



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA

MARGARIDA SIMÕES FALEIRO

Licenciada em Geologia

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOLÓGICO
CONCEPTUAL DE CONTAMINAÇÃO E DE RISCO EM
MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa

dezembro, 2023

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL DE CONTAMINAÇÃO E DE RISCO EM MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS

MARGARIDA SIMÕES FALEIRO

Licenciada em Geologia

Orientador: Paulo de Sá Caetano, Professor,
NOVA University Lisbon

Coorientadores: Carlos Nunes da Costa, Doutor,
eGiamb, Lda.

Júri:

Presidente: Pedro Calé da Cunha Lamas, Professor, NOVA University
of Lisbon

Arguente: Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho, Professora,
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Vogais: Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho, Professora,
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Paulo do Carmo de Sá Caetano, Professor, NOVA Univer-
sity Lisbon

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa
dezembro, 2023

Construção de um modelo geológico conceptual de contaminação e de risco em maciços rochosos fraturados

Copyright © Margarida Faleiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Gostaria em primeiro lugar de agradecer ao meu orientador, o professor Paulo Caetano que me proporcionou este tema de tese e me apoiou e orientou ao longo destes meses, e principalmente por ter acreditado no valor do meu trabalho desde o início. Ao meu coorientador, o professor Carlos Costa que tanto me ensinou em tão curto espaço de tempo e foi fundamental para esta dissertação ter o rigor elevado que apresenta.

Ao professor Pedro Lamas, pela sua disponibilidade e auxílio durante os trabalhos de laboratório que foram necessários para enriquecer esta tese. Ao corpo docente que integrou o Mestrado em Engenharia Geológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa que nestes dois anos me abriu os níveis sobre o que é realmente a engenharia geológica, o seu papel na sociedade, e quais as suas saídas profissionais.

À Egiamb e a todos os colegas que conheci quando lá estagiei, receberam-me de braços abertos e acolheram-me como parte da equipa desde o primeiro dia. Lá aprendi sobre a área e aperfeiçoei a minha metodologia de trabalho, e saio deste estágio uma melhor profissional. Em particular agradeço à Daniela Nascimento, ao Ricardo Manuel e ao Michel Lopes que foram os que estiveram mais perto deste projeto e que me auxiliaram em diversos momentos e que tanto me ensinaram.

Às minhas colegas Alexandra Ferreira e Joana Abreu que me acompanharam nos trabalhos de campo que foram mais longos que o suposto e mostraram-se incansáveis mesmo quando as temperaturas não eram propícias a trabalhos de campo de várias horas. Ao meu colega Robin Santos, que me acompanhou desde a licenciatura até ao mestrado e que sem a sua presença a vida de mestranda teria sido muito mais complicada e stressante.

Ao meu namorado Joaquim Simões, que com a sua paciência e tranquilidade me ajudou a ultrapassar momentos mais frustrantes que decorreram ao longo desta tese para além de ter sido uma ajuda preciosa em situações do cariz informático.

Agradeço por fim à minha família, os meus avós Rosa e Joaquim, os meus tios Paula e Zé e primos Tomás e Maria Lourenço, e principalmente aos meus pais, Leonor Branco e Artur Faleiro, que foram um pilar fundamental nesta etapa da minha vida, assim como todas as outras, sem o seu apoio, não tinha conseguido chegar onde estou hoje.

*“A persistência é o caminho do êxito.”
(Charles Chaplin)*

RESUMO

A contaminação em solos numa área urbano-industrial pode representar um risco elevado para a população residente, nomeadamente por hidrocarbonetos que se encontram sobrenadantes no nível freático, ou seja, contaminantes do tipo LNAPL.

Uma das complexidades do caso de estudo tratado nesta dissertação reside no facto de se tratar de um maciço rochoso, o que torna a abordagem diferente da utilizada no caso de se tratar de um maciço terroso. Outro fator desafiante prende-se com a questão de o local estudado se situar numa unidade geológica que constitui um complexo formado por vários tipos de materiais rochosos, variando entre produtos piroclásticos e escoadas lávicas - o Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL).

Consequentemente, o comportamento hidrogeológico em cada um destes tipos de rocha vai variar e a forma como a contaminação irá evoluir também. Os trabalhos efetuados no contexto de estágio levaram a um conhecimento geral da formação presente na área de estudo e serviram como ponto de partida para a próxima etapa. Por meio de trabalhos de campo e de laboratório com o objetivo de caracterizar o maciço aflorante na região próxima da área de estudo, associaram-se as propriedades da rocha observada *in situ*, com a formação existente na área de estudo. Com os parâmetros definidos de cada nível desta unidade, elaborou-se um modelo geológico conceptual representativo da área de estudo com vista a simplificar a compreensão do comportamento do contaminante, dependendo de qual material rochoso do CVL a contaminação interseta.

