infiltração no subsolo, a água vai dissolvendo alguns componentes minerais, constituintes das rochas envolventes, dando origem à formação de aquíferos de composição química diversa. Aprisionada nas formações geológicas, a água atua sobre as rochas com que está em contacto direto, enriquecendo a sua composição química com os elementos que se vão dissolvendo (Carapeto, 1999). É por isso que as águas subterrâneas são mais mineralizadas do que as águas superficiais (Instituto Geológico e Mineiro, 2001).

As interações químicas e bioquímicas que ocorrem entre as águas subterrâneas e os materiais geológicos dos solos e rochas, resulta de uma grande variedade de constituintes orgânicos e inorgânicos dissolvidos na água (Hiscock e Bense, 2014). Os compostos orgânicos estão geralmente presentes nas águas subterrâneas em concentrações muito reduzidas, como resultado da oxidação da matéria orgânica, durante a infiltração no solo (Hiscock e Bense, 2014).

A lixiviação dos diferentes produtos de meteorização depende não só da taxa de meteorização do mineral, mas também das condições hidrológicas (Hiscock e Bense, 2014). Em climas relativamente secos a taxa de lixiviação nos solos é baixa e, por outro lado, em climas tropicais com chuvas intensas e sob condições bem drenadas, ocorre um aumento da taxa de lixiviação. Assim, devido aos diferentes tipos de permanência dos diferentes minerais, a concentração de iões dissolvidos é elevada em condições com climas secos e baixa em condições tropicais com chuvas intensas.

2.5.4. Propriedades Físicas das Águas Subterrâneas

As águas subterrâneas apresentam várias características físicas, entre elas destacam-se a temperatura, a condutividade elétrica e o pH.

A temperatura é o potencial calorífico que está relacionado com uma origem, como por exemplo a temperatura de fusão no gelo. É medida em graus centígrados ou Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ou ainda em Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) nos países anglo-saxónicos. A temperatura das águas subterrâneas é pouco variável e corresponde à média anual das temperaturas atmosféricas locais, aumentada pelo produto da profundidade e pelo gradiente geotérmico (Custodio e Llamas, 2001; Silva, 2013). A sua temperatura ronda os 12° a 15°C exceto quando se trata de águas minerais.

A condutividade elétrica define-se como a capacidade que a água tem para conduzir eletricidade e mede-se em microsiemens por centímetro (μScm^{-1}) (Custodio e Llamas, 2001). É inversamente proporcional à resistência elétrica numa proporção de 1 cm^3 de água. Está intimamente ligada ao total de sólidos dissolvidos, pois é função das concentrações de todos os solutos iónicos (Fitts, 2002), o que permite a avaliação expedita do grau de mineralização de uma água, devido à relação entre o teor em sais minerais dissolvidos e a resistência que ela oferece à passagem da corrente elétrica (Teixeira, 2011).

A água no seu estado puro tem normalmente uma condutividade muito baixa, mas uma vez que a água subterrânea é uma solução eletrolítica com componentes dissolvidos presentes na forma iónica, a medição da condutividade elétrica está dependente da quantidade de sais dissolvidos. Assim, as águas subterrâneas têm uma condutividade na ordem dos $100\text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$. Dado que a atividade iónica e, portanto, a condutividade elétrica, aumenta com a temperatura a uma taxa de cerca de 2% por $^{\circ}\text{C}$, as medições geralmente são normalizadas para uma temperatura específica de 25°C (Hiscock e Bense, 2014).

A água tem uma ligeira tendência para se ionizar pois, uma pequena percentagem das moléculas de H_2O dissociam-se em hidrogénio (H^+) e hidróxido (HO^-) (Fitts, 2002). O pH da água é definido como o logaritmo do inverso da concentração do ião H^+ : $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ e representa o comportamento ácido e básico da solução (Fitts, 2002; Silva, 2013). A uma temperatura de 25°C , para um valor de pH igual a 7 a água é neutra; para um pH menor que 7, a água é ácida e para valores de pH superiores a 7, a água é básica ou alcalina (Teixeira, 2011). As águas subterrâneas possuem pH entre 5,5 e 8,5, sendo conhecidos casos com valores inferiores e superiores a estes limites

(Rodrigues, 1984). Em alguns casos o pH pode excecionalmente variar entre 3 e 11 (Silva, 2013).

2.6. Poluição e contaminação das águas subterrâneas

A água nunca é totalmente pura, pois não só contém alguns gases e sólidos dissolvidos na sua constituição, como também, possui a capacidade de dissolver, virtualmente, qualquer substância, sendo por isso, um excelente solvente universal (Rodrigues, 1984; Domenico e Schwartz, 1990, 1998; Carapeto, 1999; Fetter, 2001; Instituto Geológico e Mineiro, 2001; Fitts, 2002; Rivett *et al.*, 2006; Freitas, 2010;). A sua qualidade é determinada pela concentração e o tipo de gases e sólidos dissolvidos e ainda pela matéria em suspensão, constituindo, assim, uma consequência do estado físico e químico da água e de quaisquer alterações que possam ocorrer devido à atividade humana. Assim, a qualidade da água é um parâmetro fundamental na determinação da qualidade geral das nossas vidas (Fetter, 2001).

A proteção das águas subterrâneas é um problema tanto qualitativo como quantitativo, ou seja, é tão importante proteger os aquíferos da contaminação por poluentes como do seu uso exagerado e, consequentemente, do seu esgotamento. Ambas as circunstâncias podem levar à sua destruição como recurso natural de água potável (Carapeto, 1999). No que diz respeito ao primeiro caso, diz-se que a água está poluída ou contaminada quando ocorre a degradação da sua qualidade devido à atividade humana, de tal modo que a torna imprópria para consumo ou para o ecossistema em que se inclui (Fetter, 2001; Instituto Geológico e Mineiro, 2001; González de Vallejo *et al.*, 2002; Fitts, 2002; Freitas, 2010). Isto é, quando a concentração dos constituintes, quer os sólidos dissolvidos, quer os sólidos em suspensão, é mais elevada do que as concentrações máximas admissíveis formuladas por normas nacionais ou internacionais para fins de consumo, industriais ou agrícolas (Hiscock e Bense, 2014).

A contaminação das águas subterrâneas ocorre quando os produtos residuais das diferentes atividades humanas alcançam o aquífero, provocando a presença ou o aumento de determinadas substâncias características de cada uma dessas atividades (González de Vallejo *et al.*, 2002).

A atividade humana introduz modificações muito significativas e muito diversificadas na composição das águas subterrâneas, por isso, esta é influenciada não só pela atividade do homem, mas também por outros fatores, tais como: a natureza e a

quantidade de gases na atmosfera, os produtos resultantes da alteração das rochas, as reações de dissolução e de precipitação que ocorrem no subsolo e a própria vegetação.

De um ponto de vista geral, as águas subterrâneas estão mais protegidas face à contaminação do que as águas superficiais, no entanto, aquelas águas não têm capacidade de auto purificação, tais como as águas superficiais, pelo que a sua contaminação, uma vez efetuada, pode ser considerada quase permanente, tendo em conta a escala de tempo necessária para a sua recuperação. O facto de as águas subterrâneas não terem a capacidade de auto purificação pode ser explicada por diversos fatores associados à natureza destas águas. Primeiro, o fluxo das águas subterrâneas é extremamente lento e, por isso, não permite a diluição e dispersão dos contaminantes que se verifica quando os fluxos são turbulentos. Segundo, devido ao facto de os aquíferos se encontrarem isolados do aumento de oxigénio atmosférico, não existem grandes populações de bactérias aeróbias que efetuem a decomposição dos contaminantes. Por último, a baixa temperatura a que as águas subterrâneas estão sujeitas, retardam as reações de decomposição que possam existir (Carapeto, 1999).

A dispersão da contaminação no subsolo depende da geologia do local, das propriedades físico-químicas dos contaminantes e da vulnerabilidade do aquífero (Fitts, 2002; Hiscock e Bense, 2014). A dispersão dos contaminantes segue o trajeto da circulação das águas subterrâneas, desde a sua infiltração no subsolo até atingir o aquífero.

Na superfície do terreno a contaminação ocorre com o arraste de contaminantes e o seu movimento depende do movimento da água. A natureza litológica e a espessura do terreno têm um papel fundamental na propagação da contaminação, uma vez que podem atuar como um filtro físico que retém os microrganismos e os sólidos em suspensão, sendo estes últimos importantes para os processos físico-químicos que se processam na zona não saturada (González de Vallejo *et al.*, 2002). Se o terreno se tratar de um solo, a dispersão da contaminação é influenciada pela sua textura, permeabilidade e o seu conteúdo em matéria orgânica (Casarini *et al.*, 2004). Por outro lado, se o substrato for rochoso, a dispersão dos contaminantes dependerá das características físicas do material rochoso como, por exemplo, da sua fracturação ou alteração.

Porém, há substâncias que não ficam retidas nas sucessivas camadas do subsolo que a água atravessa no seu movimento descendente, mesmo quando existem boas condições para tal acontecer. De facto, os poluentes como os nitratos, o sal das

estradas, a gasolina, o solvente de limpeza tricloroetileno e o produto de limpeza a seco percloroetileno, não são filtrados pelas partículas do solo (Carapeto, 1999).

A vulnerabilidade do aquífero consiste nas propriedades intrínsecas dos estratos que se sobrepõem ao aquífero, determinando a sensibilidade com que este possa ser afetado negativamente pela carga de poluentes (Chilton, 2006). Quando a permeabilidade do subsolo é inadequada, ou o lençol de água é muito superficial, não existindo por isso uma camada de solo ou rocha suficientemente espessa a protege-lo (Carapeto, 1999), o aquífero fica mais vulnerável. Assim, são considerados aspetos fundamentais da vulnerabilidade o tipo de aquífero (livre e confinado), a profundidade do nível da água e as características dos estratos na zona não saturada, em termos de grau de consolidação e litologia (CETESB, 2018). Por isso, um aquífero não confinado, pouco profundo e permeável é um aquífero mais suscetível de ser contaminado (Carapeto, 1999).

Nas águas subterrâneas, quando são contaminadas, a deteção e monitorização da contaminação é não só difícil como dispendiosa e demorada e, por isso, a melhor solução para proteger este recurso natural é evitar a sua poluição. No entanto, a monitorização e a deteção procedem-se através da existência de vários poços de teste, de onde se retiram amostras para análise e controle e se determina o fluxo e direção do movimento destas águas. Uma vez detetada a contaminação, pode-se optar por bombear a água para a superfície, proceder à sua descontaminação e devolve-la novamente ao aquífero (Carapeto, 1999).

2.6.1. Fontes de contaminação

As fontes de poluição podem ser classificadas quanto a sua génese, perigosidade e geometria. Quanto à sua génese as fontes podem ser pontuais ou difusas em função da área contaminada, sendo geralmente de origem urbana, industrial ou agrícola (González de Vallejo *et al.*, 2002). Assim, as fontes poluidoras pontuais são fontes que se localizam em áreas de pequena dimensão. São exemplos deste tipo de fontes as atividades urbanas, industriais e domésticas. As fontes difusas, ou não pontuais, são fontes que estão dispersas por áreas de maiores dimensões (Carapeto, 1999), que é o caso das atividades agrícolas.

Quanto à sua perigosidade as fontes podem ser inertes, não inertes ou reativas. No que diz respeito à sua geometria as fontes podem ser do tipo A, B ou C. Os poluentes

do tipo A são todos aqueles que se encontram à superfície, por exemplo, os carros, os depósitos de resíduo, as unidades industriais, as sucatas, etc.

Outros poluentes desse tipo são os fertilizantes e pesticidas aplicados em parques, jardins e campos agrícolas, que são uma das potenciais fontes de contaminação, e de certo modo mais significativas. A aplicação de fertilizantes e de pesticidas contém compostos químicos, como os nitratos, que podem afetar vastas áreas aflorantes e podem causar a contaminação dos aquíferos (Carapeto, 1999; Hiscock e Bense, 2014). Os nitratos são, em Portugal, um problema crescente tanto em extensão como em intensidade e persistência (Instituto Geológico e Mineiro, 2001).

Os materiais das próprias estradas e infraestruturas aeroportuárias podem ser também considerados como poluentes do tipo A, pois substituem os solos existentes no local, gerando um comportamento diferente em termos hidrológicos, levando à diminuição da recarga natural e, nalguns casos em que os aquíferos são superficiais, alteração da própria geometria dos aquíferos (Hiscock e Bense, 2014; Leitão, 2010). Em termos da deterioração da qualidade hídrica, há um conjunto de contaminantes (metais pesados, hidrocarbonetos, partículas em suspensão, matéria orgânica e nutrientes) que são gerados pelas estradas, pelos aeroportos e pelo tráfego associado, cuja libertação para o ambiente se faz essencialmente através das águas de escorrências das estradas, sendo esta o mais importante processo de transporte dos contaminantes (Leitão, 2010).

Os poluentes do tipo B são todos aqueles que se encontram entre a superfície e o nível freático, que é o caso dos sistemas de saneamentos, dos depósitos enterrados das bombas de gasolina, dos cemitérios, etc.

As unidades cemiteriais são uma fonte potencial de contaminação, uma vez que podem ser entendidas conceitualmente como uma espécie de intervenção de um aterro especial que é fortemente influenciado pela variação temporal e espacial das práticas dos cemitérios (Hiscock e Bense, 2014).

Os aterros podem ser considerados também como um poluente do tipo B e englobam uma vasta gama de instalações que abrigam diversos contaminantes potenciais. Dependendo do aterro, o seu conteúdo pode incluir resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos de construção-demolição (RCD) ou resíduos industriais. Os aterros sanitários de RSU, que são os mais comuns, lidam com os resíduos domésticos (Fitts, 2002).

Segundo o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos para o período de 2007 a 2016 (PERSU II), (2007) e os dados obtidos pelo Sistema de Gestão da Informação sobre Resíduos (SGIR), a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), em Portugal Continental, atingiu as 4,5 milhões de toneladas em 2005, isto é, cerca de 1,24 kg/(hab.dia) (Leitão, 2010).

Os resíduos depositados em aterros industriais e RCD incluem uma variedade de metais, ácidos, compostos orgânicos voláteis e pesticidas que, não sendo depositados devidamente, podem igualmente contaminar os recursos hídricos subterrâneos por processos de lixiviação. Com alguma frequência os aterros servem para a rejeição de resíduos municipais e industriais, em conjunto (Carapeto, 1999).

Por último, os poluentes que se encontram abaixo do nível freático, correspondem aos poluentes do tipo C, de que podem ser exemplo as explorações mineiras subterrâneas.

As atividades mineiras e os poços de injeção são fontes de contaminação que estão associadas às atividades industriais. A atividade extrativa é uma das fontes de contaminação tanto das águas superficiais como das águas subterrâneas. A água subterrânea que circula através de zonas rochosas mineralizadas pode conter uma quantidade excessiva de metais pesados (Fetter, 2001). O lixiviado ácido, por sua vez, pode mobilizar vários metais a partir de formações complexas (Fitts, 2002).

Para além disso, esta atividade tem ainda outros aspetos a afetar o meio hídrico subterrâneo, nomeadamente a interseção e rebaixamento do nível freático e a construção de aterros e escombreyras como depósitos de resíduos resultantes da sua exploração, como descrito anteriormente.

2.7. Gestão e monitorização das águas subterrâneas

O desenvolvimento sustentável do século XXI assenta na disponibilidade da água doce potável. Por isso, esta deve ser gerida de forma apropriada, isto é, baseada nas melhores opções técnicas disponíveis e nos conhecimentos científicos apropriadamente aplicados no contexto das necessidades socioeconómicas da população. A manutenção da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos é o aspeto fundamental da gestão da água (Leitão, 2010). O Decreto-Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, também conhecido como Lei da Água, estabelece o regime jurídico

relativo ao enquadramento para a gestão de águas superficiais, designadamente as águas interiores, de transição e costeiras, e das águas subterrâneas.

Sendo os recursos hídricos subterrâneos, os que constituem uma das maiores reservas de água doce no estado líquido do planeta, torna-se, também, fundamental a sua gestão. O Decreto-Lei n.º 208/2008, de 28 de Outubro estabelece o regime jurídico de proteção das águas subterrâneas contra a poluição e deterioração, transpondo a Diretiva n.º 2006/118/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de Dezembro, relativa à proteção desse mesmo recurso contra a poluição e deterioração, regulamentando o artigo 47º da Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro (Lei da Água), no respeitante à avaliação do estado químico da água subterrânea.

As águas subterrâneas representam as massas de água doce mais sensíveis e importantes da União Europeia, sendo uma fonte essencial de abastecimento público de água potável em muitas regiões e devendo ser protegidas de forma a evitar a deterioração da qualidade, a fim de reduzir o nível de tratamento de purificação necessário à produção de água potável. Para isso, deverão ser adotadas medida de prevenção e controlo da poluição, bem como, normas e metodologias, que incluem critérios para a avaliação do seu bom estado químico para a identificação de tendências significativas e persistentes do aumento da concentração de poluentes (Decreto-Lei n.º 208/2008, de 28 de Outubro).

Tal como foi referido nos subcapítulos anteriores, as águas subterrâneas são parte integrante do ciclo hidrológico e por isso a deterioração da sua qualidade pode afetar diretamente os meios hídricos superficiais e os ecossistemas associados. Neste aspeto, a sua gestão e controlo da contaminação são geralmente relegados para segundo plano, devido à invisibilidade do recurso e o extenso período de tempo decorrido entre a sua deficiente gestão e os efeitos nefastos por ela causados (Leitão, 2010).

Contudo, existe um processo de recolha e processamento de informação sobre as várias componentes do ciclo hidrológico e elementos de qualidade para a classificação do estado das águas (Decreto-Lei n.º 130/2012, de 22 de Junho), de modo a controlar e evitar possíveis contaminações nos recursos hídricos. Este processo designa-se de monitorização e é garantido pela autoridade nacional da água, coordenando tecnicamente os procedimentos e as metodologias a observar.

As principais razões para a monitorização das águas subterrâneas são: determinar a qualidade e composição química da água numa região; determinar a

qualidade e composição química da água num determinado poço de abastecimento de água; determinar a extensão da contaminação da água provocada por uma fonte conhecida; e monitorizar uma potencial fonte de contaminação para determinar a possibilidade de a água ser contaminada (Fetter, 2001).

Para cada região hidrográfica devem ser definidas redes de recolha de dados para monitorização de variáveis biológicas, hidrológicas e climatológicas, físico-químicas, de sedimentos e da qualidade química e ecológica da água. Para isso, existe um programa nacional de monitorização do estado dos recursos hídricos e zonas protegidas que permite uma análise coerente e exaustiva desse estado, assegurando a homogeneidade e o controlo da qualidade. No caso das águas subterrâneas o programa deve incluir a monitorização do estado químico e do estado quantitativo (Decreto-Lei n.º 130/2012, de 22 de Junho).

Existe ainda o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto que estabelece normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. Mais recentemente foi publicado o Decreto-Lei n.º 306/2007 que veio revogar, ainda que parcialmente, o Decreto-Lei 236/98. Contudo, muito do articulado presente no decreto mais antigo mantêm-se atual, em particular a definição dos critérios de qualidade da água para diferentes utilizações.

O papel das águas subterrâneas, como um recurso dinâmico, na gestão dos recursos hídricos visa, não só, a análise global do ciclo hidrológico e os aquíferos como uma componente hidrológica significativa e integrante das bacias hidrográficas, como também a conceção vasta das dimensões económicas, sociais e ecológicas, em especial daquelas que estão relacionadas com o seu uso e as suas consequências (Leitão, 2010).

No que diz respeito especificamente às pedreiras, a emissão da Declaração de Impacte Ambiental (DIA) permite às entidades, nomeadamente à Comissão de Acompanhamento (CA), estabelecer planos de monitorização que permitem verificar a execução das medidas de minimização. Esses planos dependem da tipologia das pedreiras, da sua envolvente, dos fatores ambientais mais afetados e dos valores ambientais presentes. Assim, os planos de monitorização devem indicar os parâmetros físico-químicos e os tipos de poluentes a avaliar, a periodicidade e frequência de monitorização, as técnicas e métodos, os locais a monitorizar e a legislação base (Leitão *et al.*, 2008; Afonso e Sousa, 2012).

3. Caso de estudo: a pedreira da Madalena, Vila Nova de Gaia

A pedreira da Madalena, ou pedreira da Quinta do Moinho (Figura 12), consiste numa exploração a céu aberto, por desmonte em bancadas, cuja atividade teve início em 1971. Baseou-se na produção de granito para diversas aplicações, nomeadamente balastro para os Comboios de Portugal (C.P.), blocos para obras portuárias e de defesa costeira e, ainda, materiais de diversas granulometrias para inúmeros trabalhos de construção civil e obras públicas (Pereira *et al.*, 2000).



Figura 12 - Pedreira da Madalena no ano de 2015 delimitada a vermelho (Fonte Google Earth).

O granito explorado e produzido nesta pedreira corresponde ao maciço granítico de Lavadores que, já desde a década de 1950, tem sido explorado noutras antigas pedreiras da Madalena, para a produção de paralelepípedos, cubos, guias para passeios e jardins, pedra em bruto para trabalhos artísticos e outros artefactos que se destinavam principalmente aos países do norte da Europa (Bélgica, Holanda, Reino Unido, Alemanha, Dinamarca, Suécia, Noruega e Suíça), mas também para o Brasil (Amaro, 2009; Rebelo *et al.*, 2015). Durante a Segunda Guerra Mundial, algumas das cidades destruídas foram reconstruídas, também, com pedra azul extraída das pedreiras da Madalena (Vitorino, 2006; Rebelo *et al.*, 2015). Este granito pode ainda ser considerado, na sua fácies mais fina, como a rocha-mãe do material caulínico explorado no barreiro da Telheira (Coelho, 2006).