Concluiu-se que o CVL se divide em dois tipos de meios onde há percolação da água subterrânea: um meio de porosidade dupla (constituído pelos piroclastos consolidados e brechas vulcânicas) e um meio puramente fraturado (constituído pelo basalto). Neste, a contaminação terá tendência a se dispersar de forma heterogénea devido às fraturas que o constituem, enquanto, no nível dos piroclastos ou das brechas, tenderá a evoluir de forma mais homogénea, ainda que com alguma anisotropia.

Palavas chave: Maciço Rochoso Fraturado, CVL, Contaminação, LNAPL, Modelo Geológico

ABSTRACT

Soil contamination in an urban-industrial area can represent a high risk for the resident population, particularly due to hydrocarbons that are found supernatant on the water table, that is, LNAPL-type contaminants.

One of the complexities of the case study treated in this dissertation lies in the fact that it corresponds to a rock mass, which makes the approach different from that used in the case of a soil mass. Another challenging factor is the fact that the studied site is located in a geological unit that constitutes a complex formed by various types of rock materials, ranging from pyroclastic products to lava flows - the Lisbon Volcanic Complex (CVL).

Consequently, the hydrogeological behaviour in each of these rock types will vary and the way contamination will evolve as well. Through field and laboratory work with the aim of characterizing the outcropping mass in the region close to the study area, the properties of the rock observed *in situ* were associated with the formation existing in the study area. With the parameters defined for each level of this unit, a conceptual geological model representative of the study area was created with the purpose of simplifying the understanding of the behaviour of the contaminant depending on which rock material of the CVL the contamination intersects with.

It is concluded that the CVL is divided into two types of medium where there is percolation of groundwater: a double porosity medium (consisting of consolidated pyroclasts and volcanic breccias) and a purely jointed medium (consisting of basalt). The contamination will have a tendency to disperse in a heterogeneous way due to the fractures that constitute it, while, in the level of pyroclasts or breccias, it will tend to evolve in a more homogeneous way, although with some anisotropy.

Keywords: Jointed Rock Mass, CVL, Contamination, LNAPL, Geological Model

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.1. INTRODUÇÃO.....	21
1.2. OBJETIVOS E DESAFIOS RELATIVOS À PROBLEMÁTICA EM ESTUDO	22
2. ESTADO DE ARTE, CONCEITOS E METODOLOGIA	25
2.1. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE.....	26
2.1.1. <i>Casos de estudo: LNAPL em maciços fraturados</i>	27
2.1.2. <i>Casos de estudo: modelo conceptual de aquíferos fraturados</i>	29
2.1.3. <i>Normas guia provenientes de entidades reguladoras</i>	30
2.2. CONCEITOS TEÓRICOS RELATIVOS AO MACIÇO FRATURADO	31
2.2.1. <i>Descontinuidades</i>	31
2.2.2. <i>Propriedades índice: porosidade e resistência</i>	39
2.2.3. <i>Contaminação em maciço fraturado</i>	45
2.3. METODOLOGIA.....	56
3. ENQUADRAMENTO DA FORMAÇÃO EM ESTUDO - CVL	59
3.1. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....	59
3.2. ENQUADRAMENTO ESTRUTURAL E TECTÓNICO	60
3.3. ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO.....	61
4 TRABALHOS DE CAMPO	64
4.1. TRABALHOS NA ÁREA DE ESTUDO.....	64
4.1.1. <i>Descrição das sondagens efetuadas no local</i>	64
4.1.2. <i>Variação do nível freático na área de estudo</i>	66
4.2. TRABALHOS EM AFLORAMENTOS PERTO DA ÁREA DE ESTUDO	68
4.2.1. <i>Ponto 3 - Geomonumento da Rua Aliança Operária</i>	70
4.2.2. <i>Ponto 6 – Afloramento da Rua Q.ta do Salrego</i>	87
4.2.3. <i>Ponto 7 - Afloramento do Farol da Mama Sul</i>	106