Uma vez que a zona de escavação se aproximava da cota mínima autorizada por lei, em 1996, a SOLUSEL (Sociedade Lusitana de Obras e Empreitadas, Lda.), empresa proprietária e detentora do diploma de licença de exploração, obteve das tutelas autorização para que a pedreira funcionasse, em simultâneo com a sua atividade, como aterro de resíduos inertes, mas só a partir de 2000 é que passou a receber inertes de múltipla natureza, resultantes quer da demolição de edificações industriais e blocos habitacionais, quer de escavações (solos e rochas) efetuadas com finalidades diversas (Pereira *et al.*, 2000).

Para prever e controlar eventuais efeitos negativos, associados ao facto de a pedreira funcionar como local de aterro, a empresa procurou analisar aspetos geológicos, estruturais e hidrogeológicos no maciço de exploração, bem como exercer um controlo rigoroso sobre a qualidade e quantidade da carga a depositar, nomeadamente deposição abusiva de materiais orgânicos ou outros que possam, por lixiviação, constituir-se em emissores de metais pesados ou de contaminantes químicos perigosos de qualquer outra índole (Pereira *et al.*, 2000).

Em 2013 parou-se com a extração de rocha granítica (Rebelo *et al.*, 2015), estando a pedreira, desde o início deste século a ser explorada como um aterro para resíduos inertes.

3.1. Localização Geográfica

A área em estudo localiza-se na freguesia de Canidelo, pertencente ao concelho de Vila Nova de Gaia, distrito do Porto. A cidade de Vila Nova de Gaia situa-se na margem noroeste de Portugal, na zona costeira do Douro Litoral, limitada a norte pelo concelho de Porto, a este pelo concelho de Gondomar, a sul pelos concelhos de Santa Maria da Feira e Espinho e a oeste pelo oceano Atlântico (Monteiro, 2008) (Figura 13). O concelho de Vila Nova de Gaia é constituído por 24 freguesias entre as quais, junto à orla costeira a 5 km da sede do concelho, situa-se a freguesia de Canidelo com 8,931 km² de área.



Figura 13 - Localização geográfica do concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a área em estudo, representada a vermelho no excerto da folha 122 da carta Militar de Portugal na escala 1/25 000, editada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1999 (A) e no Google Earth (B).

3.3. Enquadramento Geomorfológico e Geológico

A geomorfologia da região de Vila Nova de Gaia é caracterizada por uma zona aplanada, cujos relevos principais ocorrem segundo um alinhamento NW-SE, desde a área da Arrábida (Porto) e da Afurada (Vila Nova de Gaia) até à área de Santo Ovídio. Insere-se, assim, numa plataforma relativamente larga (plataforma litoral ou relevo marginal) (Figura 14) que se estende para norte e desce, suavemente, para o mar a ocidente e a sul (Araújo *et al.*, 2003; Monteiro, 2008).

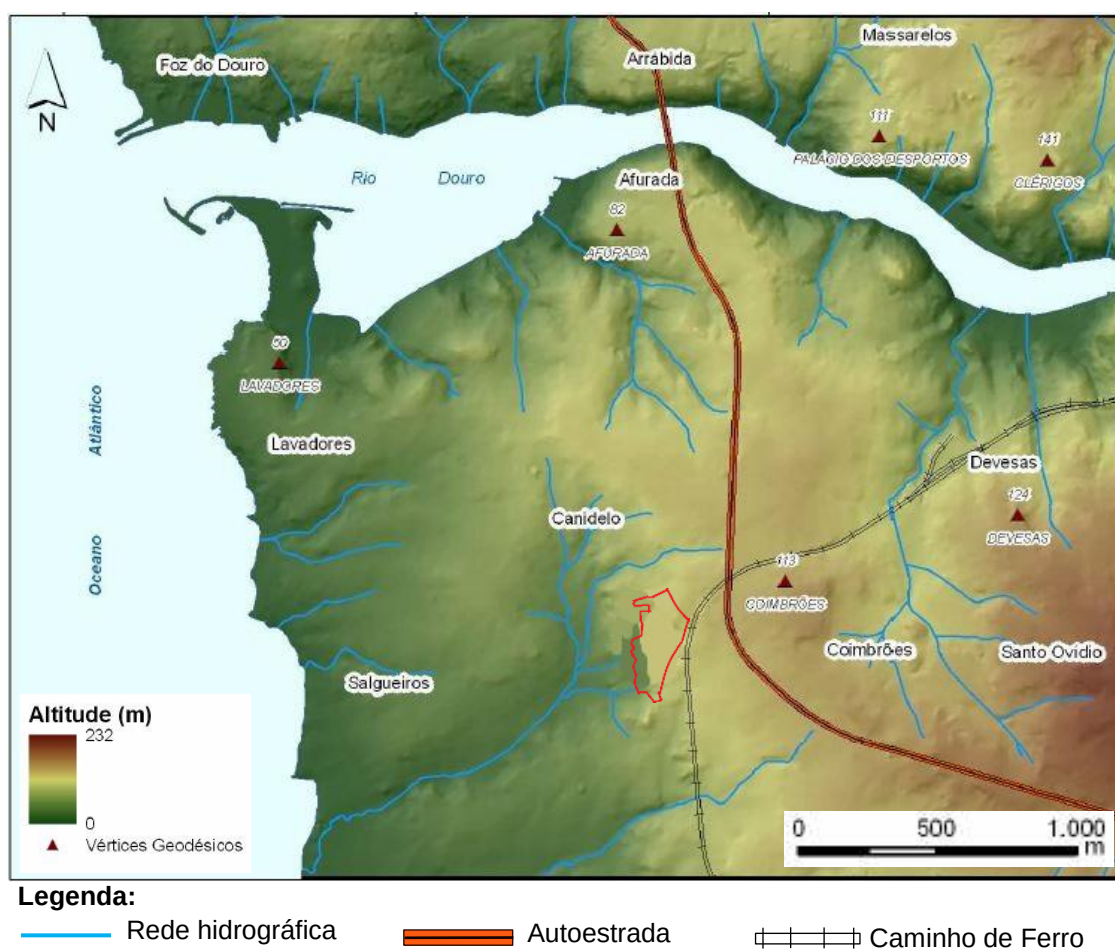


Figura 14 - Localização da área em estudo, em modelo digital de terreno da área a sul da Foz do Douro (Adaptado de Monteiro, 2008).

A região de Vila Nova de Gaia localiza-se num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico, isto é, ao longo da faixa de cisalhamento de Porto – Albergaria-a-Velha – Coimbra – Tomar, com direção geral NNW-SSE (Chaminé, 2000; Monteiro, 2008) (Figura 15). Esta faixa engloba unidades tectonoestratigráficas, de idade proterozoica média-superior a paleozoica média-superior, fazendo parte da Zona Ossa Morena (ZOM) do terreno autóctone Ibérico inserido na Cadeia Varisca Ibérica, contactando a oriente com a Zona Centro Ibérica (ZCI) (Chaminé *et al.*, 2003; Araújo, *et al.*, 2003).

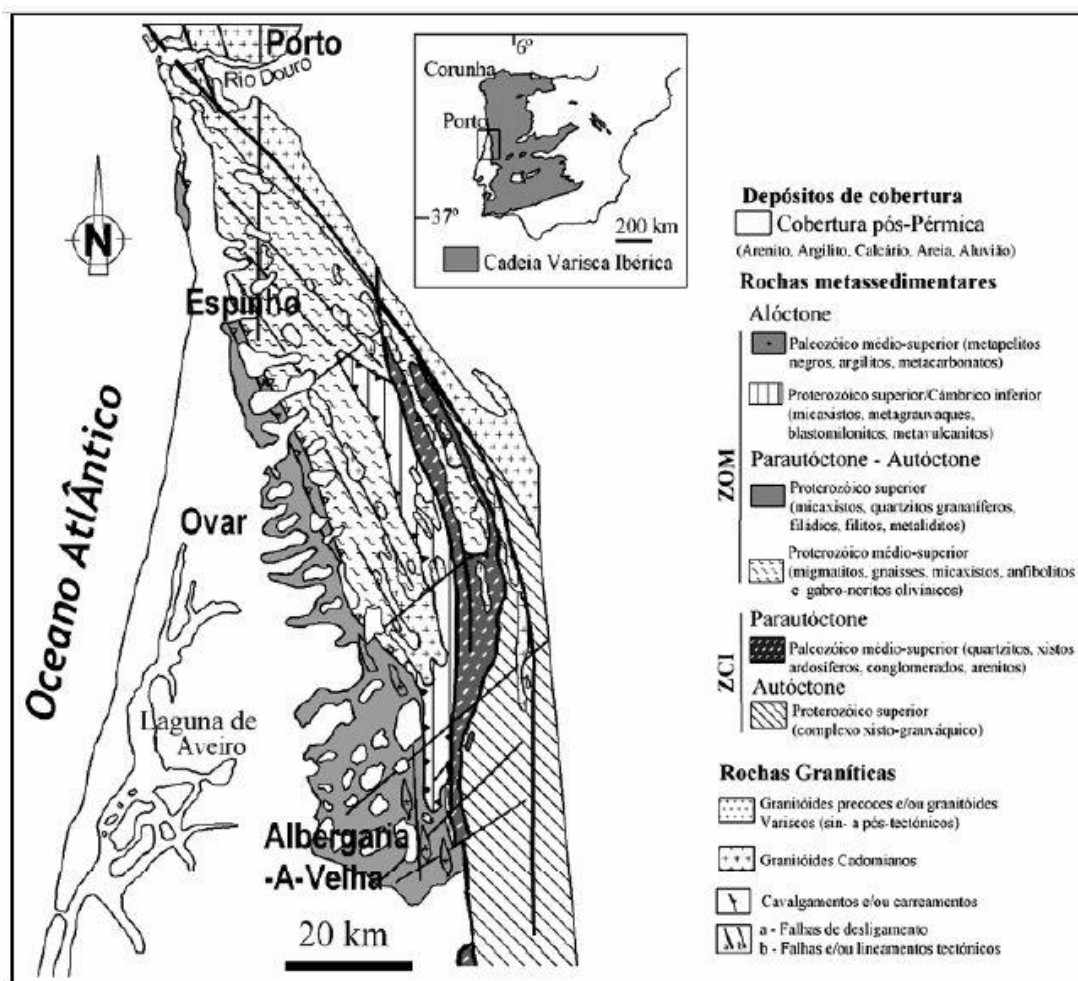


Figura 15 - Esboço geotectónico regional da faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha, no setor entre a cidade de Vila Nova de Gaia e Aveiro (Chaminé, 2000).

No Maciço Ibérico, a evolução tectónica posterior é imposta pela orogenia Alpina correspondendo à reativação das falhas tardi-variscas e, como consequência, estará na origem dos atuais traços morfoestruturais da região (Monteiro, 2008).

A Zona Centro Ibérica é o segmento da cadeia varisca europeia onde as rochas graníticas afloram em maior extensão e apresentam uma grande diversidade tipológica,

devido ao facto de durante o orógeno Varisco terem ocorrido três fases de deformação, designadas por D1, D2 e D3 (Ferreira *et al.*, 1987 *in* Azevedo e Valle Aguado, 2013; Rebelo *et al.*, 2015). O plutonismo granítico, de idade varisca na ZCI, ocorreu em fases relativamente tardias da orogenia e está relacionado com a última fase de deformação dúctil D3 (Ferreira *et al.*, 1987 *in* Azevedo e Valle Aguado, 2013; Rebelo *et al.*, 2015).

Segundo Ferreira *et al.*, 1987, os granitoides relacionados com a fase D3 podem ser classificados estrutural e geocronologicamente como sin-D3 e tardi a pós-D3 (Figura 16). Os granitos sin-D3 são granitos que se formaram durante a terceira fase de deformação e constituem extensos complexos batolíticos, que incluem a maior parte dos granitos e leucogranitos peraluminosos de duas micas. Os granitos tardi a pós-D3 são granitos que se formaram posteriormente ou em fases tardias da terceira fase de deformação e constituem frequentemente os granitoides circunscritos biotíticos, biotítico-moscovíticos e de duas micas por vezes porfiroides.

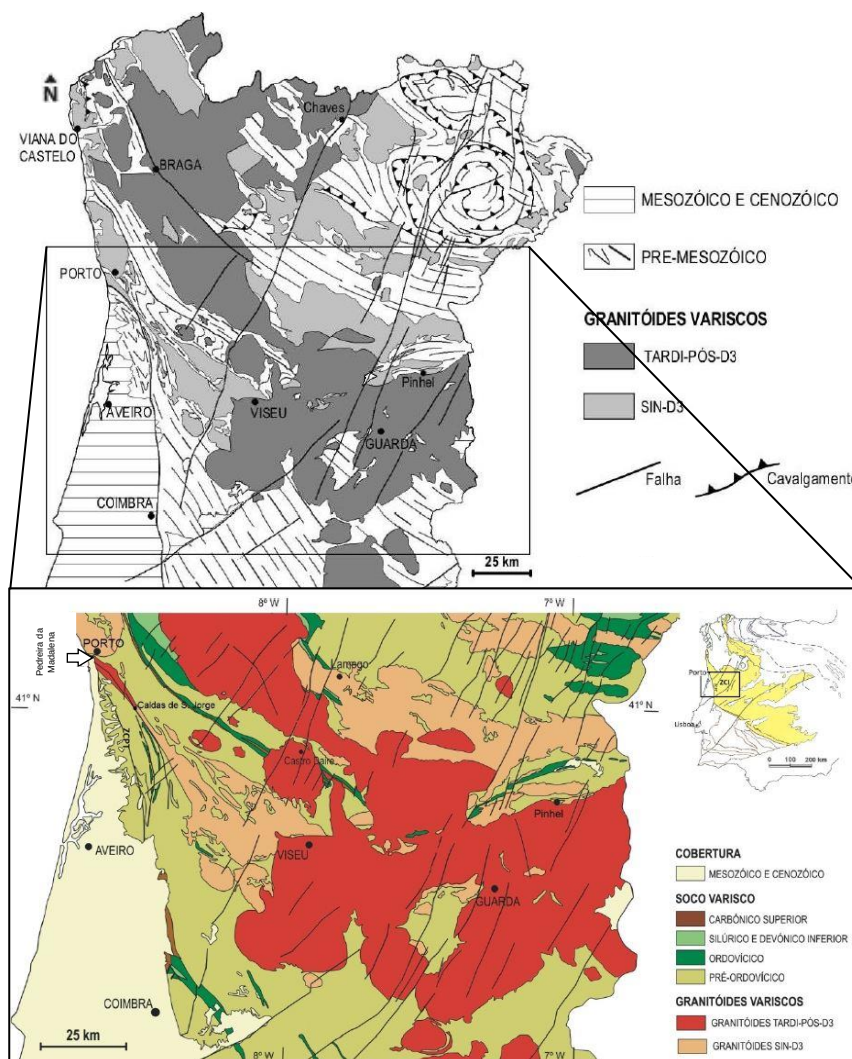


Figura 16 - Distribuição dos granitoides variscos sin-D3 e tardi-pós-D3 na Zona Centro-Ibérica com realce para a localização da pedreira da Madalena (Adaptado de Azevedo e Valle Aguado, 2013).

A área de Vila Nova de Gaia apresenta três fácies representativas em termos cartográficos: i) o granito do Porto (granito de duas micas de grão médio); ii) o granito da Arrábida e da Afurada (granito de duas micas de grão médio a fino) iii) e o granito de Lavadores (granito porfiroide, de grão grosseiro).

O maciço granítico de Lavadores, onde se encontra implantada a área de estudo, é um granito tardi a pós-orogénico, que se insere na Zona Centro Ibérica (ZCI) sob a forma de um batólito de secção elíptica alongada na direcção NW-SE. Estende-se entre a Foz do Douro (praia de Lavadores, Canidelo) e as Caldas de S. Jorge, numa extensão de aproximadamente 20 km por 4 km de largura máxima, dando aparente continuidade cartográfica ao granito sin-D3 que ocupa a antiforma Porto-Viseu (Canilho, 1975; Chaminé, 2000; Pereira *et al.*, 2000; Rebelo *et al.*, 2015).

A forma sub-elíptica deveu-se à conjugação de fenómenos distensivos associados ao relaxamento de tensões variscas na fase de reequilíbrio isostática no final do orógeno e, ainda, ao facto de a sua intrusão ter aproveitado a grande zona de fraqueza correspondente à sutura Cadomiana que, a Sul do Porto, estabelece a divisória entre o Complexo xisto-grauváquico (ZCI) e o Pré-câmbrico da Formação de Lourosa (ZOM). Durante a orogenia varisca, esta sutura é retomada com movimento transcorrente dextro, materializando a Zona de Cisalhamento de Porto-Tomar (ZCPT) (Pereira *et al.*, 2000). É devido ao controlo por esta estrutura que o maciço de Lavadores não se apresenta circunscrito como os outros granitoides tardi a pós-orogénicos (Rebelo *et al.*, 2015).

Tendo em vista a classificação estrutural e geocronológica do maciço, existem diversos estudos petroquímicos que determinam a sua idade de instalação. Ribeiro *et al.*, 2006, afirma que, segundo estudos feitos por Martins *et al.*, 2001 a idade de instalação do granito de Lavadores é de 298 ± 12.3 Ma, embora, em trabalhos anteriores, tenham sido obtidas idades um pouco mais antigas, nomeadamente, 346 ± 14 Ma para a biotite presente no granito de Lavadores datada por Mendes, 1967/1968, e 314 ± 11 Ma para o granito de Lavadores por análise isotópica Rb-Sr (RT) rocha total, executada por Silva, 1995.

Macroscopicamente, o granito de Lavadores é um granito biotítico, de grão médio a grosseiro, sem deformação visível. Apresenta uma textura porfiroide e cor azulada ou rósea, com esparsos megacristais de microclina rósea em regra euédrica.

Mostra estruturas de fluxo magmático como, por exemplo, alinhamento dos cristais de biotite, de megacristais de feldspato e de encraves micáceos ou migmatíticos. Os encraves microgranulares de biotite e de rochas variadas são frequentes e de tamanho variável (Chaminé, 2000).

Do ponto de vista petrográfico este granitoide é constituído, essencialmente, por plagioclase (albite-oligoclase), feldspato potássico, quartzo, biotite e, acessoriamente, por moscovite, zircão, alanite, esfena, apatite e opacos (Chaminé, 2000).

Do ponto de vista geoquímico o granito de Lavadores apresenta um carácter calcoalcalino monzonítico, metaluminoso a ligeiramente peraluminoso (Canilho, 1975; Chaminé, 2000). Possui também grande quantidade de encraves básicos a intermédios, ricos em anfíbola e biotite, com afinidade alcalina (Chaminé, 2000).

Relativamente à área onde se insere a zona de estudo, nomeadamente na área da pedreira da Madalena e segundo estudos feitos por Pereira *et al.*, 2000, o granito de Lavadores, nesta zona, apresenta uma fácies acinzentada, isotrópico de grão médio, porfiroide e os megacristais de microclina representam cerca de 20% do volume da rocha e não ultrapassam 3 cm segundo a maior dimensão. A plagioclase está bem desenvolvida e zonada, o quartzo é abundante e xenomórfico com extinção ondulante e apresenta biotite de cor castanha ou verde, sendo esta última a mais abundante.

Petroquimicamente o granito tem um carácter cálcico acentuado, concordante com a abundância e a composição cálcica da plagioclase ser dominante. É um granitoide que se situa na divisória do campo metaluminoso e peraluminoso, devido ao facto de provir de um magma profundo, mantélico ou basicrustal, que sofreu cristalização fracionada e extração de plagioclase cálcica e minerais ferromagnesianos com modificação da composição original, como aponta a plagioclase fortemente zonada (Pereira *et al.*, 2000).

Segundo a Folha 9-C (Porto) da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000 (Figura 17), além do granito de Lavadores, na área envolvente à pedreira da Madalena ocorrem rochas porosas pouco ou não consolidadas que são nomeadamente terraços fluviais e depósitos de praias antigas à cota 80-90 metros.

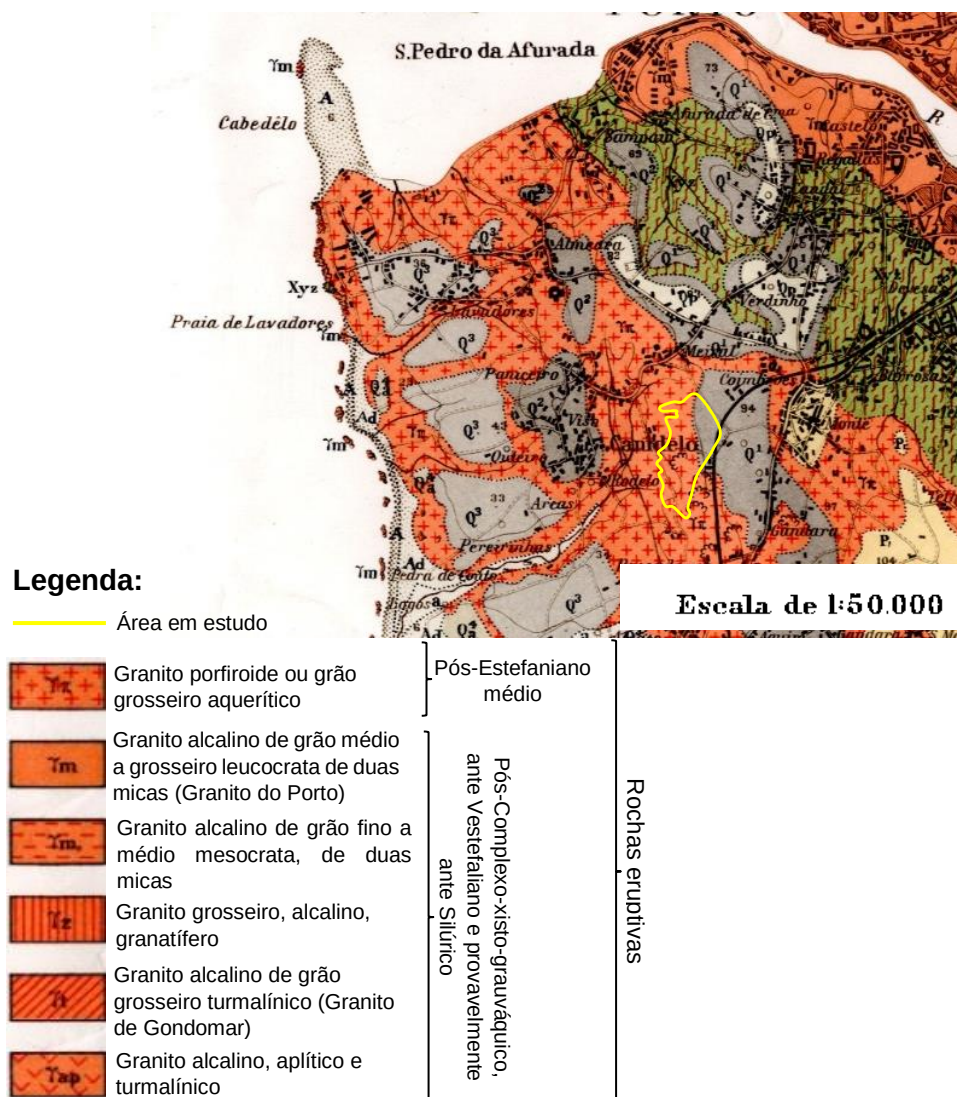


Figura 17 - Localização da área em estudo, em extrato da Folha 9-C da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal.

Os diferentes sistemas de fraturas frágeis, que afetam este granito, são o reflexo de reativação da grande estrutura da Zona de Cisalhamento Porto-Tomar (ZCPT) desde os tempos tardi-Variscos até ao presente. Na área central da pedreira, desenvolve-se um corredor de fraturas paralelas de direção N-S a NNE-SSW (Pereira *et al.*, 2000).

3.2. Enquadramento Ambiental

A pedreira da Madalena está inserida numa zona urbana e encontra-se atualmente na fase de recuperação paisagística. Por isso, a sua atividade e a atividade urbana da região podem gerar impactes ambientais significativos, nomeadamente nos recursos hídricos subterrâneos.

Desde 2000, a pedreira recebe resíduos inertes para deposição em aterro, sendo uma prática comum para a sua recuperação paisagística. Esses resíduos são

nomeadamente RCD os que se encontram na tabela n.º 1, parte B do Anexo IV do Decreto-lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto e os que cumprem com os limites impostos nas tabelas n.º 2 e 3 do mesmo Diploma Legal (SOLUSEL, 2018). Embora estes resíduos não sejam considerados perigosos, a sua deposição não controlada ou mal gerida pode, através de processos de lixiviação, torná-los potenciais fontes de contaminação para o meio hídrico subterrâneo.

Nas áreas urbanas, o deficiente conhecimento das características hidrogeológicas dos aquíferos e as más práticas ambientais associadas à deposição desregrada de resíduos sólidos e/ou efluentes, são uma das causas que poderão contribuir para a degradação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos (Coxito Afonso, *et al.*, 2004).

A região de Canidelo é uma região com 27 759 habitantes (Instituto Nacional de Estatística, 2012), todavia, como uma região pertencente a orla marítima, caracteriza-se por uma ocupação pouco densa decorrente da organização espacial rural. Por influência da proximidade e acesso fácil ao Porto, a região tem tido uma forte procura e, consequentemente, uma ocupação intensiva do solo de que resultaram conjuntos urbanos isolados de alta densidade, sem ordenamento programado da envolvente e antes obedecendo a uma lógica detalhada de construção da cidade apoiada no cadastro rústico original (Moreno *et al.*, 2005).

Segundo um relatório feito por Moreno *et al.*, 2005, do Plano Diretor Municipal de Vila Nova de Gaia (PDM) de 2003 (Figura 18) o uso do solo da freguesia de Canidelo é ocupado maioritariamente por habitações e infraestruturas representando cerca de 32,08%, ao passo que 27,16% correspondem às áreas agrícolas e florestais. Apenas 8,47% diz respeito aos arruamentos.

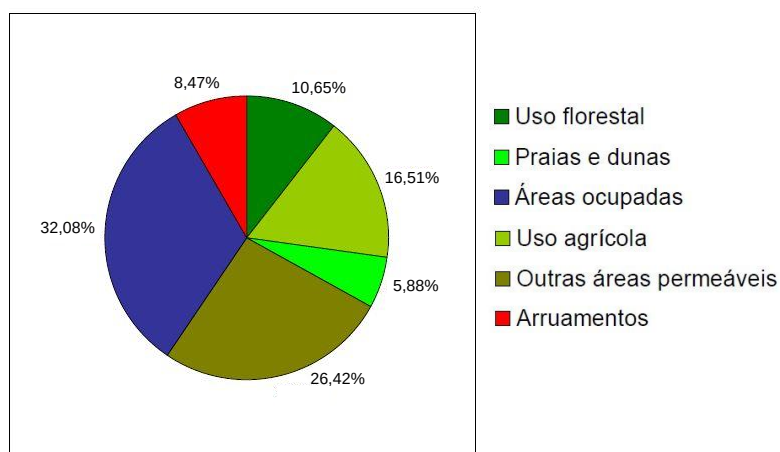


Figura 18 - Gráfico do uso do solo na freguesia de Canidelo (Moreno *et al.*, 2005).

Da percentagem de área ocupada por habitações e infraestruturas, na envolvente da pedreira da Madalena, é possível destacar as seguintes possíveis fontes de contaminação: bomba de gasolina, redes de saneamento, linha de comboio e cemitérios. Da percentagem de áreas agrícolas e florestais destacam-se os campos agrícolas, quintais e ainda um campo de golfe. Estas fontes podem ser do tipo A, B ou C, de acordo com a sua posição geométrica em relação ao nível freático, sendo neste caso maioritariamente dos tipos A (linha de comboio, campos agrícolas, quintais e o campo de golf) e B (bomba de gasolina, redes de saneamento e cemitério) (Figura 19).



Figura 19 - Fontes de Poluição do tipo A e B na envolvente da área em estudo, representada no excerto da folha 122 da carta Militar de Portugal na escala 1/25 000, editada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1999 e no Google Earth.

3.4. Enquadramento Hidrogeológico

Os recursos hídricos subterrâneos de Portugal Continental estão distribuídos de acordo com as formações geológicas existentes. Assim, consideram-se quatro unidades hidrogeológicas, correspondentes às quatro grandes unidades morfoestruturais em que o país se encontra dividido, a saber (Almeida *et al.*, 2000): Maciço Antigo (Ibérico ou Hespérico), Orla Mesocenoica Ocidental, Orla Mesocenoica Meridional e a Bacia Terciária do Tejo-Sado. Estas unidades são a base na qual se individualizam os diversos sistemas de aquíferos.

A área de estudo insere-se no Maciço Antigo que ocupa a maior extensão em Portugal, sendo constituído, fundamentalmente, por rochas eruptivas e metassedimentares. As litologias nesta unidade são habitualmente as rochas cristalinas ou rochas duras e, por isso, caracteriza-se por ser uma unidade com escassa aptidão hidrogeológica, isto é, pobre em recursos hídricos subterrâneos (Almeida *et al.*, 2000).

As rochas cristalinas são, por exemplo, as rochas granitoides que ocupam a maior parte da ZCI e a circulação da água neste tipo de litologia é, na maioria dos casos, relativamente superficial, condicionada pela espessura da camada de alteração e pela rede de fraturas. Os níveis freáticos, nestes casos, são muito sensíveis às variações de precipitação, pois, acompanham bastante a topografia e o escoamento dirige-se em direção às linhas de água, onde se dá a descarga (Almeida *et al.*, 2000).

Tendo em conta a Folha 1 da Carta Hidrogeológica de Portugal, na escala 1/200000 (Figura 20), na zona onde se enquadra a pedreira da Madalena é possível identificar-se uma falha com carácter hidrogeológico desconhecido ou pouco significativo e, segundo a informação encontrada na mesma fonte, a produtividade aquífera nesta área é considerada significativa (1 a 3 l/s.km²) e a permeabilidade é média a baixa.

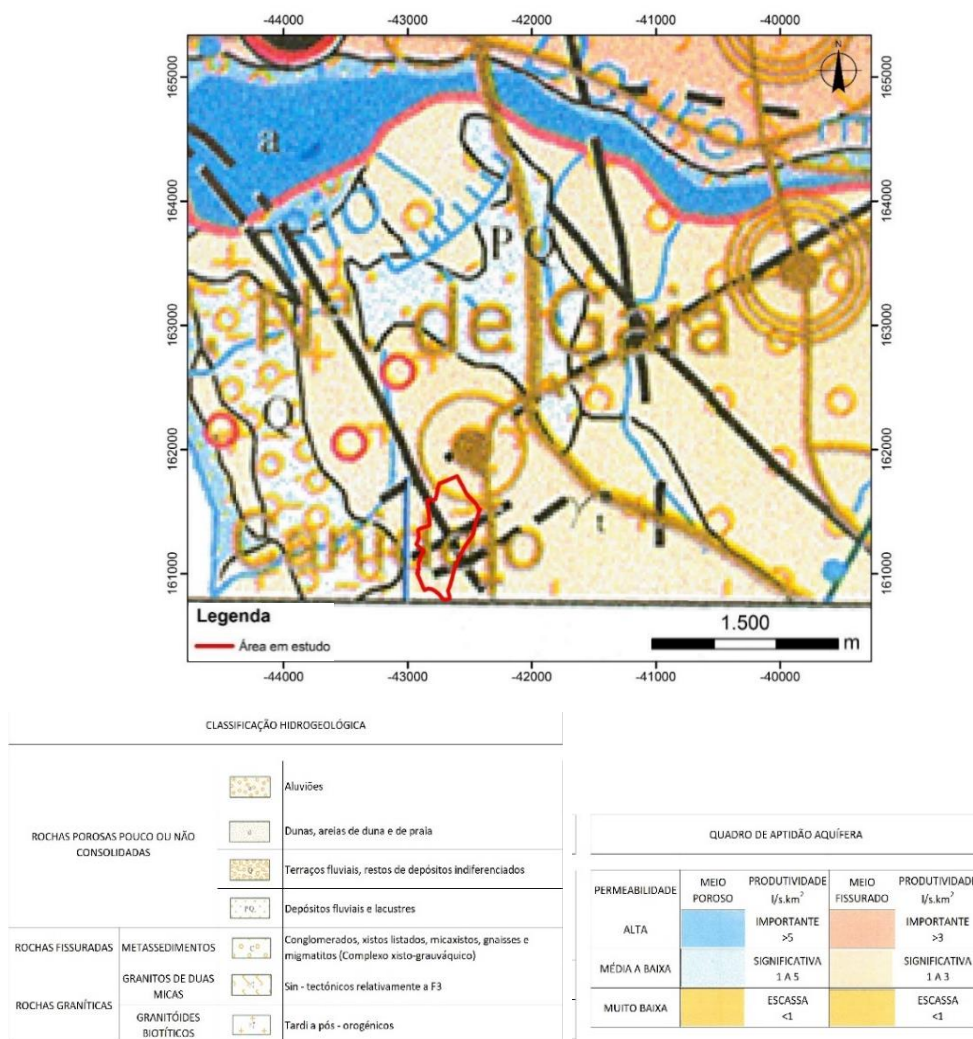


Figura 20 - Localização da área em estudo, em extrato da Folha 1 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1/200000, editada pelo Instituto Geológico e Mineiro.

Segundo o estudo feito por Pereira *et al.*, 2000, a permeabilidade do maciço onde se insere a pedreira da Madalena, abaixo dos 40 metros de profundidade, uma vez que as descontinuidades se apresentam muito fechadas, é baixa e, por isso, não podem constituir-se em vias de afluxo de águas infiltradas à zona de exploração nem de vias de defluxo de água acumulada no fundo que poderia impregnar os resíduos que foram aí sendo acumulados.

No entanto, dado que a pedreira se encontra a funcionar como um aterro de resíduos inertes, é importante determinar um balanço de massas tendo em conta os fluxos de entrada e saída da água, no sistema entre o aterro e os recursos hídricos subterrâneos. Um dos fluxos de entrada de água é a precipitação e de saída são a evapotranspiração e o escoamento superficial (Santos Oliveira, *et al.*, 2009).

O Sistema Nacional de Informação de Ambiente (SNIAmb), 2018 dispõe de dados compilados pelo Atlas do Ambiente de Portugal relativos à precipitação média anual, escoamento superficial e evapotranspiração real, que dependendo da natureza do substrato rochoso, da topografia e do regime pluviométrico da região, é possível obter uma caracterização hidrogeológica dos recursos hídricos subterrâneos, nomeadamente a obtenção de um valor para a infiltração de água no substrato geológico. Assim, por meio da expressão do balanço hídrico, podemos estimar um valor para a infiltração, conhecendo os restantes parâmetros. O balanço hídrico local pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$PP=EVT+ES+I$$

em que:

PP corresponde à precipitação;

EVT à evapotranspiração;

ES ao escoamento superficial;

e I à infiltração.

Estes parâmetros correlacionam-se entre si no percurso do ciclo hidrológico, nomeadamente na circulação das águas subterrâneas.

No que diz respeito à pluviosidade (Figura 21), os dados compilados apresentam médias anuais da precipitação que variam entre os 1000 e 1200 mm e, dada a localização da área, é possível assumir um valor médio da ordem dos 1050 mm.



Figura 21 - Valores de precipitação total (mm) para o concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a localização da área em estudo (retirado do Atlas do Ambiente disponível em: <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt> e editado no programa Google Earth.

Segundo a mesma fonte, relativamente ao escoamento superficial (Figura 22), os valores variam entre os 400 e 600 mm, porém uma vez que a área de estudo se trata de um aterro de resíduos e, portanto, instalado numa depressão fechada originada pela atividade da pedreira, o escoamento superficial pode ser considerado, nesta situação, como nulo, pois toda a água precipitada não tem por onde escorrer à superfície.

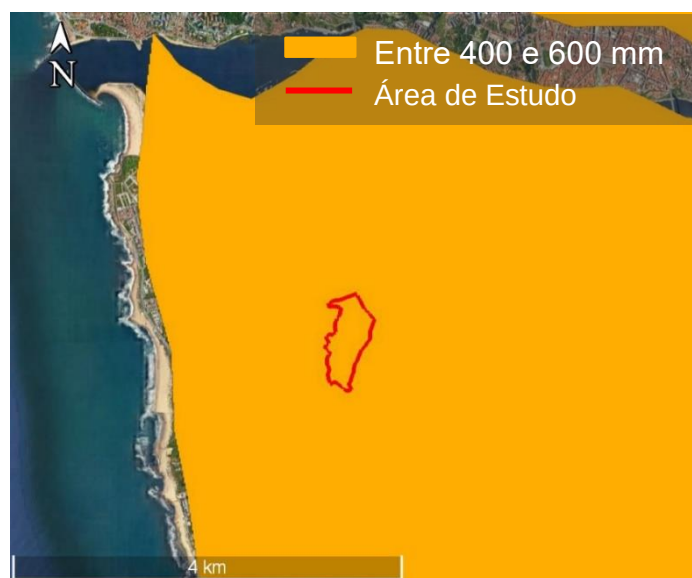


Figura 22 - Valores do escoamento superficial (mm) para o concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a localização da área em estudo (retirado do Atlas do Ambiente disponível em: <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt> e editado no programa Google Earth).

Para a evapotranspiração real (Figura 23) os valores variam entre os 600 a 700 mm e, para a área em estudo, admitem-se 625 mm dado o seu posicionamento.

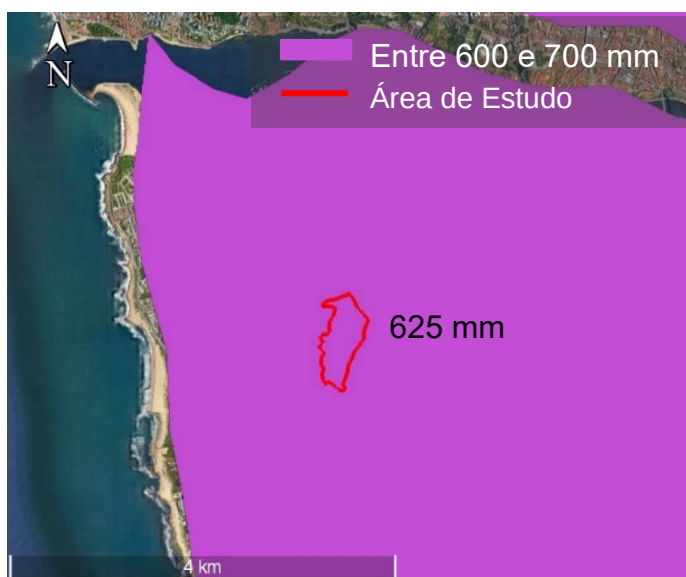


Figura 23 - Valores de evapotranspiração real (mm) para o concelho de Vila Nova de Gaia com realce para a localização da área em estudo (retirado do Atlas do Ambiente disponível em: <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt> e editado no programa Google Earth).

Portanto, de acordo com os dados obtidos anteriormente o balanço hídrico para a área em estudo pode ser traduzido por:

$$PP (1050 \text{ mm}) = EVT(625 \text{ mm}) + ES (0 \text{ mm}) + I$$

Assim, o valor obtido para a infiltração será:

$$I = 425 \text{ mm}$$

Valor este claramente excessivo tendo em conta a localização geográfica da área em estudo, bem como o enquadramento geológico. Deve-se este valor, em grande medida, ao facto de o escoamento superficial ser de 0,0 mm.

3.5. Tipos de recuperação paisagística e ambiental

A recuperação paisagística de uma pedreira é feita, geralmente, após o encerramento da mesma, mas planeada durante as fases iniciais de exploração, através de um documento técnico, o Plano Ambiental e de Recuperação Paisagística (PARP) que integra medidas ambientais e de recuperação paisagística, bem como, propostas de solução para o encerramento da pedreira. Existem diversas medidas ambientais que, dependendo das características do local, do tipo de pedreira e dos materiais disponíveis, atuam em dois tipos de estruturas: vazios resultantes da exploração e escombreyras.

Desde 2000 que a pedreira da Madalena tem funcionado, simultaneamente com a sua atividade de exploração, como recetora de resíduos inertes para posterior deposição em aterro na área de escavação, devido ao facto dessa área ter atingido a cota mínima de exploração autorizada por lei. Após o encerramento da atividade de exploração, a pedreira continuou a depositar resíduos como uma medida de recuperação paisagística e ambiental.

De entre os modelos e intervenções de recuperação paisagística existentes, a recuperação da pedreira da Madalena compreendeu na reabilitação por meio de um processo de enchimento completo ou parcial (Figura 24) em que o material a ser depositado são RCD e resíduos industriais inertes.

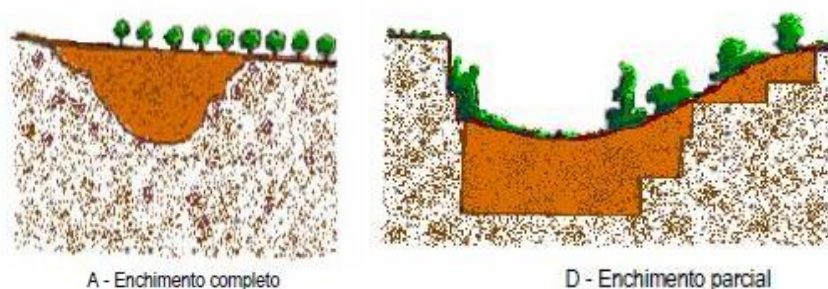


Figura 24 – Intervenções de recuperação paisagística por meio de Enchimento completo (A) e Enchimento parcial (B) (Adaptado de Basto e Silva, 2006).

A reabilitação é a solução mais utilizada na recuperação de áreas intervencionadas da exploração, produzindo um ecossistema alternativo compatível com a área envolvente, cuja recriação se pode aproximar em maior ou menor escala do estado ideal (Bastos e Silva, 2006). O enchimento completo trata-se de uma medida tipicamente compatível com a restauração, pois, devolve o estado original do espaço preexistente. Contudo, a sua execução pode ser inviável ou desadequada, pois a reposição exata do estado original antes da sua alteração só se justifica se existirem meios de restabelecer a morfologia, a qualidade dos solos, etc., bem como, quando a qualidade do meio ambiente original era suficientemente importante para justificar a opção (Bastos e Silva, 2006).

No que diz respeito aos recursos hídricos subterrâneos, a empresa SOLUSEL tem prevista, durante a deposição de resíduos, a elevação progressiva de poços manilhados que servirão para instalar bombas hidráulicas e respetivas condutas de elevação da água que impregnar o aterro. Quando o aterro estiver completo, as águas captadas nos referidos poços servirão para diversos fins nomeadamente a rega de espaços verdes reconquistados pela deposição de resíduos (Pereira *et al.*, 2000).

3.5.1. Resíduos depositados em aterros

Os resíduos depositados na pedreira da Quinta do Moinho (Figura 25) são classificados como resíduos inertes, resultantes de:

- da atividade de exploração da própria pedreira;
- da atividade de diversas indústrias, fábricas e afins;
- da demolição e construção de edifícios.