5.	INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	110
5.1.	CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS NO LOCAL DE ESTUDO E OS DOS TRABALHOS DE CAMPO.....	110
5.2.	ASSOCIAÇÃO ENTRE MEIOS DE FLUXO SUBTERRÂNEO E AS UNIDADES DEFINIDAS.....	112
6.	MODELO CONCEPTUAL DA CONTAMINAÇÃO	116
6.1.	CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEPTUAL DE BASE.....	116
6.2.	LIMITAÇÃO DOS NÍVEIS DEFINIDOS DO CVL	117
6.3.	CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES POR NÍVEL DO CVL.....	125
6.3.1.	<i>Caracterização das descontinuidades nos piroclastos consolidados</i>	<i>125</i>
6.3.2.	<i>Caracterização das descontinuidades no basalto fraturado</i>	<i>128</i>
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - A) ESTRUTURA DA UNIDADE PRINCIPAL (ARENITO) NA ÁREA DE UMA FÁBRICA DE GÁS EM ALBERTA; B) DISTRIBUIÇÃO DO LNAPL NA UNIDADE PRINCIPAL NA ÁREA DE UMA FÁBRICA DE GÁS EM ALBERTA (RETIRADO DE HARDISTY, P. E., ET AL., 1998)	28
FIGURA 2.2 - COMPARAÇÃO ENTRE A ESPESURA APARENTE DA PLUMA DE FASE LIVRE MEDIDA ENTRE JANEIRO DE 2014, JULHO DE 2015, JULHO E NOVEMBRO DE 2016 (RETIRADO DE MINEO ET AL., 2022) ..	29
FIGURA 2.3 - PARÂMETROS DAS DESCONTINUIDADES DETERMINADOS NO CAMPO (ADAPTADO DE AZARAFZA ET AL., 2018).....	32
FIGURA 2.4 - MÉTODO <i>SCANLINE</i> PARA ESTUDO DE DESCONTINUIDADES (ADAPTADO DE SINGHAL & GUPTA, 2010)	33
FIGURA 2.5 - PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA DEFINIR A ORIENTAÇÃO ESPACIAL DE FRATURAS (RETIRADO DE FERREIRA, 2015).....	34
FIGURA 2.6 - INFLUÊNCIA DA PERSISTÊNCIA DE UMA DESCONTINUIDADE NO GRAU DE FRATURAÇÃO E INTERCONECTIVIDADE (ADAPTADO DE SINGHAL & GUPTA, 2010)	35
FIGURA 2.7 - PERFIS TÍPICOS DE RUGOSIDADE JRC DEFINIDOS POR BARTON & CHOUBEY (1977) (RETIRADO DE RAFEK, ET AL., 2017)	37
FIGURA 2.8 - AMOSTRAS A SECAR NA ESTUFA (A) E POSTERIORMENTE A ARREFECER NO EXSICADOR (B).....	40
FIGURA 2.9 - AMOSTRAS DENTRO DA CÂMARA DE VÁCUO COM UMA AMPOLA DE DECANTAÇÃO IMPREGNADA DE MODO A ENCHER A CÂMARA DE VÁCUO COM ÁGUA DE FORMA CONTROLADA E SEM PERTURBAR O SISTEMA DE VÁCUO.....	41
FIGURA 2.10 - ESCLERÓMETRO DO TIPO SCHMIDT UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA ROCHA (RETIRADO DE FAIM, 2014)	43
FIGURA 2.11 - ÁBACO DE MILLER QUE CORRELACIONA A DUREZA DE SCHMIDT COM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (ADAPTADO DE VALLEJO & FERRER, 2011)	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 2.12 - DIFERENÇA ENTRE LNAPL E DNAPL (ADAPTADO DE FLORES ET AL., 2011)	45
FIGURA 2.13 - DIFERENTES FORMAS QUE OS COMPOSTOS DE LNAPL PODEM APRESENTAR EM PROFUNDIDADE (ADAPTADO DE SINGHAL & GUPTA, 2010).....	46
FIGURA 2.14 - ESQUEMATIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE UM CONTAMINANTE EM MEIO POROSO E EM MEIO FRATURADO AO LONGO DO TEMPO (T_1 , T_2 , T_3 E T_4) A PARTIR DE UMA FONTE À SUPERFÍCIE (ASSUMINDO QUE NÃO HÁ FLUXO NO MEIO FRATURADO).....	49
FIGURA 2.15 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO COMPORTAMENTO DO LNAPL EM MEIO CONTÍNUO (ADAPTADO DE EOEEA (2016)	52
FIGURA 2.16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM MEIO PURAMENTE FRATURADO (A), UM MEIO COM POROSIDADE DUPLA (B), E UM MEIO HETEROGÊNEO (C) (RETIRADO DE SINGHAL & GUPTA, 2010) ...	53
FIGURA 3.1 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DO COMPLEXO VULCÂNICO DE LISBOA	59

FIGURA 3.2 - ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO DO COMPLEXO VULCÂNICO DE LISBOA.....	61
FIGURA 4.1 - TESTEMUNHOS DE SONDAGEM CORRESPONDENTES AO NÍVEL DOS PIROCLASTOS (A) E AO NÍVEL DAS BRECHAS VULCÂNICAS E BASALTOS (B)	65
FIGURA 4.2 - REGISTO DOS VALORES DA PRECIPITAÇÃO MENSAL E MENSAL ACUMULADA DESDE OUTUBRO DE 2022 ATÉ SETEMBRO DE 2023	68
FIGURA 4.3 - LOCALIZAÇÃO DE POSSÍVEIS AFLORAMENTOS DO CVL NA REGIÃO PRÓXIMA À ÁREA DE ESTUDO	69
FIGURA 4.4 - VISTA ERAL DO AFLORAMENTO DA RUA ALIANÇA OPERÁRIA	70
FIGURA 4.5 - FAMÍLIAS DE FRATURAS EXISTENTES NO AFLORAMENTO DO PONTO 3, A VERMELHO E A AZUL AS FAMÍLIAS SUBVERTICAIS E A LARANJA A FAMÍLIA SUBHORIZONTAL.....	71
FIGURA 4.6 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS POLOS E FAMÍLIAS RELATIVOS ÀS DESCONTINUIDADES LEVANTADAS NO PONTO 3 (ELABORADA COM RECURSO AO <i>SOFTWARE DIPS</i>)	72
FIGURA 4.7 - GRÁFICO RELATIVO AO ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 1 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	73
FIGURA 4.8 - GRÁFICO RELATIVO AO ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 2 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	74
FIGURA 4.9 - GRÁFICO RELATIVO À PERSISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 1 DO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	75
FIGURA 4.10 - GRÁFICO RELATIVO À PERSISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 2 DO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	76
FIGURA 4.11 - GRÁFICO RELATIVO À RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 1 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	77
FIGURA 4.12 - GRÁFICO RELATIVO À RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 2 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	77
FIGURA 4.13 - GRÁFICO RELATIVO À ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 1 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	78
FIGURA 4.14 - GRÁFICO RELATIVO À ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES DA FAMÍLIA 2 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	79
FIGURA 4.15 - GRÁFICO RELATIVO AO PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES NA FAMÍLIA 1 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	80
FIGURA 4.16 - GRÁFICO RELATIVO AO PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES NA FAMÍLIA 2 NO PONTO 3, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM	80
FIGURA 4.17 - FRATURAS SUBVERTICAIS COM ENCHIMENTO NO PONTO 3 ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.	
FIGURA 4.18 - PROVETES B1, B2, B3, B4, B5 E B6 PROVENIENTES DE AMOSTRAS RECOLHIDAS DO PONTO 3	84
FIGURA 4.19 - FRATURAS VISÍVEIS APENAS A MEIO DO PROCESSO DE SECAGEM DOS PROVETES B1 E B5	85
FIGURA 4.20 - VISTA GERAL DO AFLORAMENTO DO PONTO 6, RETIRADO DO <i>GOOGLE EARTH</i>	88
FIGURA 4.21 - DUAS ZONAS DO AFLORAMENTO DO PONTO 6: ZONA DOS PIROCLASTOS (A) E ZONA DO BASALTO (B)	89
FIGURA 4.22 - VEIOS DE NATUREZA CARBONATADA NA ZONA DOS PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM VEIOS SUBVERTICAIS E SUBHORIZONTAIS	90
FIGURA 4.23 - INTERCALAÇÕES DE BASALTO VESICULAR EM ALGUNS LOCAIS DA ZONA DOS PIROCLASTOS	90