Os Resíduos de construção e demolição (RCD) são os resíduos provenientes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações (Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro) sem necessidade de triagem.

Apesar de não serem resíduos perigosos, a deposição não controlada destes resíduos poderá levar a impactes significativos ao nível dos recursos hídricos subterrâneos, através de processos de lixiviação. Este processo ocorre devido à infiltração de água nos resíduos e, conseqüentemente, no subsolo, gerando contaminantes solúveis suscetíveis de poluir os recursos hídricos subterrâneos.

A composição físico-química dos lixiviados depende das características dos resíduos sólidos que são depositados em aterro, dos volumes de água que transitam através da massa de resíduos, do ritmo temporal desses fluxos, das características densimétricas e da humidade dos resíduos, bem como das condições climáticas do local do aterro (Santos Oliveira, *et al.*, 2009).

Deste modo, torna-se importante e necessário monitorizar e gerir as águas subterrâneas para prevenir a deterioração da sua qualidade em consequência da lixiviação.

3.6. Situação atual da pedreira da Madalena

As pedreiras interferem com o meio hídrico, ou porque nos seus processos extrativos utilizam grande quantidade de água ou porque acumulam água no seu interior. Em qualquer das situações referidas, a água é devolvida ao meio ambiente e importa avaliar se as respetivas características não constituem uma interferência prejudicial para o meio ambiente (Afonso e Sousa, 2012).

Com a emissão da Declaração de Impacte Ambiental (DIA) é possível saber, não só, as medidas de minimização dos impactos identificados durante o Estudo de Impacte Ambiental (EIA), mas também os planos de monitorização, de forma a conferir se essas mesmas medidas estão a resultar. A monitorização depende da tipologia das pedreiras, da sua área/produção, dos fatores ambientais mais afetados e dos valores ambientais presentes. Estes planos devem indicar ainda os parâmetros físico-químicos e os tipos de poluentes a avaliar, a periodicidade e frequência de monitorização, as técnicas e métodos, os locais a monitorizar e a legislação de base (Leitão *et al.*, 2008; Afonso e Sousa, 2012).

Os planos de monitorização atuam sobre vários fatores ambientais, mas, tendo em conta o contexto em que se insere o tema da presente dissertação, importa apenas destacar os recursos hídricos subterrâneos.

3.6.1. Gestão e Monitorização dos recursos hídricos subterrâneos na área da pedreira da Madalena

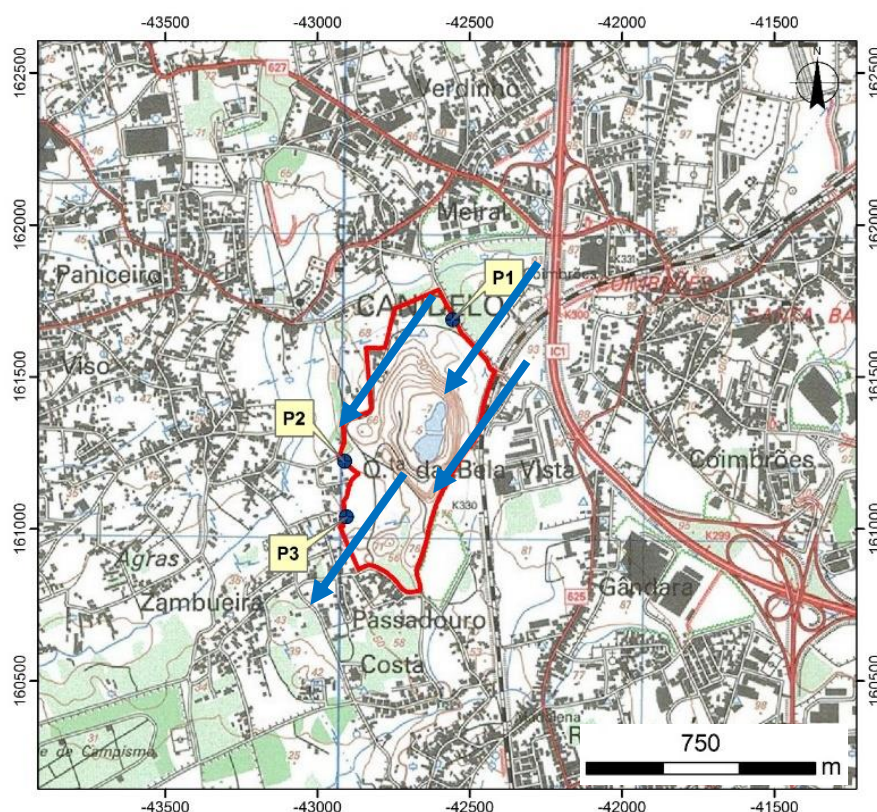
A monitorização das águas subterrâneas é efetuada de acordo com dois objetivos principais (Leitão *et al.*, 2008): i) caracterização da situação natural ou de referência, de modo a gerir da forma mais adequada e tomando iniciativas contra eventuais alterações significativas da sua qualidade; e ii) caracterização de eventuais efeitos da poluição, o seu grau e a sua extensão.

A importância do tipo de poluente na definição de estratégias de amostragem reflete-se no processo de colheita de amostras de águas subterrâneas, na medida em que a recolha deverá ser adaptada ao tipo e à configuração da mancha de poluição e às suas propriedades hidroquímicas (Leitão *et al.*, 2008).

Os parâmetros físico-químicos a analisar nas águas subterrâneas são sempre aqueles que, durante o EIA, foram considerados os mais suscetíveis de serem afetados pela atividade da pedreira. Estes parâmetros são os que se encontram nas águas de escorrência, isto é, na descarga de água no meio natural, onde se incluem os aniões e catiões maiores (Leitão *et al.*, 2008; Afonso e Sousa, 2012).

No caso da pedreira da Madalena, tendo em conta que a produtividade aquífera da zona é considerada significativa e o facto de a pedreira estar a ser explorada como uma zona de aterro, em que os resíduos a serem depositados podem, por processos de lixiviação, contaminar os recursos hídricos subterrâneos, torna-se necessário atentar à gestão e monitorização desses recursos.

Assim, os parâmetros físico químicos que foram monitorizados são os que estão definidos no Anexo I do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. As campanhas de monitorização das águas subterrâneas foram realizadas em três piezómetros, cujos resultados foram analisados e sintetizados e encontram-se no Anexo I da presente dissertação. De acordo com a Figura 25 e tendo em conta à direção do fluxo dos recursos hídricos subterrâneos, é possível verificar que o piezómetro 1 (P1) encontra-se a montante, enquanto os piezómetros 2 e 3 (P2 e P3) localizam-se jusante, considerando o sentido de escorrência subterrânea da água.



Legenda:

- Piezómetro
 Área de estudo
 Fluxo dos Recursos Hídricos Subterrâneos

Figura 25 - Localização dos piezómetros resultantes das campanhas de monitorização no excerto da Folha 122 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000, editada pelo Instituto Geográfico do Exército, 1999.

3.6.2. Análise dos resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização

A análise dos resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização foi realizada, não só com base nos valores que apresentam um aumento significativo ao longo dos anos, mas também com os valores da Situação de Referência (SR), datada de maio de 2001, bem como com os Valores Máximos Recomendáveis (VMR) e com os Valores Máximos Admissíveis (VMA), levando à seleção de alguns parâmetros físico-químicos.

Para uma melhor interpretação dos resultados foi utilizada a seguinte codificação de cores:

- A verde: valores superiores a SR;
- A amarelo: valores superiores a VMR;
- A vermelho: valores superiores a VMA;
- A sublinhado: valores superiores a SR e VMR;
- A **negrito**: valores superiores a SR, VMR e VMA.

A Tabela 5 apresenta dados correspondentes ao piezómetro 1, onde os parâmetros que mereceram análise particular foram o bário total, os bicarbonatos e os sulfatos. Nesta tabela, é possível verificar que o parâmetro bário total apresenta alguns valores superiores em relação aos VMA, principalmente os que foram obtidos nos últimos anos, enquanto o parâmetro sulfatos apresenta valores superiores apenas a SR. Embora o parâmetro bicarbonatos não apresente valores superiores a SR, aos VMR e aos VMA, apresenta, em comparação com os outros parâmetros, valores mais elevados, valores esse que tem vindo a aumentar regularmente ao longo dos anos.

Tabela 5 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização no Piezómetro 1.

Parâmetros físico-químicos	SR	fev07	fev08	mar09	fev10	fev11	fev12	fev13	fev14	mar15	mar16	mar17	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Bário Total (mg/l Ba)	s.d.	<2	<1,0	<1,0	<1,0	0,32	<0,010	0,36	0,318	0,36	0,39	0,39	-	0,1
Bicarbonatos (mg/l HCO ₃)	s.d.	29	29	30	32	32	34	35	34	43	40	40	-	-
Sulfatos (mg/l SO ₄)	9	17	18	19	19	18	23	24	17	30	27	25	150	250

A Tabela 6 apresenta os dados correspondentes ao piezómetro 2 e os parâmetros que resultaram numa análise mais apurada foram o cálcio total, os cloretos, o magnésio total, o manganês total, o potássio, o sódio total e os sulfatos. Pela análise da tabela pode-se verificar que o parâmetro sulfatos é o que apresenta valores superiores em relação à SR, aos VMR e aos VMA, principalmente nos últimos dois anos.

O parâmetro cloretos apresenta também valores superiores à SR e aos VMR, sobretudo os valores obtidos nos últimos três anos. Por outro lado, o parâmetro manganês total apresenta valores superiores apenas aos VMR ao longo dos anos. Os valores obtidos para os parâmetros cálcio total, magnésio total, potássio e sódio total, apesar de não serem valores superiores aos limites de referência, é possível verificar que estes tem vindo a aumentar, consideravelmente, ao longo dos anos.

Tabela 6 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização no Piezómetro 2.

Parâmetros físico-químicos	SR	fev07	fev08	mar09	fev10	fev11	fev12	fev13	fev14	mar15	mar16	mar17	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Cálcio total (mg/l Ca)	s.d.	22	26	22	28	33	33	37	47	58	61	69	-	-
Cloretos (mg/l Cl)	71	69	77	81	96	109	133	s.d.	190	<u>231</u>	<u>250</u>	<u>272</u>	200	-
Magnésio total (mg/l Mg)	s.d.	21	22	25	28	30	34	39	11	50	28	61	-	-
Manganês total (mg/l Mn)	s.d.	0,07	0,08	0,07	0,12	0,11	0,15	0,17	0,23	0,3	0,39	0,51	0,05	-
Potássio (mg/l K)	s.d.	1,4	1,5	1,7	1,7	2,1	1,8	2,2	2,9	2,13	3,31	2,67	-	-
Sódio total	s.d.	58	57	62	69	69	71	82	95	110	120	140	-	-
Sulfatos	111	140	150	<u>160</u>	<u>160</u>	<u>170</u>	150	<u>190</u>	<u>170</u>	<u>220</u>	300	310	150	250

A Tabela 7 apresenta os dados correspondentes ao piezómetro 3 e os parâmetros alvo de análise mais cuidada foram os bicarbonatos, o boro, o cálcio total, os cloretos, o magnésio total, o manganês total, o potássio, o sódio total e os sulfatos. Pela análise da tabela é possível verificar que o parâmetro sulfatos é o que apresenta valores mais elevados em relação à SR, aos VMR e aos VMA sendo o que regista maior incremento ao longo dos anos.

O parâmetro cloretos apresenta valores superiores à SR e aos VMR, sobretudo nos últimos quatro anos. O manganês total apresenta ao longo dos anos valores superiores aos VMR. Por outro lado, o parâmetro boro apresenta apenas um valor superior aos VMR no ano de 2016. Relativamente aos parâmetros bicarbonatos, cálcio total, magnésio total, potássio e sódio total, embora não apresentem valores superiores aos limites de referência, estes aumentam significativamente ao longo dos anos.

Tabela 7 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização no Piezómetro 3.

Parâmetros físico-químicos	SR	fev07	fev08	mar09	fev10	fev11	fev12	fev13	fev14	mar15	mar16	mar17	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Bicarbonatos (mg/l HCO ₃)	s.d.	28	38	43	47	66	55	106	96	112	128	122	-	-
Boro (mg/l B)	s.d.	<1	<0,2	0,164	0,22 2	0,55	0,45	0,79	0,61	0,75	88	0,79	1	-
Cálcio total (mg/l Ca)	s.d.	29	36	34	43	88	62	57	80	89	80	81	-	-
Cloretos (mg/l Cl)	88,8	84	99	99	157	278	275	s.d.	327	315	304	313	200	-
Magnésio total (mg/l Mg)	s.d.	24	26	28	35	51	51	47	53	50	47	48	-	-
Manganês total (mg/l Mn)	s.d.	0,08	0,08	0,1	0,11	0,16	0,16	0,16	0,19	0,2	0,27	0,44	0,05	-
Potássio (mg/l K)	s.d.	2,8	2,9	3	6,3	12	3,9	4,8	5,8	2,68	7,69	7,39	-	-
Sódio total (mg/l Na)	s.d.	68	70	85	110	180	160	180	240	290	280	310	-	-
Sulfatos (mg/l SO ₄)	119	150	180	170	210	280	230	280	320	480	560	510	150	250

Com a análise dos valores anteriormente tabelados, foi possível verificar que alguns parâmetros físico-químicos se encontram presentes nos três piezómetros. Assim, os parâmetros bicarbonatos, cálcio total, cloretos, magnésio total, manganês total, potássio, sódio total e sulfatos foram também analisados graficamente, para fins comparativos. O parâmetro bicarbonatos encontra-se presente apenas nos piezómetros 1 e 3 (P1 e P3), enquanto os parâmetros cálcio total, cloretos, magnésio total, manganês total, potássio e sódio total encontram-se presentes apenas nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3). O parâmetro sulfatos encontra-se presente nos três piezómetros.

A Figura 26 apresenta a concentração do parâmetro cálcio total nos piezómetros P2 e P3. Observando a figura é possível verificar que, no piezómetro 3 os valores obtidos para o parâmetro cálcio total são significativamente superiores relativamente aos valores obtidos no piezómetro 2. Em ambos piezómetros os valores aumentam progressivamente ao longo dos anos, sendo no P3 o valor mais elevado em fevereiro de 2011.

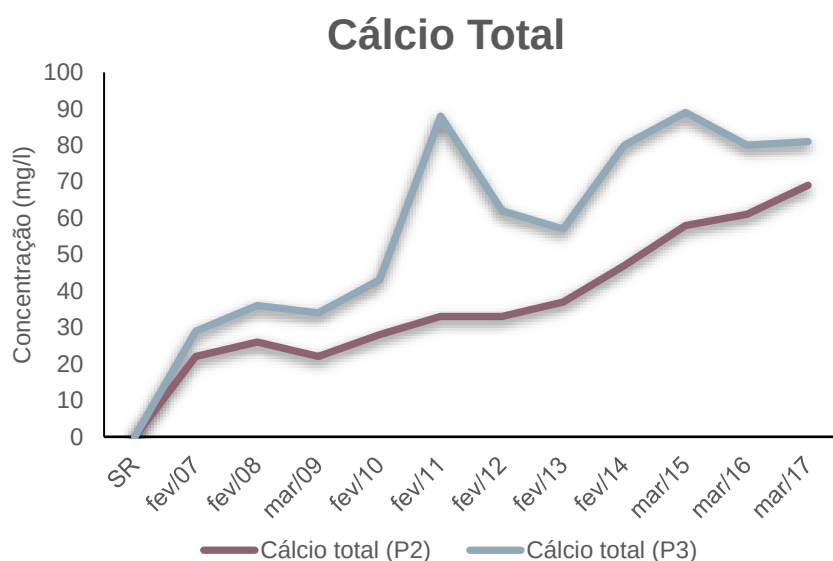


Figura 26 - Concentração do parâmetro cálcio total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).

O parâmetro magnésio total encontra-se presente nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3) e segundo a Figura 27, em ambos os piezómetros, os valores obtidos são relativamente aproximados até fevereiro de 2010. No caso do P2, os valores são inconstantes a partir de fevereiro de 2013, sendo o valor mais elevado em março de 2017. Por outro lado, no P3 os valores aumentam a partir de fevereiro de 2010, contudo esses valores posteriores a essa data, são relativamente constantes.

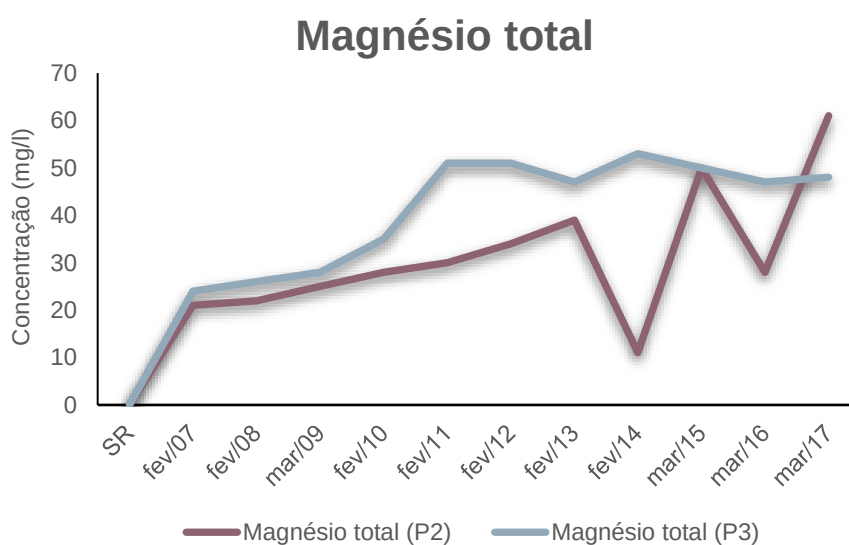


Figura 27 - Concentração do parâmetro magnésio total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).

A Figura 28 apresenta a concentração de manganês total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3) e, segundo essa figura, é possível verificar que os dois piezómetros apresentam gráficos linearmente crescentes ao longo dos anos, sendo que no P3 os valores obtidos são significativamente superiores, a partir de fevereiro de 2014, em relação ao P2.

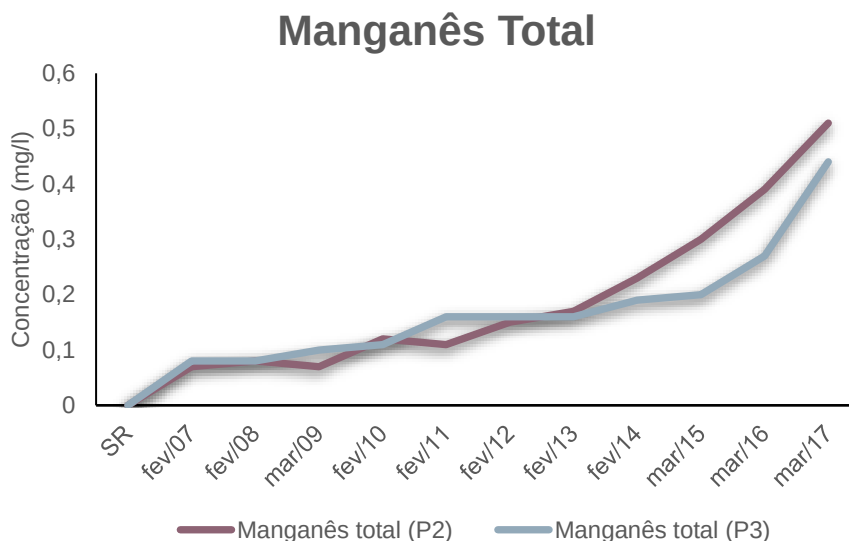


Figura 28 - Concentração do parâmetro manganês total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).

O parâmetro sódio total encontra-se presente nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3) e, segundo a Figura 29, é possível verificar que os valores obtidos no P3 são bastante superiores aos valores obtidos no P2, apresentando um gráfico linearmente crescente.

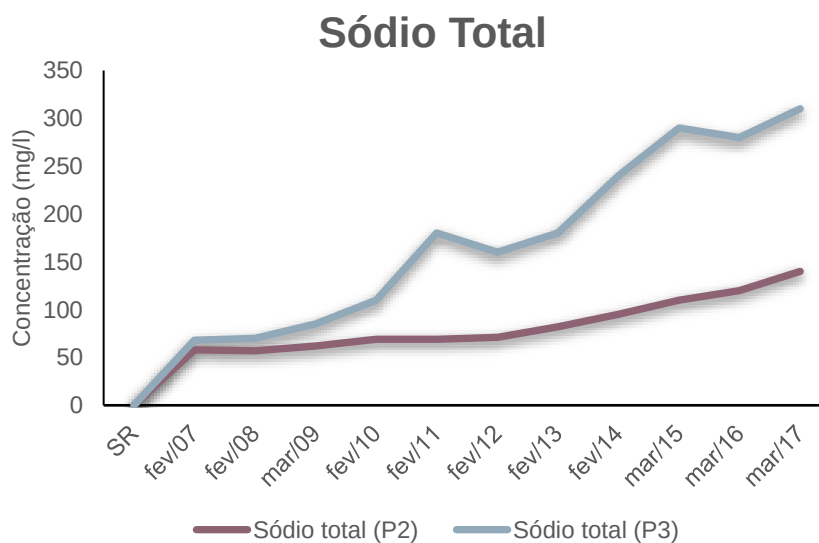


Figura 29 - Concentração do parâmetro sódio total nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).

Relativamente ao parâmetro potássio e segundo a Figura 30, os valores obtidos no piezómetro 3 são notavelmente superiores aos valores obtidos no piezómetro 2, sendo o maior valor datado de fevereiro de 2011. No piezómetro 2 o gráfico é quase linear devido ao facto de os valores serem relativamente semelhantes.