FIGURA 4.24 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS POLOS E FAMÍLIAS RELATIVOS ÀS DESCONTINUIDADES LEVANTADAS NA ZONA DOS PIROCLASTOS DO PONTO 6 (ELABORADA COM RECURSO AO SOFTWARE <i>DIPS</i>).....	91
FIGURA 4.25 - GRÁFICO RELATIVO AO ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES DA ZONA DE PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	92
FIGURA 4.26 - GRÁFICO RELATIVO À PERSISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DE PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	93
FIGURA 4.27 - GRÁFICO RELATIVO À RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DE PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	94
FIGURA 4.28 - GRÁFICO RELATIVO À ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DE PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	95
FIGURA 4.29 - GRÁFICO RELATIVO AO PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DE PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	96
FIGURA 4.30 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS POLOS E FAMÍLIAS RELATIVOS ÀS DESCONTINUIDADES LEVANTADAS NA ZONA DO BASALTO DO PONTO 6 (ELABORADA COM RECURSO AO SOFTWARE <i>DIPS</i>)....	97
FIGURA 4.31 - GRÁFICO RELATIVO AO ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES DA ZONA DO BASALTO DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	98
FIGURA 4.32 - GRÁFICO RELATIVO À PERSISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DO BASALTO DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	99
FIGURA 4.33 - GRÁFICO RELATIVO À RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DO BASALTO DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	100
FIGURA 4.34 - GRÁFICO RELATIVO À ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DO BASALTO DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	101
FIGURA 4.35 - GRÁFICO RELATIVO AO PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES DA ZONA DE PIROCLASTOS DO PONTO 6, COM REFERÊNCIA AO NÚMERO DE DESCONTINUIDADES POR CLASSE E A SUA RESPETIVA PERCENTAGEM.....	102
FIGURA 4.36 - FRATURAS SUBHORIZONTAIS PREENCHIDAS COM CIMENTO CARBONATADO NA ZONA DO BASALTO	102
FIGURA 4.37 - PROVETES A1, A2, A3, A4, A5 E A6 PROVENIENTES DE AMOSTRAS RECOLHIDAS NO PONTO 6 NA ZONA DO BASALTO	103
FIGURA 4.38 - VISTA GERAL DO AFLORAMENTO DO FAROL DA MAMA SUL.....	106
FIGURA 4.39 - DISTINÇÃO DAS 2 ZONAS DO AFLORAMENTO DO PONTO 7: ZONA DO BASALTO (A) E ZONA DA BRECHA VULCÂNICA (B).....	107
FIGURA 4.40 - ZONA DE BASALTO FRANCAMENTE ALTERADO E COM VEIOS CARBONATADOS COM ESPESSURA CONSIDERÁVEL.....	108
FIGURA 4.41 - ALTERNÂNCIA ENTRE A ZONA DA BRECHA VULCÂNICA E A ZONA DO BASALTO.....	108

FIGURA 4.42 - ZONA DA BRECHA VULCÂNICA DO AFLORAMENTO DO PONTO 7, COM REPRESENTAÇÃO DE UM VEIO DE CALCITE E BLOCOS DE BASALTO FRANCAMENTE ALTERADO.....	109
FIGURA 5.1 - CORRELAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ZONAS ENCONTRADOS NO CAMPO E OS NÍVEIS RECOLHIDOS NAS SONDAGENS EFETUADAS NA ÁREA DE ESTUDO.....	111
FIGURA 6.1 - MODELO GEOLÓGICO 3D DA ÁREA DE ESTUDO (CONSTRUÍDO COM LEAPFROG GEO).....	117
FIGURA 6.2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS SONDAGENS EFETUADAS NO LOCAL EM ESTUDO SOBRE O MODELO GEOLÓGICO 3D DE BASE.....	119
FIGURA 6.3 - MODELO GEOLÓGICO 3D DA ÁREA DE ESTUDO COM VISTA DE NORTE.... ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.	
FIGURA 6.4 - MODELO GEOLÓGICO 3D DA ÁREA DE ESTUDO COM VISTA DE SUL.....	121
FIGURA 6.5 - MODELO GEOLÓGICO 3D DA ÁREA DE ESTUDO COM VISTA DE OESTE.....	122
FIGURA 6.6 - MODELO GEOLÓGICO 3D DA ÁREA DE ESTUDO COM VISTA DE ESTE.....	123
FIGURA 6.7 - GRÁFICO ILUSTRATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DO CVL E DO ATERRO NA ÁREA DE ESTUDO EM M ³	124
FIGURA 6.8 - MODELO GEOLÓGICO 3D COM O NÍVEL DOS PIROCLASTOS CONSOLIDADOS COMPLETAMENTE CARACTERIZADO, VISTA DE NORTE.....	126
FIGURA 6.9 - MODELO GEOLÓGICO 3D COM O NÍVEL DOS PIROCLASTOS CONSOLIDADOS COMPLETAMENTE CARACTERIZADO, VISTA DE SUL.....	127
FIGURA 6.10 - MODELO GEOLÓGICO 3D COM O NÍVEL DO BASALTO FRATURADO COMPLETAMENTE CARACTERIZADO, VISTA DE OESTE.....	130
FIGURA 6.11 - MODELO GEOLÓGICO 3D COM O NÍVEL DO BASALTO FRATURADO COMPLETAMENTE CARACTERIZADO, VISTA DE ESTE.....	131
FIGURA 6.12 - MODELO GEOLÓGICO 3D COM O NÍVEL DO BASALTO FRATURADO COMPLETAMENTE CARACTERIZADO, VISTA DE NORTE.....	132
FIGURA 6.13 - MODELO GEOLÓGICO 3D COM O NÍVEL DO BASALTO FRATURADO COMPLETAMENTE CARACTERIZADO, VISTA DE SUL.....	133

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1 - CLASSIFICAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE FRATURAS SEGUNDO A SIMR, 2007	35
TABELA 2-2 - CLASSIFICAÇÃO DA PERSISTÊNCIA DAS FRATURAS SEGUNDO A SIMR, 2007	36
TABELA 2-3 - CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE ABERTURA DAS FRATURAS SEGUNDO A SIMR, 1981	38
TABELA 2-4 - CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA DE ACORDO COM A SUA POROSIDADE SEGUNDO A IAEG, 1979	42
TABELA 2-5 - CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS DE ACORDO COM A SUA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL, SEGUNDO A SIMR, 1981.....	44
TABELA 2-6 - VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM CM/S DE ACORDO COM A GRANULOMETRIA DO SOLO, DE ACORDO COM B. EVIRGEN & A. TUNCAN (2015)	55
TABELA 4-1 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EFETUADAS DESDE OUTUBRO DE 2022 ATÉ SETEMBRO DE 2023 NOS PIEZÓMETROS DA ÁREA DE ESTUDO	66
TABELA 4-2 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DOS PESOS SECO, IMERSO E SATURADO DE CADA AMOSTRA DO PONTO 6.....	85
TABELA 4-3 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO VOLUME DOS POROS, VOLUME APARENTE, MASSA VOLÚMICA APARENTE E POROSIDADE ABERTA DE CADA AMOSTRA DO PONTO 6 E RESPETIVA MÉDIA	86
TABELA 4-4 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA <i>IN SITU</i> ATRAVÉS DO MARTELO DE SCHMIDT NO AFLORAMENTO DO PONTO 3 COM RESPETIVA CONVERSÃO PARA MPA	87
TABELA 4-5 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS MASSAS DOS PROVETES SECOS, IMERSOS E SATURADOS DO PONTO 6.....	104
TABELA 4-6 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO VOLUME DOS POROS, VOLUME APARENTE, MASSA VOLÚMICA APARENTE E POROSIDADE ABERTA DE CADA AMOSTRA DO PONTO 6 E RESPETIVA MÉDIA	104
TABELA 4-7 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA <i>IN SITU</i> ATRAVÉS DO MARTELO DE SCHMIDT NO AFLORAMENTO DO PONTO 6 COM RESPETIVA CONVERSÃO PARA MPA	105
TABELA 6-1 - LOGS DAS SONDAGENS NO LOCAL COM ASSOCIAÇÃO ÀS UNIDADES DEFINIDAS, COM A RESPETIVA LEGENDA DE CORES.....	118

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução

A presente dissertação surgiu na sequência de um estágio realizado na empresa *Egiamb, Consultoria Geoambiental, Lda.*, onde foi estudada a contaminação de um local cujo substrato é constituído por um maciço rochoso fraturado, algo que levanta problemas de outra complexidade e distintos quando comparado a maciços terrosos. Por esta razão, e para a melhor resolução deste problema, é necessário um estudo aprofundado e de elevado carácter científico.

Para adquirir competências necessárias para abordar este tema, e assim ter um maior conhecimento dos trabalhos preexistentes e das técnicas utilizadas para o estudo do maciço fraturado, foi adquirida formação sobre esta temática no curso "Investigação de Aquífero Fraturado", realizado pela Associação Brasileira das Empresas de Consultoria e Engenharia Ambiental (AESAS). Este incidiu em tópicos relevantes como a hidráulica dos aquíferos fraturados e o comportamento de contaminantes nestes mesmos aquíferos, as técnicas tipicamente utilizadas para determinação de propriedades e parâmetros do maciço, e a apresentação de casos de estudo que podem servir de ilustração para trabalhos futuros. Esta formação contou com a participação de investigadores de referência como o hidrogeólogo Paulo Lima, os geólogos Sasha Hart, Nilton Miyashiro, Saulo Menezes e Daphne Pino, e os engenheiros Marcos Barbosa e Wagner Aquino.

Para além da importância relacionada com a aprendizagem de conceitos e técnicas utilizadas para a resolução da temática na análise, realça-se a obtenção de documentação relevante para a elaboração desta dissertação a que, de outra forma, não teria sido possível ter acesso. Esta foi considerada uma das maiores dificuldades para a elaboração da presente dissertação.