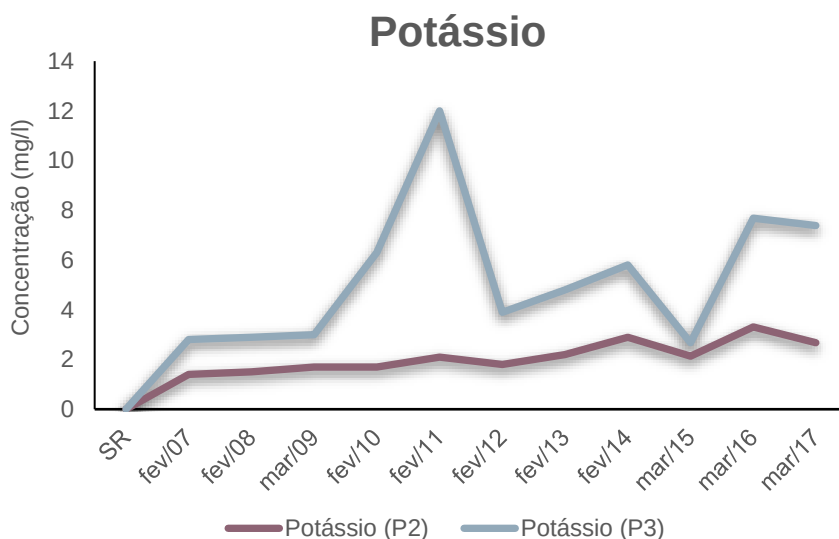


Figura 30 - Concentração do parâmetro potássio nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).

A Figura 31 apresenta, graficamente, a concentração do parâmetro bicarbonatos nos piezómetros 1 e 3 (P1 e P3). Como é possível verificar, no piezómetro 3, os valores do parâmetro bicarbonatos são notavelmente mais elevados em relação ao piezómetro 1, que apresenta um gráfico muito constante.

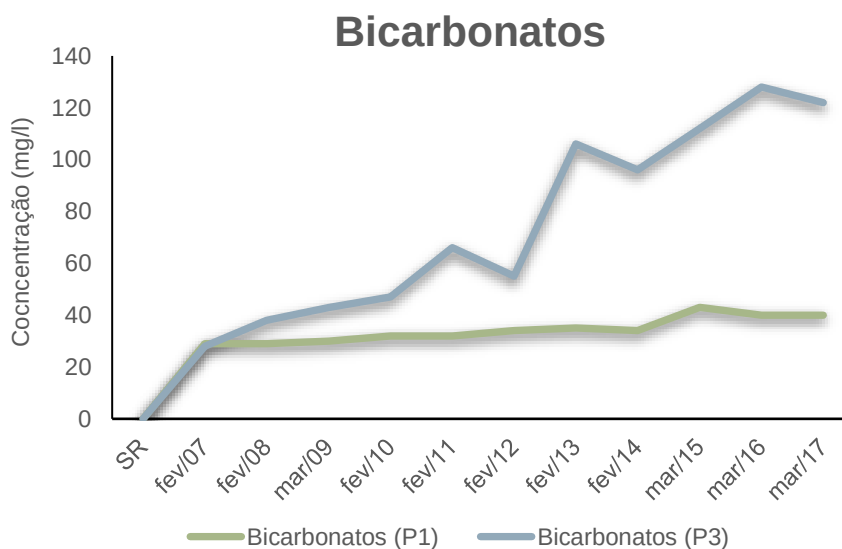


Figura 31 - Concentração do parâmetro bicarbonatos nos piezómetros 1 e 3 (P1 e P3).

Segundo a Figura 32, os valores obtidos no piezómetro 3, relativos ao parâmetro cloretos, são notoriamente superiores em relação aos valores obtidos no piezómetro 2 e à SR, cujos valores aumentam consideravelmente a partir de março de 2009. A situação irregular, distinta da tendência geral, em fevereiro de 2013 é uma situação para a qual não se encontra uma explicação consentânea com a situação.

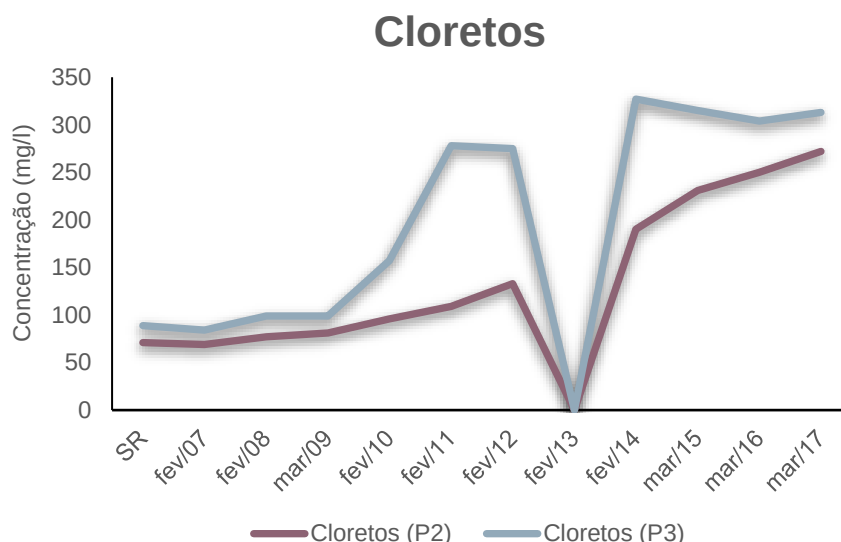


Figura 32 - Concentração do parâmetro cloretos nos piezómetros 2 e 3 (P2 e P3).

O parâmetro sulfatos encontra-se presente nos três piezómetros (P1, P2 e P3), e como é possível verificar pela Figura 33, os valores obtidos apresentam valores superiores à SR. O piezómetro 1 apresenta valores bastante inferiores (no gráfico correspondente ao eixo das ordenadas da direita) em relação aos outros dois piezómetros. O piezómetro 2 apresenta um gráfico regularmente crescente e o piezómetro 3 apresenta notoriamente valores superiores em relação aos piezómetros 1 e 2, cujo valor mais elevado é o que se encontra datado de março de 2016.

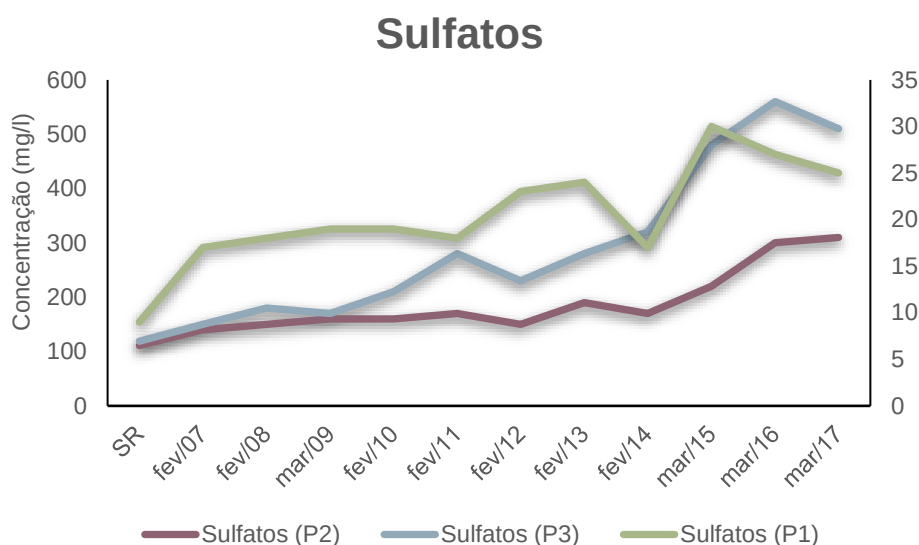


Figura 33 - Concentração do parâmetro sulfatos nos piezómetros 1, 2 e 3 (P1, P2 e P3).

No que diz respeito a condutividade elétrica, nos três piezómetros, é de notar que, apesar de os valores serem significativamente superiores ao valor de referência, há piezómetros com valores bastante mais elevados que outros. A Tabela 8 apresenta os valores da condutividade elétrica dos três piezómetros, onde é possível verificar que a condutividade elétrica do piezómetro 3 (P3) é a que apresenta valores bastante superiores, não só em relação aos valores da SR e dos VMR, como também em relação à condutividade elétrica dos piezómetros 1 e 2 (P1 e P2). A condutividade elétrica do piezómetro 2, nos últimos três anos, apresenta valores muito superiores à SR e aos VMR. Por outro lado, a condutividade elétrica no piezómetro 1 apresenta valores superiores apenas em relação a SR.

Tabela 8 - Resultados obtidos nas Campanhas de Monitorização nos Piezómetros 1, 2 e 3, para o parâmetro condutividade elétrica.

Parâmetros físico-químicos	SR	fev07	fev08	mar09	fev10	fev11	fev12	fev13	fev14	mar15	mar16	mar17	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Condutividade de (P1) (µS/cm)	587	735	635	650	637	623	610	611	613	620	660	700	1000	-
Condutividade de (P2) (µS/cm)	566	600	566	600	643	668	750	851	952	<u>1170</u>	<u>1230</u>	<u>1450</u>		
Condutividade de (P3) (µS/cm)	660	709	685	755	911	<u>1350</u>	<u>1379</u>	<u>1442</u>	<u>1685</u>	<u>2010</u>	<u>2030</u>	<u>2040</u>		

Analisando o gráfico da Figura 34 é possível verificar que se encontra consistente com a análise da Tabela 8 uma vez que o piezómetro cuja condutividade se destaca mais é o piezómetro 3.

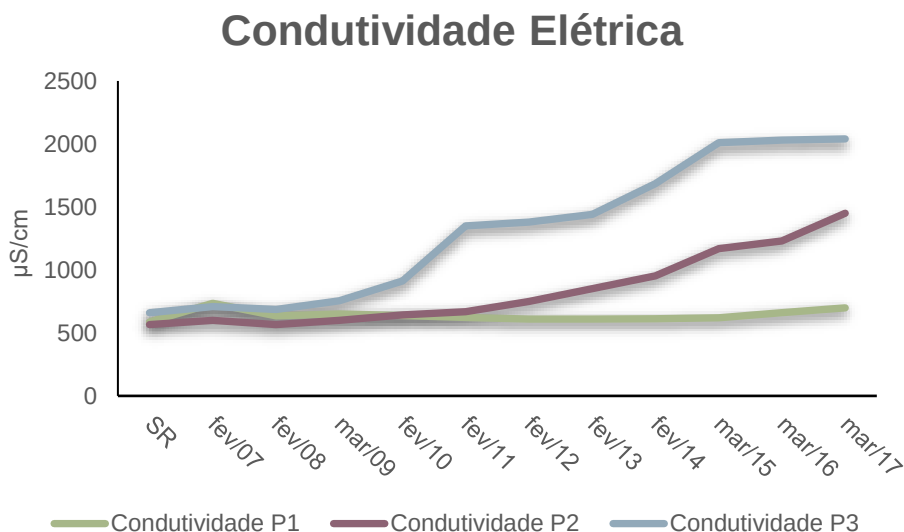


Figura 34 - Variação da condutividade elétrica nos piezómetros 1, 2 e 3 (P1, P2 e P3).

Neste gráfico é possível verificar que há um aumento progressivo que ocorre nos três piezómetros. Relativamente à condutividade elétrica no piezómetro 1, o gráfico é quase horizontal, embora apresente um pico ligeiramente mais elevado em fevereiro de 2007. Os valores estão relativamente acima do valor de referência, contudo são valores bastante aproximados. A condutividade elétrica do piezómetro 2 é linearmente crescente e a condutividade elétrica do piezómetro 3 apresenta valores bastante mais elevados em relação com os outros piezómetros.

Tendo em conta a análise geral dos resultados obtidos nas campanhas de monitorização e a direção do fluxo dos recursos hídricos do local, é de notar que os piezómetros 2 e 3 são os que contêm maior número de parâmetros físico-químicos com valores anómalos, nomeadamente, os valores obtidos para a condutividade nos dois piezómetros são notoriamente bastante elevados. No caso do parâmetro sulfatos, uma vez que se encontra presente nos três piezómetros, poderá advir de alguma outra fonte, talvez mais a montante, que poderá estar a influenciar os resultados obtidos nos três piezómetros.

Assim, estes resultados analíticos serviram, não só, para caraterizar a situação atual da pedreira da Madalena, como também chegar a uma conclusão acerca da

deposição dos resíduos inertes em relação à qualidade das águas subterrâneas. O facto de haver alguns parâmetros físico-químicos, com valores anómalos e superiores aos valores de referência estipulados na legislação em vigor, nos piezómetros 2 e 3, mostra que, os materiais depositados na pedreira da Madalena poderão levar à alteração da qualidade da água subterrânea no local, embora sejam classificados como resíduos inertes. Por isso, é necessário analisar todos os resíduos, que vão ser depositados na pedreira, de modo a verificar se se tratam de resíduos inertes ou não inertes.

4. Metodologia

A deposição de resíduos é uma medida ambiental usada na recuperação da pedreira da Madalena. É uma técnica bastante frequente e viável mas, contudo, a monitorização das águas subterrâneas é indispensável neste tipo de medidas, uma vez que a deposição descontrolada e mal gerida dos resíduos pode, por processos de lixiviação, ter consequências graves para estes recursos.

Dado o contexto em que se desenvolve a presente dissertação, cujo principal problema consiste em determinar se solos provenientes de áreas com atividade industrial, que poderão vir a ser depositados na pedreira da Madalena, são resíduos inertes admissíveis neste tipo de aterro ou se, por outro lado, poderão apresentar algum tipo de reação que os leve a classificar como não inertes. Para isso, procurou-se realizar ensaios de lixiviação, com o intuito de avaliar, em laboratório, as características desses resíduos/solos que, quando depositados, poderão contaminar as águas subterrâneas.

Assim, foram obtidas três amostras de solo, com origem em três áreas industriais distintas e, depois da sua amostragem, a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, no que aos ensaios de lixiviação diz respeito, é a que se encontra de acordo com a norma EN12457-2:2002. Os ensaios de lixiviação foram realizados no Departamento de Geologia, Ambiente e Ordenamento do Território (DGAOT), da Faculdade de Ciências do Porto (FCUP).

4.1. Amostragem de Solos

Os solos amostrados são solos resultantes de áreas onde se desenvolveu atividades industriais nas quais o processo de reconversão/recuperação fez com que recorressem à SOLUSEL para os depositar na pedreira da Madalena. Assim, os solos utilizados, para a execução dos ensaios de lixiviação, são provenientes de áreas industriais localizadas no Porto, em Braga e em São João da Madeira (Figura 35).

Das sondagens realizadas nas três áreas industriais colheram-se seis amostras de solo no Porto, cinco amostras de solo em Braga, e cinco amostras de solo em São João da Madeira, para análise laboratorial.

Os solos com origem no Porto, foram obtidos por meio da realização de um conjunto de sondagens, tendo sido obtida uma amostra compósita a uma profundidade

entre os 1,5 m e os 2,0 m. Estes solos, identificados como “Pz15 – 1.50m”, são considerados como solos de granulometria média a fina, cujos os grãos mais grosseiros são facilmente desagregáveis.

Os solos provenientes de “Braga” foram amostrados a uma profundidade entre 1,0 m e 1,5 m, sendo considerados de granulometria média a fina, mas apresentando uma textura mais fina que os do Porto.

Finalmente, os solos provenientes de “São João da Madeira”, são solos que apresentam uma granulometria média a fina com algumas frações de rochas, tendo sido colhidos a uma profundidade entre 1,5 m e 2,0m.

Após homogeneização das amostras de cada uma das proveniências, foi obtida uma amostra (três amostras) para o ensaio de lixiviação.

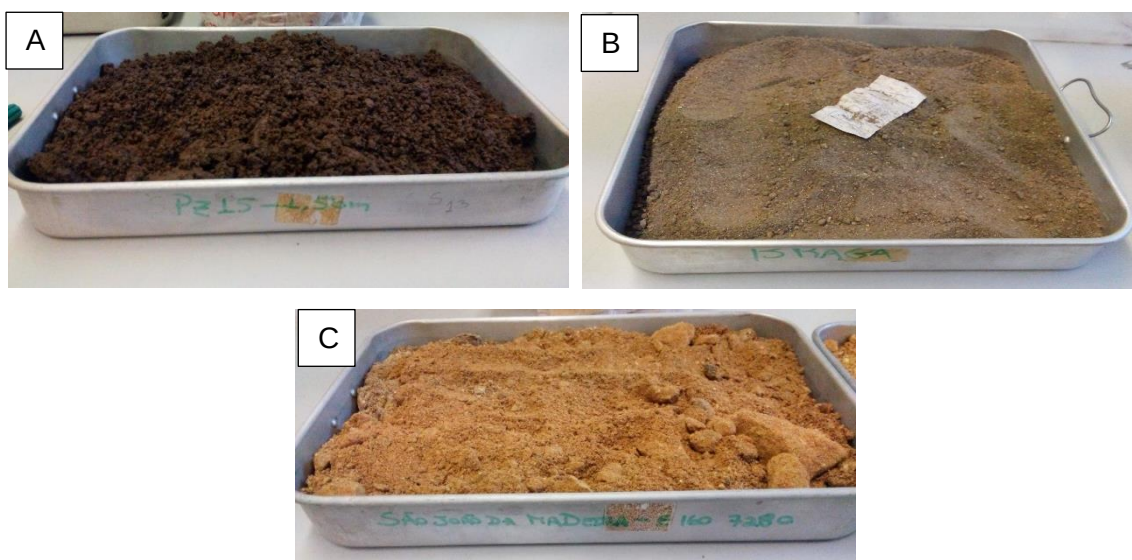


Figura 35 - Solos amostrados e homogeneizados; A – solo do Porto “Pz15 – 1,5 m”; B – solo de Braga; C – solo de São João da Madeira.

4.2. Ensaio de Lixiviação

O termo lixiviado é definido como qualquer líquido que, ao passar através de, ou ao entrar em contacto com, a matéria sólida, extrai material solúvel e em suspensão (Stone, 2014).

Os lixiviados obtidos, por reação com amostras de solos ou de resíduos, são relativamente diferentes dos lixiviados preparados em laboratório, tanto em termos da forma como a lixiviação se processa, como em termos da sua complexidade. Existem

inúmeros métodos de lixiviação em laboratório, mas todos têm um objetivo comum: obter dados relacionados com a lixiviabilidade de uma amostra, que corresponde à determinação de um risco associado de forma conservativa. Essa lixiviabilidade pode ser usada para simular a atenuação natural, avaliar o risco da lixiviação de contaminantes alcançar as águas subterrâneas, ou mesmo determinar a rota apropriada de despejo de resíduos se o risco for elevado (Stone, 2014).

Existem vários fatores primários que podem controlar a lixiviação (Stone, 2014): o mecanismo (dinâmico ou estático, razão líquido/sólido); a composição química dos contaminantes; o pH, condutividade e o potencial oxidação/redução do soluto; os componentes dissolvidos; as mudanças físicas, químicas e biológicas do material ao longo do tempo; a temperatura de extração; a duração da lixiviação; e o método de agitação.

Nos ensaios de lixiviação existem essencialmente quatro métodos chave para a preparação e análise do lixiviado (Stone, 2014):

- A preparação das amostras – que pode incluir a análise proprietária das amostras, redução do tamanho das partículas, etc.;
- A lixiviação das amostras – que inclui a matriz de lixiviação usada, o modo de contacto com o material sólido, o método de agitação, etc.;
- A preparação do lixiviado – tipo de separação a usar para obter o eluato para análise (centrifugação, decantação ou filtração) e a preservação de alguma amostra;
- Análise do lixiviado – análise química final do eluato preparado.

4.2.1. Norma EN1457-2:2002

O ensaio de lixiviação realizado para o desenvolvimento da presente dissertação, teve por base os materiais, métodos e procedimentos de acordo com a Norma EN1457-2:2002, intitulada, na sua versão inglesa, como “*Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction)*”.

Esta norma é uma das quatro partes integrantes da caracterização de resíduos (*Characterisation of waste*) e baseia-se na especificidade de um ensaio laboratorial, que fornece informações sobre a lixiviação de resíduos e sedimentos granulares, conforme

as condições experimentais, particularmente a razão líquido/sólido de 10 l/kg de matéria seca. É aplicada em resíduos cujo tamanho das partículas é inferior a 4 mm sem ou com redução do seu tamanho. Esta Norma Europeia foi desenvolvida para investigar principalmente constituintes inorgânicos dos resíduos.

Os ensaios de lixiviação, realizados de acordo com esta norma, são ensaios durante os quais o material residual é posto em contacto com um lixiviante e alguns dos seus constituintes são extraídos. Entende-se por lixiviante como o líquido, que neste caso é a água, que é usado durante o ensaio. A solução recuperada do ensaio designa-se como eluato. A razão líquido/sólido (L/S) é expressa em l/kg e consiste na razão entre o volume total de líquido (L, em litro), que está em contacto com o resíduo, e a massa seca da amostra (S, em kg de matéria seca).

A amostra, que depois de tratada tem partículas com um tamanho inferior a 4 mm, é posta em contato com a água sob condições definidas. Segundo a norma, pressupõe-se que o equilíbrio, ou próximo dele, é alcançado entre as fases sólidas e líquidas durante o ensaio. Os resíduos sólidos que resultaram da lixiviação são, posteriormente, separados por filtração e o eluato que daí resulta é enviado para análise.

4.2.2. Materiais e equipamentos utilizados

Os materiais e equipamentos utilizados para este ensaio foram (Figura 36):

- Divisor de amostras – para a realização do quartilhamento;
- Equipamento de peneiração – peneiro de malha com 4 mm;
- Frascos de polietileno com volume nominal de 1 litro e com tampa de material inerte;
- Aparelho de agitação rotativo – para a agitação das amostras;
- Bomba para filtração a vácuo;
- Kitassato de 500ml;
- Funil de Büchner;
- Membranas de filtro de 5.5 cm
- Proveta de 250 ml – para a medição do volume do eluato;
- Ácido nítrico (HNO_3) a 69% PA-ACS-ISSO;
- Balança;
- Água destilada ou água desionizada;
- Tubos de plástico para centrifugação de 15 ml.

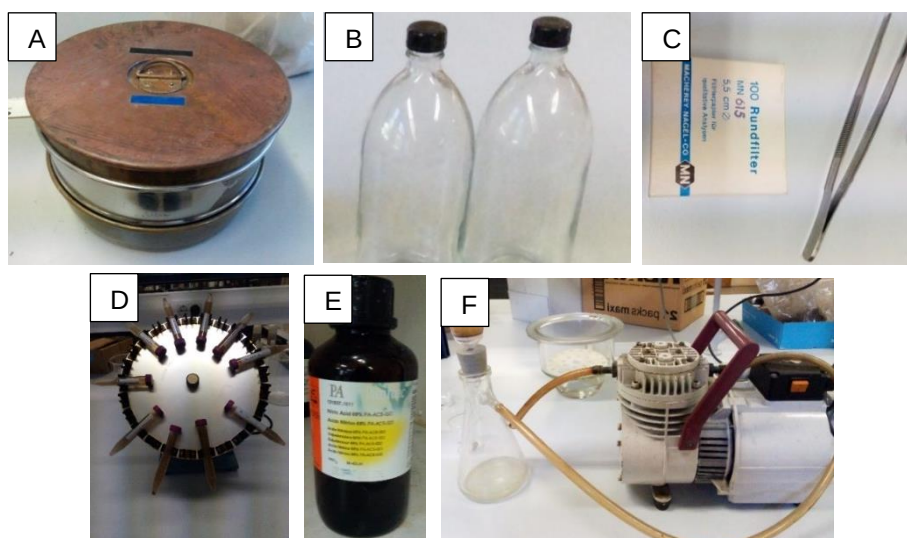


Figura 36 - Material utilizado para o ensaio de lixiviação. A – Peneiro de malha 4 mm; B – Frascos de polietileno de 1 l com tampas de material inerte; C – Aparelho de agitação rotativo com tubos de 15 ml; D - Bomba para filtração a vácuo, Kitassato de 500ml e Funil de Büchner; E - Membranas de filtro de 5.5 cm; F - Ácido nítrico (HNO_3) 69% PA-ACS-SSO.

4.2.3. Preparação das Amostras

Antes de realizar o ensaio de lixiviação prepararam-se as três amostras de modo a obter a quantidade necessária com as características recomendadas para o ensaio. Assim, os solos foram dispostos em tabuleiros, devidamente identificados, pesados e colocados numa estufa a 40°C, até ficarem completamente secos. Após a secagem dos solos, as amostras foram pesadas novamente para obter o peso da massa seca. A Figura 37 apresenta os solos antes e depois de serem colocados na estufa.



Figura 37 - Solos antes e depois de serem colocados na estufa. A – Solo “Porto” húmido; B – Solo “Porto” seco; C – Solo “Braga” húmido; D – Solo “Braga” seco; E - Solo “São João da Madeira” húmido; F – Solo “São João da Madeira” seco.

Posteriormente, com 2 kg de material, quartilhou-se o solo de modo a homogeneizar a quantidade de material a analisar. O método de quartilhamento (Figura 38) é feito repartindo a amostra em quatro partes iguais e selecionando dois quadrantes opostos.



Figura 38 - Quartilhamento da amostra de Braga.

Com a porção já quartilhada, esta foi peneirada (Figura 39) de modo a obter pelo menos 95% de material inferior a 4 mm. É essa fração que vai ser utilizada para o ensaio.



Figura 39 - Redução da amostra para inferior a 4 mm através do peneiro de malha de 4 mm.

4.2.4. Procedimentos

Da porção de material inferior a 4 mm, retiraram-se 90 g que foram colocadas numa garrafa de polietileno de capacidade de 1 litro. Adicionou-se a essa porção 900 ml de água destilada, uma vez que a norma estabelece 10 litros por cada quilograma. Agitou-se ligeiramente a garrafa para misturar a água com o solo e seguidamente distribuíram-se 600ml em tubos de plástico de 15 ml para centrifugação. Colocaram-se

os tubos no aparelho de agitação rotativo para se proceder a uma agitação durante 24h. A Figura 40 apresenta os procedimentos descritos anteriormente.

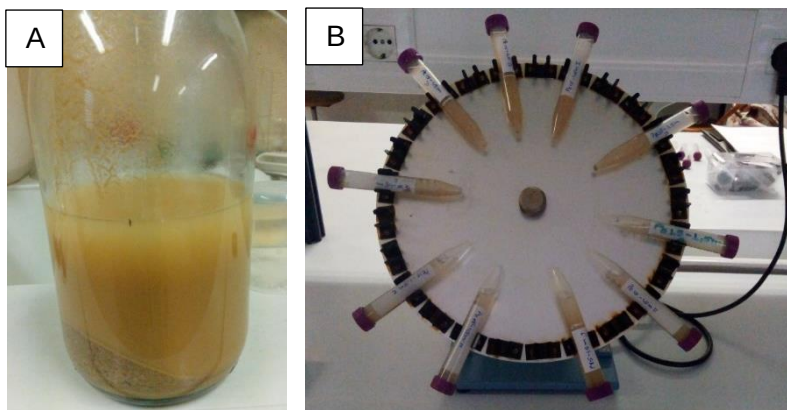


Figura 40 - Procedimentos do ensaio de lixiviação; A – Amostra num frasco de polietileno misturada com 900ml de água; B – Agitação da amostra durante 24h.

Após a agitação, deixou-se repousar a amostra durante 15 min de modo a que os sólidos em suspensão assentassem. De seguida, num filtro enxaguado em ácido nítrico e colocado no funil de Büchner, filtrou-se a amostra de cada um dos tubos para um Kitassato de 500 ml. No resultado final da filtração obtiveram-se 600 ml de eluato para cada amostra, contudo, apenas 500 ml de eluato foram para análise. A Figura 41 apresenta os procedimentos descritos anteriormente.

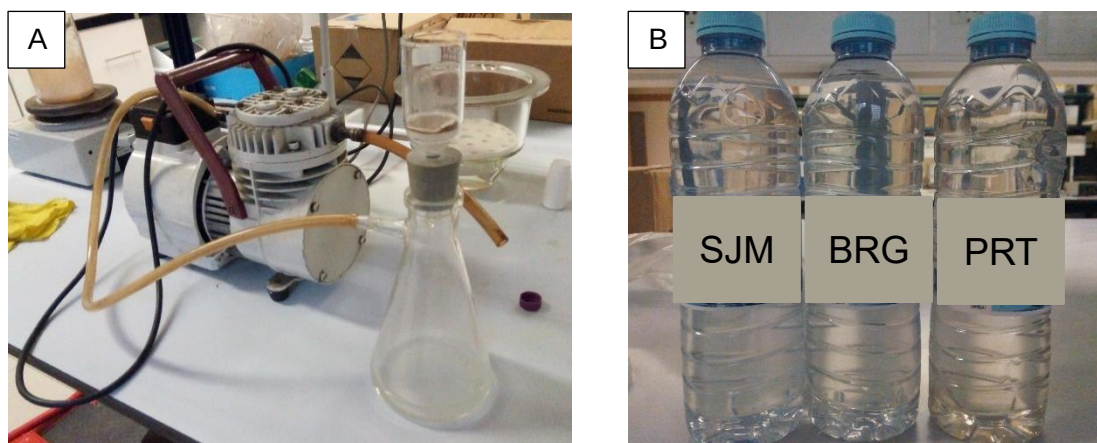


Figura 41 - Procedimentos do ensaio de lixiviação; A – Filtração a vácuo da amostra; B – Obtenção de 600 ml de eluato.

5. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos compreendem, não só a análise química ao eluato resultante do ensaio de lixiviação, como também a análise prévia aos solos a estudar. Apesar de ter sido feito o ensaio de lixiviação para a amostra de São João da Madeira, não foram disponibilizados relatórios das análises ao solo e ao eluato respetivo. Estas análises foram realizadas nos laboratórios da EUROFINS, que fornece serviços de teste e suporte em diversos setores industriais.

As análises prévias aos solos forneceram resultados que foram integrados e interpretados de acordo com os documentos normativos internacionais, nomeadamente as normas do Estado de Ontário do Canadá. Esta norma foi recomendada como referência pela Agência Portuguesa do Ambiente e é constituída pelo documento “*Soil, ground water and sediment standards for use under Part XV.1 of the Environmental Protection Act*” (OME, 2011). Tem por base os valores de referência relativos à qualidade dos solos e/ou águas subterrâneas e à avaliação das condições ambientais dos terrenos, de modo a determinar a necessidade de implementar medidas de remediação.

A análise química do eluato forneceu resultados que foram integrados e interpretados de acordo com o documento normativo nacional, o Decreto-Lei n.º 183/2009. Este documento estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterros e os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros. Os valores de referência utilizados são os que se encontram na parte B do Anexo IV do referido diploma legal, onde se encontram definidos um conjunto de critérios de admissão de resíduos em aterro, incluindo um conjunto de valores limites de lixiviação para os diferentes tipos de aterro.

5.1. Análise de solos

Os valores de referência adotados, para os resultados obtidos nas análises efetuadas, são os que se encontram tabelados na norma anteriormente referida, nomeadamente na Tabela 3, correspondente ao uso do solo como comercial para a condição de águas subterrâneas não potáveis (*Table 3 – Full Depth Generic Site Condition Standards in a Non-Potable Ground Water Condition*).

Os resultados obtidos nas análises ao solo do Porto foram fornecidos segundo o programa analítico e encontram-se apresentados na Tabela 9. Nessa tabela foi utilizada a seguinte codificação de cores:

-  azul – resultado inferior ao limite de quantificação (lq);
-  sem cor – resultado acima do lq e abaixo do valor de referência;
- amarelo, laranja, vermelho e castanho – resultados que excedem os valores de referência segundo a norma internacional de Ontário, 2011:
 -  amarelo: resultado superior a 1 vez o valor de referência;
 -  laranja: resultado superior a 1.5 vezes o valor de referência;
 -  vermelho: resultado superior a 4 vezes o valor de referência;
 -  castanho: resultado superior a 10 vezes o valor de referência.

Os parâmetros analisados na Tabela 9 foram os metais, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), os clorobenzenos, vários compostos orgânicos e os hidrocarbonetos de petróleo (HTP).

AMOSTRA		Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Normas de Ontário (2011) Table 3 (Commercial Use; Medium and fine textured soils)
REFERÊNCIA BOLETIN			2018074298/1						
CARACTERÍSTICAS	Massa Seca	% (w/w)	87.0	82.4	86.2	79.5	82.8	84.3	
	Matéria orgânica	% (w/w)ms	4.0	3.1	2.2	2.6	3.2	2.1	
	Granulometria <2µm (argila)	% (w/w)ms	3.1	5.4	7.2	13.7	11.4	12.9	
METAIS	Arsénio (As)	mg/kg	76	22	28	23	26	20	18
	Bário (Ba)	mg/kg	71	42	40	62	66	61	670
	Berílio (Be)	mg/kg	4.6	1.6	1.2	1.1	1.5	1.3	10
	Crômio (Cr)	mg/kg	44	16	17	17	21	25	160
	Cobalto (Co)	mg/kg	24	3.0	6.0	4.7	4.2	6	100
	Cobre (Cu)	mg/kg	21	14	8.2	8	11	14	300

Tabela 9 – Resultados das análises aos solos do Porto.

AMOSTRA		Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Normas de Ontário (2011) Table 3 (Commercial Use; Medium and fine textured soils)
REFERÊNCIA BOLETIN			2018074298/1						
	Mercúrio (Hg)	mg/kg	<0.050	0.09	0.085	<0.050	0.055	<0.050	20
	Chumbo (Pb)	mg/kg	32	37	16	14	24	14	120
	Níquel (Ni)	mg/kg	42	8.2	7.5	12	11	15	340
	Selénio (Se)	mg/kg	<5.0	57	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	5.5
	Vanádio (V)	mg/kg	50	20	21	24	28	33	86
	Zinco (Zn)	mg/kg	240	72	40	48	61	59	340
HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)	Naftaleno	mg/kg	<0.01	0.2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	28
	Acenafteno	mg/kg	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	96
	Fluoreno	mg/kg	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	69
	Fenantreno	mg/kg	<0.01	0.11	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	16
	Antraceno	mg/kg	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.74
	Fluoranteno	mg/kg	<0.01	0.18	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	9.6
	Pireno	mg/kg	<0.01	0.16	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	96
	Benzo(a)antraceno	mg/kg	<0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.96
	Criseno	mg/kg	<0.01	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	9.6
	Benzo(b)fluoranteno	mg/kg	<0.01	0.11	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.96
	Benzo(k)fluoranteno	mg/kg	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.96
	Benzo(a)pireno	mg/kg	<0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.3
	Dibenzo(ah)antraceno	mg/kg	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.1
	Benzo(ghi)perileno	mg/kg	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	9.6
	Indeno(123cd)pireno	mg/kg	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.95
	HAP 10 VROM (soma)	mg/kg	-	0.89	-	-	-	-	-
	HAP 16 EPA (soma)	mg/kg	-	1.2	-	-	-	-	-
CLOROBENZENOS	Monoclorobenzeno	mg/kg	<0.01	0.25	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-
	1,3-Diclorobenzeno	mg/kg	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	12
	1,4-Diclorobenzeno	mg/kg	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.84
	Diclorobenzenos (soma)	mg/kg	-	0.08	-	-	-	-	-
VÁRIOS COMPOSTOS ORGÂNICOS	Bifenil	mg/kg	<0.005	0.006	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
	HTP > C12-C16	mg/kg	<5.0	8.4	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	250
	HTP > C16-C21	mg/kg	<6.0	21	<6.0	<6.0	<6.0	<6.0	2500

AMOSTRA		Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Normas de Ontário (2011)
REFERÊNCIA BOLETIN			2018074298/1						Table 3 (Commercial Use; Medium and fine textured soils)
HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO (HTP)	HTP > C12-C16	mg/kg	<5.0	8.4	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	250
	HTP > C16-C21	mg/kg	<6.0	21	<6.0	<6.0	<6.0	<6.0	2500
	HTP > C21-C30	mg/kg	<12	230	<12	<12	<12	<12	2500
	HTP > C30-C35	mg/kg	<6.0	95	<6.0	<6.0	<6.0	7.1	2500
	HTP > C35-C40	mg/kg	<6.0	13.0	<6.0	<6.0	<6.0	<6.0	6600
	HTP C10-C40 (soma)	mg/kg	<38	370	<38	<38	<38	<38	-

Observando a tabela é possível verificar que a maioria dos parâmetros apresentam valores inferiores ao limite de quantificação exceto na sondagem 2 (P2). Para além disso, o arsénio tem valores superiores ao valor de referência em todas as sondagens (P1, P2, P3, P4, P5 e P6) e o selénio apenas na sondagem 2 (P2).

Numa análise mais detalhada é possível concluir que o solo do Porto contém valores bastante elevados de arsénio, comparativamente ao que é estipulado pela norma, principalmente na amostra da sondagem P1, cujo valor é quatro vezes superior ao valor de referência. Contem também um valor elevado de selénio que é dez vezes superior ao valor de referência na amostra da sondagem P2.

Os resultados obtidos nas análises ao solo de Braga foram fornecidos segundo o programa analítico e encontram-se apresentados na Tabela 10. Nessa tabela foi utilizada a seguinte codificação de cores:

-  azul – resultado inferior ao limite de quantificação (lq);
-  sem cor – resultado acima do lq e abaixo do valor de referência;
- amarelo, laranja, vermelho – resultados que excedem os valores de referência segundo a norma internacional de Ontário, 2011:
 -  amarelo: resultado superior a 1 vez o valor de referência;
 -  laranja: resultado superior a 1.5 vezes o valor de referência;
 -  vermelho: resultado superior a 2.5 vezes o valor de referência.

Os parâmetros analisados, apresentados na Tabela 10, foram os metais, os fenóis, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), os clorofenóis, vários hidrocarbonetos clorados, os pesticidas organoclorados, vários compostos orgânicos e os hidrocarbonetos de petróleo (HTP).

Tabela 10 – Resultados das análises aos solos de Braga.

AMOSTRA		Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	Normas de Ontário (2011)
REFERÊNCIA BOLETIN ANALÍTICO			2018074326/1					Table 3 (Commercial Use; Medium and fine textured soils)
CARACTERÍSTICAS	Massa Seca	% (w/w)	80.5	80.7	69.8	79.4	74.5	
	Matéria orgânica	% (w/w)ms	4.4	4.8	5.3	3.9	5.5	
	Granulometria <2µm (argila)	% (w/w)ms	9.0	4.5	7.3	5.6	12.9	
METAIS	Arsénio (As)	mg/kg	25	16	19	47	28	18
	Antimónio (Sb)	mg/kg	<3.0	<3.0	6.9	<3.0	<3.0	50
	Bário (Ba)	mg/kg	220	240	330	160	260	670
	Berílio (Be)	mg/kg	2.1	1.5	1.1	1.9	1.6	10
	Crómio (Cr)	mg/kg	21	18	19	18	22	160
	Cobalto (Co)	mg/kg	11	7.3	7.4	5.9	8.4	100
	Cobre (Cu)	mg/kg	55	74	110	23	290	300
	Mercúrio (Hg)	mg/kg	0.76	1.1	1.3	<0.050	0.83	20
	Chumbo (Pb)	mg/kg	91	160	230	18	220	120
	Níquel (Ni)	mg/kg	9.6	8.2	11	6.6	10	340
	Estanho (Sn)	mg/kg	6.4	13	130	<5.0	44	-
	Vanádio (V)	mg/kg	43	37	34	46	43	86
	Zinco (Zn)	mg/kg	97	160	250	71	150	340
FENÓIS	p-Cresol	mg/kg	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	-
	Cresóis (soma)	mg/kg	-	-	0.01	-	-	-
HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)	Naftaleno	mg/kg	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.01	28
	Acenafteno	mg/kg	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	96
	Fluoreno	mg/kg	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	69
	Fenantreno	mg/kg	<0.01	0.03	0.09	<0.01	0.09	16
	Antraceno	mg/kg	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.01	0.74

AMOSTRA		Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	Normas de Ontário (2011)
REFERÊNCIA BOLETIN ANALÍTICO			2018074326/1					Table 3 (Commercial Use; Medium and fine textured soils)
	Fluoranteno	mg/kg	<0.01	0.04	0.14	<0.01	0.14	9.6
	Pireno	mg/kg	<0.01	0.04	0.12	<0.01	0.15	96
	Benzo(a)antraceno	mg/kg	<0.01	0.02	0.05	<0.01	0.04	0.96
	Criseno	mg/kg	<0.01	0.02	0.05	<0.01	0.05	9.6
	Benzo(b)fluoranteno	mg/kg	<0.01	0.04	0.09	<0.01	0.08	0.96
	Benzo(k)fluoranteno	mg/kg	<0.01	0.01	0.03	<0.01	0.03	0.96
	Benzo(a)pireno	mg/kg	<0.01	0.03	0.05	<0.01	0.04	0.3
	Dibenzo(ah)antraceno	mg/kg	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.1
	Benzo(ghi)perileno	mg/kg	<0.01	0.03	0.06	<0.01	0.04	9.6
	Indeno(123cd)pireno	mg/kg	<0.01	0.03	0.05	<0.01	0.03	0.95
	HAP 10 VROM (soma)	mg/kg	-	0.22	0.55	-	0.49	-
	HAP 16 EPA (soma)	mg/kg	-	0.31	0.84	-	0.72	-
CLOROFENÓIS	2,4/2,5-Diclorofenol	mg/kg	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	4.2
	3,5-Diclorofenol	mg/kg	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	-
	Diclorofenóis (soma)	mg/kg	-	-	0.003	-	-	-
VÁRIOS HIDROCARBONETOS CLORADOS	2-Clorotolueno	mg/kg	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	-
	4-Clorotolueno	mg/kg	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-
	Clorotoluenos (soma)	mg/kg	-	0,03	-	-	-	-
PESTICIDAS ORGANOCLO- RADOS	4,4-DEE	mg/kg	<0.001	0.003	<0,001	<0.001	0.003	-
	4,4-DDD + 2,4-DDT	mg/kg	<0.001	0.005	<0.001	<0.0001	0.005	-
	2,4-DDD	mg/kg	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	-

MOSTRA		Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	Normas de Ontário (2011)
REFERÊNCIA BOLETIM ANALÍTICO			2018074326/1					Table 3 (Commercial Use; Medium and fine textured soils)
	DDT/DDE/DDD (soma)	mg/kg	<0.001	0.007	<0.001	<0.001	0.009	-
VÁRIOS COMPOSTOS ORGÂNICOS	Bifenil	mg/kg	<0.005	<0.005	0.01	<0.005	0.006	-
	Dibenzofurano	mg/kg	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	-
HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO (HTP)	Frações HTP	mg/kg	<3.0	<3.0	6.2	<3.0	<3.0	-
	HTP > C12-C16	mg/kg	<5.0	<5.0	85	<5.0	<5.0	250
	HTP > C16-C21	mg/kg	<6.0	7.8	120	<6.0	<6.0	2500
	HTP > C21-C30	mg/kg	<12	32	130	<12	16	2500
	HTP > C30-C35	mg/kg	7.6	20	74	<6.0	10	2500
	HTP > C35-C40	mg/kg	<6.0	8.0	32	<6.0	<6.0	6600
	HTP C10-C40 (soma)	mg/kg	<38	71	450	<38	<38	-

Analisando a tabela é possível verificar que a maioria dos parâmetros apresentam valores inferiores ao limite de quantificação. Contudo, o arsénio apresenta valores superiores aos valores de referência principalmente na amostra da sondagem P4 cujo valor é 2.5 vezes superior ao valor de referência. O chumbo também apresenta valores superiores nas amostras das sondagens P2, P3 e P5.