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro partes: uma parte introdutória, uma parte de cariz teórico, uma parte de trabalho prático e uma parte de discussão e conclusões. A primeira parte consiste na contextualização da problemática em estudo, em que se apresenta o âmbito da dissertação, a sua finalidade e a forma como se abordou esta temática. A segunda parte consiste numa compilação de informação de carácter teórico de casos de estudo

e conceitos que estejam relacionados com a problemática da contaminação em maciço fraturado. É aqui que se explica a metodologia adotada para atingir o objetivo traçado. Primeiramente, analisaram-se os trabalhos previamente efetuados cuja temática é semelhante à deste estudo. Posto isto, reuniram-se todos os dados necessários para o melhor entendimento de todos os parâmetros e conceitos que estão envolvidos na metodologia adotada e para servirem de base para os trabalhos de campo e trabalhos laboratoriais da fase seguinte.

É na fase dos trabalhos práticos que se recorre aos trabalhos na área de estudo, de campo e de laboratório, com a finalidade de recolher parâmetros e características sobre o maciço que só são possíveis de discriminar através destes métodos. Estes resultados vão servir de base de trabalho para a construção do modelo geológico conceptual que corresponde ao foco desta dissertação. É nesta parte também que se adquire toda a informação sobre a rocha e o maciço rochoso no local de estudo.

A última parte da dissertação consiste na discussão dos resultados obtidos, isto é, se estes correspondem ao esperado e se os objetivos foram alcançados. Por fim, segue-se a conclusão que encerra o caso de estudo, responde a questões levantadas previamente, para além de deixar recomendações para estudos futuros dentro da mesma área.

Neste trabalho foi decidido omitir expressamente designações, localizações específicas, ou outros dados que permitam a identificação de pessoas e entidades, garantindo a confidencialidade dos dados e o anonimato pessoal e institucional, de forma a proteger os direitos e interesses das pessoas e instituições envolvidas na sua investigação. Deste modo, a apresentação de dados de investigação foi concebida de forma a garantir a proteção de informação sensível de pessoas singulares e coletivas.

1.2. Objetivos e desafios relativos à problemática em estudo

O objetivo desta dissertação é a construção de um modelo conceptual de um maciço rochoso que se encontra inserido numa área urbano-industrial contaminada. Espera-se que, com a elaboração deste modelo, se consiga proporcionar uma ferramenta de auxílio para o entendimento da evolução dessa mesma contaminação e do seu trajeto. Para além disto, dada a complexidade da problemática em questão, pretende-se que este estudo seja um contributo para que exista uma orientação por parte das entidades reguladoras sobre quais as melhores práticas para a sua resolução.

A temática da contaminação de solos e rochas tem sido cada vez mais alvo de estudo devido à maior sensibilidade que existe por parte da sociedade civil relativamente ao risco para a saúde humana. Esta preocupação surge da perda de qualidade de vida das populações devido ao contacto com os contaminantes, da perda da biodiversidade e do impacte negativo nos demais recursos naturais que podem afetar direta ou indiretamente o ser humano.

Os problemas de contaminação são uma consequência do desenvolvimento urbano e industrial. A produção de resíduos provenientes de áreas industriais representa um risco para toda a área envolvente, risco esse que aumenta se estas mesmas indústrias se encontrarem inseridas em zonas urbanas, onde a vulnerabilidade é elevada, devido à probabilidade de contacto entre a população e estas substâncias perigosas ser muito superior.

No caso em estudo, trata-se de uma área industrial que se encontra, precisamente, no seio de uma zona urbana densamente habitada. Assim, há risco de que a contaminação proveniente desse local, migre para fora dos seus limites físicos, pondo em risco a população em redor através do contacto dos contaminantes com o solo, o maciço rochoso e as águas subterrâneas.

Portanto, já para não falar da dificuldade de efetuar a descontaminação da zona afetada pelos motivos já enumerados, ainda existe o facto desta área se encontrar num maciço rochoso, o que representa uma situação mais complexa devido ao pouco conhecimento existente sobre o tema, porquanto a evolução da contaminação ocorre de forma diferente do que seria de esperar se fosse em solo, sendo o maciço rochoso considerado um meio anisotrópico e heterogéneo por excelência. Logo, deve-se tentar melhorar a compreensão sobre o comportamento do maciço e determinar parâmetros chave que sirvam para prever o movimento do produto contaminante.

A contaminação em questão (hidrocarbonetos derivados de petróleo) caracteriza-se como possuindo uma densidade inferior à da água, ficando em regra sobrenadante ao nível freático que evolui por entre a rocha. Sendo assim, um dos parâmetros extrínsecos que irá influenciar a sua evolução será a oscilação do nível freático, que permitirá ao contaminante subir até cotas mais altas ou descer até profundidades numa amplitude que pode rondar os 10 a 15 m, conseguindo alcançar diversos níveis litológicos no local. A outra condicionante da evolução do contaminante serão as características geológicas da formação que este atravessa, nomeadamente em termos de alteração da rocha e as características da fraturação. Desta forma, um pilar fundamental deste estudo serão os resultados obtidos em trabalhos de campo, de modo a caracterizar cada nível e assim determinar o comportamento do contaminante e, futuramente, projetar a melhor forma de mitigar os seus efeitos.