5.2. Análise ao eluato

Os resultados obtidos nas análises químicas dos eluatos, resultante do ensaio de lixiviação, foram comparados com as Tabelas n.º 2 e n.º 3 da parte B, do Anexo IV do Decreto-Lei n.º 183/2009, onde se encontram definidos os valores limites para admissão de resíduos em aterros para resíduos inertes, e com a Tabela n.º 4, do mesmo decreto-lei, onde estão estabelecidos os valores limites de lixiviação para admissão de resíduos em aterros para resíduos não perigosos.

Estes resultados encontram-se nas Tabelas 11 e 12 correspondentes aos solos de Porto e Braga respetivamente, cuja interpretação foi realizada pela seguinte codificação de cores:

-  verde – parâmetro analisado na substância original;
-  amarelo – parâmetro analisado, após a agitação, no eluato resultante, com o fator de diluição 10:1;
-  azul – resultado inferior ao limite de quantificação (lq);
-  sem cor – resultado acima do lq e abaixo do valor limite;
-  vermelho – resultado superior ao valor limite das Tabelas n.º 2 e n.º 3 do Anexo IV, da Parte B do Decreto-Lei nº183/2009.

No que diz respeito à Tabela 11, correspondente ao eluato do solo do Porto, os parâmetros analisados foram os parâmetros orgânicos, BTEX e hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB), aniões e metais. Apenas os parâmetros COT, TPH não-polar C10-C40, BTEX (soma), HAP 16 EPA (soma) e PCB (7) (soma) foram analisados na substância original, sendo os restantes analisados após a agitação do eluato com o fator diluição 10:1.

Tabela 11 – Resultados analíticos do eluato obtido com o ensaio de lixiviação para o solo do Porto.

PARÂMETROS		Unidades	REFERÊNCIA DO BOLETIM GELT20180203-1-V0	Decreto-Lei nº 183/2009 Anexo IV - Parte B Valores limites para admissão em aterros para resíduos inertes Tabela nº2 - Valores limites de lixiviação Tabela nº3 - Valores limites para o teor total de parâmetros orgânicos
CARACTERÍSTICAS	Massa Seca	% (w/w)	91.8	-
SOMA DE PARÂMETROS ORGÂNICOS	COT (Carbono Orgânico Total)	mg/kg	6800	30000
	TPH não-polar C10-C40	mg/kg	<40	500
	COD (Carbono Orgânico Dissolvido)	mg/kg	26	500
	Índice de fenol, vapor volátil	mg/kg	<0.10	1
BTEX E HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS	BTEX (soma)	mg/kg	n.c.	6
HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)	HAP 16 EPA (soma)	mg/kg	n.c.	100

PARÂMETROS		Unidades	REFERÊNCIA DO BOLETIM GELT20180203-1-V0	Decreto-Lei nº 183/2009 Anexo IV - Parte B Valores limites para admissão em aterros para resíduos inertes Tabela nº2 - Valores limites de lixiviação Tabela nº3 - Valores limites para o teor total de parâmetros orgânicos
BIFENILOS POLICLORADOS (PCB)	PCB (7) (soma)	mg/kg	n.c.	1
	Fluoreto	mg/kg	3	10
ANIÕES	Cloreto	mg/kg	<10	800
	Sulfatos	mg/kg	70	1000
METAIS	Antimónio (Sb)	mg/kg	<0.01	0.06
	Arsénio (As)	mg/kg	0.02	0.5
	Bário (Ba)	mg/kg	0.03	20
	Chumbo (Pb)	mg/kg	<0.01	0.5
	Cádmio (Cd)	mg/kg	<0.003	0.04
	Crómio (Cr)	mg/kg	<0.01	0.5
	Cobre (Cu)	mg/kg	<0.05	2
	Molibdénio (Mo)	mg/kg	0.03	0.5
	Níquel (Ni)	mg/kg	<0.01	0.4
	Mercúrio (Hg)	mg/kg	<0.002	0.01
	Selénio (Se)	mg/kg	<0.01	0.1
	Zinco (Zn)	mg/kg	<0.1	4

Analisando a tabela é possível verificar que todos parâmetros se encontram dentro dos limites de referência e alguns desses parâmetros apresentam valores inferiores ao limite de quantificação. Dada esta informação, conclui-se que o solo de uma área industrial do Porto é um solo/resíduo admissível em aterro para resíduos inertes, uma vez que cumpre os requisitos necessários para a sua admissão.

Os parâmetros analisados relativos ao eluato do solo de Braga, na Tabela 12, foram os parâmetros orgânicos, BTEX e hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB), aniões e metais. Desses parâmetros, apenas o COT, TPH não-polar C10-C22, TPH não-polar C10-C40, BTEX (soma), fenantreno, fluoranteno, pireno, benzeno (b) fluoranteno, benzeno (g, h, i) perileno, HAP 16 EPA (soma) HAP 15 sem naftaleno (soma) e PCB (7) (soma) foram

analizados na substância original e os restantes parâmetros analisados após a agitação do eluato com o fator de diluição de 10:1.

Tabela 12 – Resultados analíticos do eluato obtido com o ensaio de lixiviação para o solo de Braga.

PARÂMETROS		Unidades	REFERÊNCIA DO BOLETIM GELT20180203-2-V0	Decreto-Lei nº 183/2009 Anexo IV - Parte B	
				Valores limites para admissão em aterros para resíduos inertes Tabela nº2 - Valores limites de lixiviação Tabela nº3 - Valores limites para o teor total de parâmetros orgânicos	Valores limites para admissão em aterros para resíduos não perigosos Tabela nº4 - Valores limites de lixiviação
CARACTERÍSTICAS	Massa Seca	% (w/w)	86.5	-	-
SOMA DE PARÂMETROS ORGÂNICOS	COT (Carbono Orgânico Total)	mg/kg	14000	30000	-
	TPH não-polar C10-C22	mg/kg	120	-	-
	TPH não-polar C10-C40	mg/kg	450	500	-
	COD (Carbono Orgânico Dissolvido)	mg/kg	63	500	1000
	Índice de Fenol, vapor volátil	mg/kg	<0.10	1	-
BTEX E HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS	BTEX (soma)	mg/kg	n.c.	6	-
HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)	Fenantreno	mg/kg	0.11	-	-
	Fluoranteno	mg/kg	0.14	-	-
	Pireno	mg/kg	0.15	-	-
	Benzo(b)fluoranteno	mg/kg	0.07	-	-
	Benzo(g,h,i)perileno	mg/kg	0.07	-	-
	HAP 16 EPA (soma)	mg/kg	0.54	100	-
	HAP 15 sem naftaleno (soma)	mg/kg	0.54	-	-
BIFENILOS POLICLORADOS (PCB)	PCB (7) (soma)	mg/kg	n.c.	1	-

PARÂMETROS		Unidades	REFERÊNCIA DO BOLETIM GELT20180203-2-V0	Decreto-Lei nº 183/2009 Anexo IV - Parte B	
				Valores limites para admissão em aterros para resíduos inertes Tabela nº2 - Valores limites de lixiviação Tabela nº3 - Valores limites para o teor total de parâmetros orgânicos	Valores limites para admissão em aterros para resíduos não perigosos Tabela nº4 - Valores limites de lixiviação
ANIÕES	Fluoreto	mg/kg	4	10	250
	Cloreto	mg/kg	<10	800	50000
	Sulfatos	mg/kg	200	1000	20000
METAIS	Antimónio (Sb)	mg/kg	0.12	0.06	0.7
	Arsénio (As)	mg/kg	0.09	0.5	5
	Bário (Ba)	mg/kg	0.19	20	100
	Chumbo (Pb)	mg/kg	<0.01	0.5	10
	Cádmio (Cb)	mg/kg	<0.003	0.04	2
	Crómio (Cr)	mg/kg	0.03	0.5	20
	Cobre (Cu)	mg/kg	0.10	2	50
	Molibdénio (Mo)	mg/kg	0.04	0.5	10
	Níquel (Ni)	mg/kg	<0.01	0,4	10
	Mercúrio (Hg)	mg/kg	<0.002	0.01	0.5
	Selénio (Se)	mg/kg	<0.01	0.1	0.5
	Zinco (Zn)	mg/kg	<0.1	4	50

Analisando a tabela é possível verificar que a maioria dos parâmetros se encontra dentro do limite de referência e os parâmetros cloreto, chumbo, cádmio, níquel, mercúrio, selénio e zinco apresentam valores inferiores ao limite de quantificação. No entanto, o antimónio apresenta um valor superior ao limite de referência das Tabelas n.º 2 e n.º 3 para ser classificado como resíduo inerte, mas inferior ao limite de referência da Tabela n.º 4 para ser classificado como resíduo não perigoso.

Dada esta informação, conclui-se que o solo de Braga não poderá ser um resíduo admissível num aterro para resíduos inertes, tendo em conta que apresenta um

parâmetro com valor superior, ao que é permitido por lei, para a sua deposição, logo não pode ser depositado na pedreira da Madalena, mas poderá ser depositado num aterro para resíduos não perigosos.

6. Considerações finais

A Pedreira da Madalena encontra-se inserida numa zona urbana e, por isso, na sua envolvente pode conter possíveis fontes de contaminação que podem, por sua vez, influenciar a qualidade hídrica subterrânea. Foram identificados dois tipos de potenciais fontes de contaminação (Tipo A e Tipo B), contudo estas fontes não estarão a influenciar, de forma relevante, a qualidade das águas subterrâneas.

Dada a situação atual da Pedreira da Madalena, os resultados obtidos nas campanhas de monitorização dos três piezómetros apresentam alguns valores anómalos quando comparados com os Valores Máximos Recomendáveis (VMR), os Valores Máximos Admissíveis (VMA) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto e, em particular, com a Situação de Referência (SR) datada de maio de 2001. Os piezómetros 2 e 3 são os que contêm mais parâmetros físico-químicos com valores anómalos, nomeadamente, os valores obtidos para a condutividade elétrica na água colhida nos dois piezómetros são notoriamente bastante mais elevados do que a SR. No caso do parâmetro sulfatos este encontra-se presente nas águas dos três piezómetros.

O facto de haver alguns parâmetros físico-químicos com valores superiores aos valores de referência, estipulados no Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto, nos piezómetros 2 e 3, levou a concluir que os materiais, depositados na pedreira da Madalena, poderão estar a contribuir para alterar a qualidade das águas subterrâneas, mesmo apesar de serem classificados como resíduos inertes. Por isso, foi necessário avaliar os materiais, que vão ser depositados na pedreira, de modo a determinar se são, realmente, resíduos inertes admissíveis nesse tipo de aterro ou se apresentam algum tipo de reação que os leve a classificar como não inertes.

Assim, a metodologia utilizada para o desenvolvimento da presente dissertação passou pela execução de um ensaio de lixiviação de acordo com a norma EN12457-2:2002. Amostraram-se três solos provenientes de áreas industriais em recuperação localizadas no Porto, Braga e São João da Madeira, para o ensaio laboratorial. Apesar de ter sido feito o ensaio de lixiviação para as amostras de São João da Madeira, não foi possível obter os seus resultados.

As análises de solos forneceram resultados que foram integrados e interpretados de acordo com os documentos normativos internacionais, nomeadamente as normas do Estado de Ontário do Canadá, *Soil, ground water and sediment standards for use under Part XV.1 of the Environmental Protection Act*". A análise química do eluato forneceu

resultados que foram integrados e interpretados de acordo com o documento normativo nacional, o Decreto-Lei n.º 183/2009.

Dado a análise de solos, foi possível concluir que o solo do Porto contem valores bastante elevados de arsénio e selénio, comparativamente ao que é estipulado pela norma, por outro lado, o solo de Braga contem valores de arsénio e chumbo superiores aos valores de referência.

Relativamente às análises químicas ao eluato o solo do Porto é um resíduo admissível em aterro de resíduos inertes, uma vez que cumpre os requisitos necessários para a sua admissão. Por outro lado, o solo de Braga não poderá ser um resíduo admissível em aterro de resíduos inertes, tendo em conta que o antimónio apresenta um valor superior ao que é permitido por lei. Assim, o solo da área industrial de Braga não pode ser depositado na pedreira da Madalena, devendo ser encaminhado para um aterro de resíduos não-perigosos.

7. Referências Bibliográficas

AFONSO, D. S., SOUSA, L. M. O., 2012. *Pedreiras sujeitas a Avaliação de Impacte Ambiental*. Capítulo 15. In: L. Sousa (Eds). Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como fator de desenvolvimento regional. Uma abordagem multidisciplinar. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 187-198. ISBN 978-972-704-375-0.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, 2016. *Passivos Ambientais: Guia Metodológico Para a Identificação de Novos Passivos Ambientais*. República Portuguesa Ambiente.

ALMEIDA, C., MENDONÇA, J. J. L., JESUS, M. R., GOMES, A. J., 2000. *Sistemas de Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia, Instituto da Água.

ARAÚJO, M. A., GOMES, A., CHAMINÉ, H. I., FONSECA, P. E., GAMA PEREIRA, L. C., PINTO DE JESUS, A., 2003. *Geomorfologia e Geologia Regional do sector Porto-Espinho (W de Portugal): Implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozoica*. Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe. Coruña. Vol. 28, 79-105pp.

AZEVEDO, R. M., VALLE AGUADO, B., 2013. *Origem e instalação de granitóides variscos na Zona Centro Ibérica*. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha e J. Kullberg (Eds.). *Geologia de Portugal*. Vol. 1, pp. 377-401. Lisboa: Escolar Editora. ISBN: 978-972-592-3641.

BASTOS, M., SILVA, I., 2006. *Restauração, Reabilitação e Reconversão na Recuperação Paisagística de Minas e Pedreiras*. Visa Consultores. ANIET.

CANILHO, M. H., 1975. *Contribuição para o conhecimento do granito de Lavadores*. Boletim da Sociedade Geológica de Portugal, Vol. XIX, Fasc. III: 173-193.

CARAPETO, C., 1999. *Poluição das Águas: Causas e efeitos*. Universidade Aberta. Lisboa. 241pp. ISBN 978-972-674-523-5.

CARRETO, A. M. A., 2012. *Relatório Detalhado de Atividade Profissional 2006-2012*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Letras. Universidade do Porto.

CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1/50 000. Folha 9-C (Porto). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa 1957.

CARTA HIDROGEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1/200 000. Folha 1. Instituto Geológico e Mineiro.

CARVALHO, J. M., 1999. *Águas Subterrâneas e Ordenamento do Território*. Geonovas, Lisboa. 13: 5-9.

CARVALHO, J. M., 2006. *Prospecção e Pesquisa dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Maciço Antigo Português: Linhas Metodológicas*. Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências. Universidade de Aveiro.

CASARINI, D. C. P., DIAS, C. L., BARBOUR, E. D., TOFFOLI, F. F., 2004. *Gestão da Qualidade e Risco de Contaminação do Recurso Hídrico Subterrâneo*. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 20pp.

CCDR-N, 2008. *Plano de Acção para a Qualificação do Ambiente no Norte de Portugal 2008-2010*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte – Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Coimbra. 112pp. ISBN 978-972-734-270-9.

CHAMINÉ, H. G. I., 2000. *Estratigrafia e Estrutura da Faixa Metamórfica de Espinho – Albergaria-a-Velha (Zona da Ossa Morena) Implicações Geodinâmicas*. Tese de Doutoramento. Departamento de Geologia. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

CHAMINÉ, H. I., GAMA PEREIRA, L. C., FONSECA, P. E., NORONHA, F., LEMOS DE SOUSA, M. J., 2003. *Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto – Albergaria-a-Velha – Tomar, entre as zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico W de Portugal)*. Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe. Coruña. Vol. 28, 37-78pp.

CHERNICOFF, S. e VENKATAKRISHNAN. R., 1995. *Geology*. Worth Publishers, New York. ISBN 0879014512.

CHILTON, J., 2006. *Assessment of aquifer pollution vulnerability and susceptibility to the impacts of abstraction*. Cap. 8. O. Schmoll, G. Howard, J. Chilton, I. Chorus (Eds). Protecting Groundwater for Health. Managing the Quality of Drinking-water Sources. World Health Organization. London, UK. 199-241. ISBN 92 4 154668 9.

COELHO, A. M. S., 2006. *Depósitos de caulino associados a faixas de fraturação: geologia, morfotectónica e georrecurso*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências. Universidade de Aveiro.

CORREIA, V. F., SOUSA, L. M. O., 2012. *Recuperação Ambiental e Paisagística de Pedreiras*. Capítulo 18. In: L. Sousa (Eds). Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como fator de desenvolvimento regional. Uma abordagem multidisciplinar. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 187-198. ISBN 978-972-704-375-0.

COXITO AFONSO, M. J., CHAMINÉ, H. L., GOMES, A., TEIXEIRA, J., M. J., ARAÚJO, M. A., FONSECA, P. E., CARVALHO, J. M., MARQUES, J. M., MARQUES DA SILVA, M. A., ROCHA, F. T., 2004. *Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos*. Xeográfica, Revista de Xeografia, Território e Medio Ambiente. Nº 4. 101-115. ISSN 1578-5637.

CUSTODIO, E., LLAMAS. M. R. 2001. *Hidrologia Subterrânea. Volume I*. 2ª Edição. Edições Omega S.A., Barcelona. ISBN 9788428202817.

DECRETO-LEI n.º 10/2010, de 4 de Fevereiro, Diário da República n.º 24/2010– I Série. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território*.

DECRETO-LEI n.º 178/2006, de 5 de Setembro, Diário da República n.º 171/2006– I Série. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional*.

DECRETO-LEI n.º 178/2006, de 5 de Setembro, Diário da República nº 171/2006 – I Série. *Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional*.

DECRETO-LEI n.º 183/2009, de 10 de Agosto, Diário da República n.º 153/2009– I Série. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional*.

DECRETO-LEI n.º 208/2008, de 28 de Outubro, Diário da República nº 209/2008 – I Série. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional*.

DECRETO-LEI n.º 236/98, de 1 de Agosto, Diário da República nº 176/1998 – I Série-A. *Ministério do Ambiente*.

DECRETO-LEI n.º 270/2001, de 6 de Outubro, Diário da República n.º 232/2001 – I Série - A. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território.*

DECRETO-LEI n.º 306/2007, de 27 de Agosto, Diário da República nº 164/2007 – I Série. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.*

DECRETO-LEI n.º 340/2007, de 12 de Outubro, Diário da República n.º 197/2007 – I Série. *Ministério da Economia e da Inovação.*

DECRETO-LEI n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, Diário da República n.º 249/2005– I Série-A. *Assembleia da República.*

DECRETO-LEI n.º 69/2000, de 3 de Maio, Diário da República n.º 102/2000– I Série-A. *Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território.*

DIREÇÃO DE SERVIÇOS DE AMBIENTE – DIVISÃO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL (DAS - DAA), 2008. *Identificação e Caracterização de Passivos Ambientais e Locais Potencialmente Contaminados da Região Norte: Programa Operacional Regional do Norte: Eixo 3 – Valorização e Qualificação Ambiental e Territorial – Reabilitação de Locais Contaminados e Zonas Extractivas.* Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional Norte (CCDR-N) - Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

DOMENICO, P. A., SCHWARTZ, F. W., 1990, 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology.* Second Edition. John Wiley & Sons. 543pp. ISBN 0-471-59762-7.

EDM, 2011. *A Herança das Minas Abandonadas: O Enquadramento e a Atuação em Portugal.* Empresa de Desenvolvimento Mineiro – Direção Geral da Energia e Geologia.

EN 12457-2, 2002. *Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction).* CEN. European Standard. 27pp.

FETTER, C.W., 2001. *Applied Hidrogeology.* 4th Edition. Prentice Hall, New Jersey. ISBN 978-0130882394.

FERREIRA, N., Iglesias Ponce de León, M., Noronha, F., Ribeiro, A., Ribeiro, M. L., 1987. *Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico.* In: Bea,

F., Carnicero, A., Gonzalo, J.C., López Plaza, M. & Rodriguez Alonso, M.D. (Eds.)
Geología de los Granitoides e Rocas Asociadas del Macizo Hespérico, Editorial Rueda,
Madrid, 37-51.

FIGEIREDO, J. M., 2001. *Guia Técnico – Setor da Pedra Natural*. Instituto Nacional de
Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI).

FITTS, C. R., 2002. *Groundwater Science*. Academic Press, Elsevier Science. ISBN 0-
12-257855-4.

FREITAS, L. F., 2010. *Análise hidro-histórica das águas subterrâneas do Porto, séculos
XIX e XXI: inventário, base de dados de cartografia SIG*. Tese de Mestrado. Faculdade
de Letras. Universidade do Porto.

GONÇALVES, S. I. C., 2014. *Contributo para o Plano de Gestão Ambiental do Núcleo
de Pedreiras das Pedras Finas*. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Viana
do Castelo.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Ingeniería
Geológica*. Pearson Educacion. Pearson Educación, Madrid. ISBN 84-205-3104-9.

GUIOMAR, N. R. G. N., 2005. *Modelo de análise espacial em sistemas de informação
geográfica para requalificação biofísica de explorações mineiras*. Tese de mestrado.
Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação. Universidade de Lisboa.

HISCOCK, K. M. e BENSE, V. F., 2014. *Hidrogeology: Principles and Practice*. Second
Edition. Wiley Blackwell. ISBN 978-0-470-65662-4.

INSTITUTO GEOLÓGICO E MINEIRO (IGM), 2001. *Água Subterrânea: conhecer para
preservar o futuro*. Programa Ciência Viva.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE), 2012. *Censos 2011: Resultados
Definitivos – Região Norte*. Lisboa. 390pp.

LEITÃO, T. E., 2010. *Gestão Integrada e Sustentável da Qualidade das Águas
Subterrâneas em Portugal: Contributos para um Bom estado em 2015*. 10º Congresso
da Água – Marcas d'Águas. Algarve. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.
20pp.

LEITÃO, T. E., HENRIQUES, M. J. A., BARBOSA, A. E., 2008. *Avaliação da eficácia
das medidas de minimização de impactes ambientais implementadas em Portugal*.

Recursos Hídricos e Solos. Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Ministério das Obras Públicas, Transporte e Comunicações. Lisboa.

LNEG, 2010. *Recursos Minerais: o potencial de Portugal*. Rumo ao fornecimento seguro e à gestão sustentável de recursos minerais Europeus. 29pp.

MARTINS, L. M. O., Sousa, L. M. O., 2012. *Impactes Ambientais Resultantes da Atividade Extrativa*. Capítulo 14. In: L. Sousa (Eds). Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como fator de desenvolvimento regional. Uma abordagem multidisciplinar. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 187-198. ISBN 978-972-704-375-0.

MEIRA, J. M. L., 1999. *A Adequabilidade das Pedreiras para a Instalação de Aterros de Resíduos*. VISA Consultores – Comunicações Técnicas.

MONTEIRO, R. I. M. R., 2008. *Estudo Geológico e Geotécnico de Taludes Rochosos em S. Pedro da Afurada (Vila Nova de Gaia): Contributos para a Avaliação da Estabilidade Estrutural*. Departamento de Engenharia Geotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

MORENO, P., MADUREIRA, S., FERNANDES, L., CABRITA, V., 2005. *Relatório 2.9: Morfotipologias de Ocupação do Território*. Plano diretor municipal Gaia. Gaiurb. Município de V. N. Gaia. 37pp.

MOURA, S. C. A., SOUSA, L. M. O., 2012. *Resíduos da Indústria do Granito*. Capítulo 16. In: L. Sousa (Eds). Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como fator de desenvolvimento regional. Uma abordagem multidisciplinar. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 187-198. ISBN 978-972-704-375-0.

New York. ISBN 0879014512.

OLIVEIRA, B. R. F., 2009. *Cemitérios: Impacte nas Águas Subterrâneas*. Tese de Mestrado. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.

OME, 2011. *Soil, ground water and sediment standards for use under Part XV.1 of the Environmental Protection Act*. Ministry of the Environment. 27pp.

PEREIRA, E., MIRANDA, H., LEITE, A., 2000. *Caraterização Geológica/Estrutural da pedreira da Quinta do Moinho Canidelo – Vila Nova de Gaia*. Departamento de Minas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

RIBEIRO, M. A., MARQUES, M., VASCONCELHOS, C., FLORES, D., 2006. *Geologia da Faixa Litoral entre Lavadores e o Castelo do Queijo*. XIV Simpósio Ibérico do Ensino da Geologia, XXVI Curso de Actualização de Professores de Geociências. Universidade de Aveiro, Portugal. 42pp.

RIVETT, M., DREWES, J., BARRETT, M., CHILTON, J., APPLEYARD S., DIETER H. H., WAUCHOPE, D., FASTNER, J., 2006. *Chemical: Health relevance, transport and attenuation*. Cap. 4. In: O. Schmoll, G. Howard, J. Chilton, I. Chorus (Eds). *Protecting Groundwater for Health. Managing the Quality of Drinking-water Sources*. World Health Organization. London, UK. 81-137. ISBN 92 4 154668 9.

RODRIGUES, J. D., 1984. *Noções de Hidrogeologia*. Geonovas, Lisboa. 7: 11-30.

SANTOS OLIVEIRA, J. F., MENDES, B., LAPA, N., 2009. *Resíduos: Gestão, Tratamento e sua Problemática em Portugal*. Lidel, Lisboa. 556pp. ISBN: 9727575048.

SILVA, D. A. A., 2013. *Estudo da Contaminação de Águas pela Extração Mineira de Carvão em S. Pedro da Cova*. Tese de Mestrado. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território. Faculdade de Ciências. Universidade do Porto.

SIMPLEX, 2016. *Guião de Pedreiras*. Direção Geral de Energia e Geologia. República Portuguesa da Economia.

TEIXEIRA, J. A. A., 2011. *Hidrogeomorfologia e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos*. Tese de Mestrado. Departamento de Geociências. Universidade de Aveiro. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território. Faculdade de Ciências. Universidade do Porto.

VALADARES, C. F., 2015. *Recuperação Ambiental da Pedreira do Corgo do Lombo*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências. Universidade do Porto. Universidade de Aveiro.

Webgrafia

AMARO, R. (2009). *Exportação de Paralelepípedos na década de 50 do século XX pelo Porto comercial do Douro*. Navios à Vista. Acedido a 8 de março de 2018.
<http://naviosavista.blogspot.com/2009/03/exportacao-de-paralelepipedos-na-decada.html>.

BRODKOM, F., 2000. *As Boas Práticas Ambientais na Indústria Extrativa: Um Guia de Referência*. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro. Acedido a 26 de março de 2018. http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/praticas_ambientais.

CETESB, 2018. *Poluição das Águas Subterrâneas*. Águas Subterrâneas. Água. Governo do Estado de São Paulo. Acedido a 26 de março de 2018. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/informacoes-basicas/poluicao-das-aguas-subterraneas/>

INSTITUTO GEOLÓGICO E MINEIRO (IGM), 1999. *Regras de Boa Prática no Desmonte a Céu Aberto*. Acedido a 26 de março de 2018. http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/boa_pratica/indice.htm.

REBELO, D., MORGADO, M., MEDINA, J., BONITO, J., MARQUES, L., SOARES DE ANDRADE, A., 2015. *Materiais Curriculares para um contexto geológico local: o caso da pedreira da Quinta do Moinho (Vila Nova de Gaia)*. Interacções. Nº 39. 322-342. Acedido a 8 de março de 2018. <http://revistas.rcaap.pt/interaccoes>.

SNIAMB, 2018. Acedido a 8 de março de 2018. <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt>.

SOLUSEL, 2018. Acedido a 8 de março de 2018. <http://www.solusel.pai.pt/>.

STONE, C., 2014. *Methods, materials and mechanisms for laboratory leaching techniques*. Understanding Leachate Analysis. AWE Internacional Magazine. Acedido a 26 de março de 2018. <https://www.aweimagazine.com/article/understanding-leachate-analysis-1081>.

VISA CONSULTORES, 2012. *Licenciamento de Pedreiras*. Licenciamento da Atividade Mineira em Portugal. Acedido a 26 de março de 2018. <http://visaconsultores.pt/servicos.php?cat=4&code=39>.

VISA CONSULTORES, 2012. *Planos de Recuperação Paisagística*. Ambiente. Acedido a 3 de maio de 2018. <http://www.visaconsultores.pt/servicos.php?cat=5&code=32>.

VITORINO, M., 2006, 6 de agosto. *Pedra Azul da Madalena ajudou a refazer cidades e a história*. Jornal de Notícias. Acedido a 8 de março de 2018. <https://www.jn.pt/arquivo/2006/interior/pedra-azul-da-madalena-ajudou-a-refazer-cidades-e-a-historia-563518.html?id=563518>.

Anexos

Anexo I

*Tabelas dos resultados obtidos nas campanhas de monitorização nos três
Piezómetros*

Tabela 1 - Resultados obtidos nas campanhas de monitorização anuais no Piezômetro 1 e valores de referência.

Parâmetros físico-químicos	Unidade	SR	fev/07	fev/08	mar/09	fev/10	fev/11	fev/12	fev/13	fev/14	mar/15	mar/16	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Alumínio	mg/l Al	s.d.	<0,05	0,31	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	-	-
Antimónio	µg/l Sb	s.d.	<5	<5	<5	<1	<1	<4	<4,0	<4	<4	<4	-	-
Arsénio	µg/l As	<2,5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	10,0	50,0
Azoto Amoniacal	mg/l NH ₄ ⁺	0,03	<0,10	<0,05	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	-
Bário Total	mg/l Ba	s.d.	<2	<1,0	<1,0	<1,0	0,32	<0,010	0,36	0,318	0,36	0,39	-	0,1
Bicarbonatos	mg/l HCO ₃	s.d.	29	29	30	32	32	34	35	34	43	40	-	-
Boro	mg/l B	s.d.	<1	<0,2	<0,029	<0,018	<0,20	<0,10	<0,010	<0,50	<0,10	<100	1,0	-
Cádmio	µg/l Cd	<1	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<0,8	<1,0	<1,0	1	1,0	5,0
Cálcio total	mg/l Ca	s.d.	37	37	34	31	37	34	33	35	31	29	-	-
Carbonatos	mg/l CaCO ₃	s.d.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
COT	mg/l C	4,4	<1,0	<2,0	<2,0	2	<2	<2	<2	<2	<2,0	12	-	-
Chumbo	µg/l Pb	<8	<10	<10	<10	<10	<7	<7	<4,0	<7	<7	<7	-	50,0
Cianetos	µg/l Cn	<10	<15	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	-	50,0
Cloretos	mg/l Cl	131,4	126	124	122	121	123	96	s.d.	111	109	107	200,0	-
Cobre total	mg/l Cu	<0,01	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<10	0,02	0,05
Condutividade	µS/cm	587	735	635	650	637	623	610	611	613	620	660	1000,0	-
Crómio Hexavalente	mg/l Cr ⁶⁺	s.d.	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	-	-
Crómio total	mg/l Cr	<30	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<0,020	<0,020	-	0,05
Fenóis	mg/l C ₆ H ₁₂ OH	0,002	<0,10	<0,10	0,17	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	-	0,001
Ferro total	µg/l Fe	s.d.	62	157	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	230	-	-
Fluoretos	mg/l F	0,283	<0,20	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	0,7-1,0	1,5
Haletos Orgânicos Adsorvíveis (AOX)	mg/l Cl	s.d.	<0,03	<0,15	<0,20	0,06	0,02	0,019	<0,05	0,027	0,028	0,02	-	-
Magnésio total	mg/l Mg	s.d.	18	17	19	18	19	19	18	18	16	16	-	-
Manganês total	mg/l Mn	s.d.	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,16	0,06	0,05	-
Mercúrio	µg/l Hg	<0,3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,5	1,0
Níquel	mg/l Ni	<50	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	20	<0,020	<0,020	-	-
Nitratos	mg/l NO ₃	s.d.	121	110	110	110	110	110	110	100	83	96	25,0	50,0
Nitritos	µg/l NO ₂	<50	<13	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-	-
Potássio	mg/l K	s.d.	7,9	8,1	9,1	8,3	11	7,6	8,0	7,5	5,3	6,48	-	-
Selénio	µg/l Se	s.d.	<2,5	<1	<1	1	<1	<6	<8	<3	<3	<3	-	10,0
Sódio total	mg/l Na	s.d.	65	62	64	66	66	59	61	64	65	59	-	-
Sulfatos	mg/l SO ₄	9	17	18	19	19	18	23	24	17	30	27	150,0	250,0
Sulfuretos	mg/l S	s.d.	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	-	-
Zinco total	mg/l Zn	0,152	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,5	3,0
pH*	Escala de Sorensen	5,29	5,4	5,39	4,49	5,25	5,66	5,75	5,91	5,94	6,00	5,40	6,5-8,5	-
Temperatura*	°C	16,5	5,1	16,14	15,3	15	15,4	15,0	16,3	15,8	16,6	17,1	22,0	25,0
Nível freático*	m	4,35	7,85	9	8,00	8,2	9,27	10,07	9,70	s.d.	s.d.	8,80	-	-

SR – Situação de Referência; s.d. – sem dados; * - Parâmetros medidos “*in situ*”; - valor superior ao VMR e/ou VMA do Anexo I (A1) do DL 236/98; - valor superior ao valor obtido na SR.

Tabela 2 - Resultados obtidos nas campanhas de monitorização anuais no Piezômetro 2 e valores de referência.

Parâmetros físico-químicos	Unidade	SR	fev/07	fev/08	mar/09	fev/10	fev/11	fev/12	fev/13	fev/14	mar/15	mar/16	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Alumínio	mg/l Al	s.d.	0,12	0,24	0,25	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,32	<0,20	-	-
Antimónio	µg/l Sb	s.d.	<5	<5	<5	<1	<1	<4	<4,0	<4	<4	<4	-	-
Arsénio	µg/l As	<2,5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	10,0	50,0
Azoto Amoniacal	mg/l NH ₄ ⁺	0,05	<0,10	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	-
Bário Total	mg/l Ba	s.d.	<2	<1,0	<1,0	<1,0	0,12	<0,010	0,13	0,113	0,12	0,095	-	0,1
Bicarbonatos	mg/l HCO ₃	s.d.	18	19	20	18	21	18	19	18	19	18,0	-	-
Boro	mg/l B	s.d.	<1	<0,2	<0,029	8	<0,20	<0,10	0,04	0,61	<0,10	<100	1,0	-
Cádmio	µg/l Cd	<1	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<0,8	<1,0	<1,0	<1,0	1,0	5,0
Cálcio total	mg/l Ca	s.d.	22	26	22	28	33	33	37	47	58	61,00	-	-
Carbonatos	mg/l CaCO ₃	s.d.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	-	-
COT	mg/l C	6,96	<1,0	<2,0	<2,0	3	3	2	3	2	2,7	3,80	-	-
Chumbo	µg/l Pb	<8	<10	<10	<10	<10	<7	<7	<4,0	<7	<7	<7	-	50,0
Cianetos	µg/l Cn	<10	<15	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	-	50,0
Cloretos	mg/l Cl	71	69	77	81	96	109	133	s.d.	190	231	250	200,0	-
Cobre total	mg/l Cu	0,014	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,1	<0,10	<10	0,02	0,05
Condutividade	µS/cm	566	600	566	600	643	668	750	851	952	1170	1230	1000,0	-
Crómio Hexavalente	mg/l Cr ⁶⁺		<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	-	-
Crómio total	mg/l Cr	<30	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<0,020	<0,020	-	0,05
Fenóis	mg/l C ₆ H ₁₂ OH	0,002	<0,10	<0,10	0,28	<0,10	0,11	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	-	0,001
Ferro total	µg/l Fe	s.d.	189	155	130	163	327	98	137	250	76	97,00		
Fluoretos	mg/l F	0,343	<0,20	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	0,7-1,0	1,5
Haletos Orgânicos Adsorvíveis (AOX)	mg/l Cl	s.d.	<0,03	<0,15	<0,20	0,04	0,03	0,019	<0,05	0,048	0,051	0,11	-	-
Magnésio total	mg/l Mg	s.d.	21	22	25	28	30	34	39	11	50	28	-	-
Manganês total	mg/l Mn	s.d.	0,07	0,08	0,07	0,12	0,11	0,15	0,17	0,23	0,3	0,39	0,05	-
Mercúrio	µg/l Hg	<0,3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,5	1,0
Níquel	mg/l Ni	<50	<20	<20	<20	0	<20	<20	<20	0,02	<0,020	<0,020	-	-
Nitratos	mg/l NO ₃	s.d.	6,9	7,9	7,1	6,9	8,4	9,9	9,0	8,6	8,8	7,60	25,0	50,0
Nitritos	µg/l NO ₂	<50	<13	<10	<10	<10	<10	10	<10	<10	<10	17,00	-	-
Potássio	mg/l K	s.d.	1,4	1,5	1,7	1,7	2,1	1,8	2,2	2,9	2,13	3,31	-	-
Selénio	µg/l Se	s.d.	<2,5	<1	<1	<1	<1	<6	<8	<3	<3	<3	-	10,0
Sódio total	mg/l Na	s.d.	58	57	62	69	69	71	82	95	110	120,00	-	-
Sulfatos	mg/l SO ₄	111	140	150	160	160	170	150	190	170	220	300,00	150,0	250,0
Sulfuretos	mg/l S	s.d.	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	-	-
Zinco total	mg/l Zn	0,147	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,5	3,0
pH*	Escala de Sorensen	5,36	5,28	5,1	4,97	5,13	5,50	5,79	5,36	5,69	5,6	5,60	6,5-8,5	-
Temperatura*	°C	18,6	6,1	16,9	16	15,3	15,9	15,8	16,5	15,9	16,2	17,70	22,0	25,0
Nível freático*	m	2,75	3,3	3,2	9	3,2	3,47	4,42	3,33	s.d.	s.d.	2,70	-	-

SR – Situação de Referência; s.d. – sem dados; * - Parâmetros medidos “*in situ*”; - valor superior ao VMR e/ou VMA do Anexo I (A1) do DL 236/98; - valor superior ao valor obtido na SR.

Tabela 3 - Resultados obtidos nas campanhas de monitorização anuais no Piezômetro 3 e valores de referência.

Parâmetros físico-químicos	Unidade	SR	fev/07	fev/08	mar/09	fev/10	fev/11	fev/12	fev/13	fev/14	mar/15	mar/16	Anexo I (A1) do DL 236/98	
													VMR	VMA
Alumínio	mg/l Al	s.d.	<0,05	0,17	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,27	-	-
Antimónio	µg/l Sb	s.d.	<5	<5	<5	44	<1	<4	<4,0	<4	<4	<4	-	-
Arsénio	µg/l As	<2,5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	10,0	50,0
Azoto Amoniacal	mg/l NH ₄ ⁺	0,03	<0,10	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	-
Bário Total	mg/l Ba	s.d.	<2	<1,0	<1,0	<10	0,081	<0,010	0,059	0,059	0,051	0,039	-	0,1
Bicarbonatos	mg/l HCO ₃	s.d.	28	38	43	47	66	55	106	96	112	128	-	-
Boro	mg/l B	s.d.	<1	<0,2	0,164	0,222	0,55	0,45	0,79	0,61	0,75	88	1,0	-
Cádmio	µg/l Cd	<1	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<0,8	<1,0	<1,0	<1	1,0	5,0
Cálcio total	mg/l Ca	s.d.	29	36	34	43	88	62	57	80	89	80	-	-
Carbonatos	mg/l CaCO ₃	s.d.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
COT	mg/l C	7,53	1,5	2,2	2,7	4	7	5	5	6	6,8	7,4	-	-
Chumbo	µg/l Pb	<8	<10	<10	<10	<10	<7	<7	<4,0	<7	<7	<7	-	50,0
Cianetos	µg/l Cn	<10	<15	<20	<20	<20	37	<20	<20	<20	<20	<20	-	50,0
Cloretos	mg/l Cl	88,8	84	99	99	157	278	275	s.d.	327	315	304	200,0	-
Cobre total	mg/l Cu	<0,01	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,02	0,05
Condutividade	µS/cm	660	709	685	755	911	1350	1379	1442	1685	2010	2030	1000,0	-
Crómio Hexavalente	mg/l Cr ⁶⁺	s.d.	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	-	-
Crómio total	mg/l Cr	<30	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<0,020	<0,020	-	0,05
Fenóis	mg/l C ₆ H ₁₂ OH	0	<0,10	<0,10	0,18	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,220	<0,20	-	0,001
Ferro total	µg/l Fe	s.d.	257	249	146	157	58	97	74	328	<50	<50	-	-
Fluoretos	mg/l F	0,45	0,21	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	1	<1	0,7-1,0	1,5
Haletos Orgânicos Adsorvíveis (AOX)	mg/l Cl	s.d.	<0,03	<0,15	<0,20	0,08	0,11	0,061	<0,05	0,067	0,071	0,1	-	-
Magnésio total	mg/l Mg	s.d.	24	26	28	35	51	51	47	53	50	47	-	-
Manganês total	mg/l Mn	s.d.	0,08	0,08	0,1	0,11	0,16	0,16	0,16	0,19	0,2	0,27	0,05	-
Mercúrio	µg/l Hg	<0,3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,5	1,0
Níquel	mg/l Ni	155	<20	<20	<20	0	24	22	<20	25	<0,020	<0,020	-	-
Nitratos	mg/l NO ₃	s.d.	18	20	17	17	13	20	15	15	14	<15	25,0	50,0
Nitritos	µg/l NO ₂	<50	<13	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-	-
Potássio	mg/l K	s.d.	2,8	2,9	3	6,3	12	3,9	4,8	5,8	2,68	7,69	-	-
Selénio	µg/l Se	s.d.	<2,5	<1	<1	<1	<1	<6	<8	<3	<3	<3	-	10,0
Sódio total	mg/l Na	s.d.	68	70	85	110	180	160	180	240	290	280	-	-
Sulfatos	mg/l SO ₄	119	150	180	170	210	280	230	280	320	480	560	150,0	250,0
Sulfuretos	mg/l S	s.d.	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	-	-
Zinco total	mg/l Zn	0,15	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,5	3,0
pH*	Escala de Sorensen	5,24	5,35	5,13	4,17	5	5,60	5,58	5,83	6,27	6,0	5,7	6,5-8,5	-
Temperatura*	°C	17,2	6,1	16,8	16	15,5	15,9	15,4	16,4	15,7	17,5	17,7	22,0	25,0
Nível freático*	m	1,4	2,5	3,1	2,2	2,4	2,53	3,25	2,54	s.d.	s.d.	1,70	-	-

SR – Situação de Referência; s.d. – sem dados; * - Parâmetros medidos “*in situ*”; - valor superior ao VMR e/ou VMA do Anexo I (A1) do DL 236/98; - valor superior ao valor obtido na SR.