ESTADO DE ARTE, CONCEITOS E METODOLOGIA

Este capítulo diz respeito aos resultados da pesquisa teórica recolhida que é necessária para o cumprimento da metodologia que será futuramente descrita e para o melhor entendimento desta dissertação. Inicialmente foi preciso compilar e analisar trabalhos efetuados cuja problemática seja semelhante à do caso de estudo. Em seguida, é importante abordar conceitos chave que estão relacionados com a temática em estudo, ou seja, contaminação em maciço fraturado. Ora, como se fala de maciço fraturado, é evidente que as descontinuidades vão desempenhar um papel essencial no comportamento geomecânico e geohidrológico do maciço, tal como no comportamento do contaminante.

Tendo abordado as características do principal meio por onde a contaminação vai circular, não pode ser descartado o estudo do material rocha, neste caso a avaliação de duas propriedades índice que são determinantes para saber se o material rocha vai desempenhar um papel de meio impermeável e resistente ou se poderá ser penetrado por alguma da contaminação devido a uma porosidade considerável associada a uma resistência mecânica relativamente baixa. Conhecendo todos os componentes relativos ao maciço que poderão intervir na evolução da contaminação, resta analisar as características do contaminante abordado no caso de estudo e de que forma estas poderão ser determinantes para a evolução da contaminação ao longo da área de estudo.

No caso do contaminante presente na área de estudo, este é imiscível na sua generalidade e menos denso que a água, conferindo-lhe características distintas que merecem ser alvo de uma análise de pormenor, com especial destaque para os principais mecanismos de transporte do contaminante dependendo do meio em que se encontra. Por último, ir-se-á descrever a metodologia adotada para resolver esta problemática, bem como explicar a razão por esta ter sido escolhida face outras encontradas na bibliografia disponível.

2.1. Revisão do estado de arte

A presente dissertação tem como alvo a problemática da contaminação em maciços fraturados sendo que, para a sua compreensão, é necessário englobar diversas temáticas que foram aprofundadas em diversas publicações. No que se trata de estudos que abordem exclusivamente a contaminação em maciços fraturados bem como todos os seus conceitos e definições, apenas foi possível obter um documento, o que releva uma das dificuldades da abordagem deste tema que é a falta de acessibilidade a fontes de caráter científico e de investigação versando este assunto. A obra em questão (NASEM, 2015) toca em vários pontos relevantes sobre a contaminação de maciço fraturado, como é o caso das características das rochas fraturadas que controlam o fluxo e o transporte de fluidos bem como o modo de funcionamento estes processos, o desenvolvimento de modelos numéricos, metodologias para a caracterização e monitorização da área de estudo e a remediação do maciço fraturado. Esta obra é bastante completa e serviu de pilar para apoiar uma parte significativa dos conceitos teóricos e a metodologia para efetuar esta dissertação.

Apesar de não haver um número significativo de publicações disponíveis focadas exclusivamente no assunto da contaminação em maciço fraturado, tal não significa que não existam documentos que abordem este assunto. Nesta matéria, destaca-se o trabalho de SINGHAL & GUPTA (2010) que constitui uma dessas poucas publicações em que a temática da contaminação de vários tipos de substâncias e o seu comportamento num maciço rochoso são analisados e descritos em alguns capítulos. Este é um documento bastante completo dentro da sua temática, para além de que possui um capítulo exclusivo sobre a contaminação em aquíferos, distinguindo os dois tipos de contaminantes não imiscíveis em água de forma clara e objetiva. No que toca à sua utilidade para a presente dissertação, além de toda a informação existente sobre contaminação em aquíferos fraturados, os conceitos teóricos sobre maciço fraturado, descontinuidades e aquíferos fraturados de origem vulcânica foram tópicos muito relevantes para este caso de estudo. Outro livro com conteúdo semelhante a este último é de R. FREEZE & J. CHERRY (1979), que contém onze capítulos em que são abordados temas como as propriedades e princípios físicos e químicos da água subterrânea, hidrogeologia, evolução química da água e contaminação de águas subterrâneas. Este documento foi particularmente útil para reunir equações e expressões que caracterizem o fluxo e as propriedades de cada meio hidrogeológico. Refere-se também alguns pontos abordados no capítulo da contaminação de águas subterrâneas, como o transporte em meio fraturados e a dispersividade.

No que toca a trabalhos de investigação e casos de estudo, podem-se destacar dois temas que vão de encontro ao foco principal desta dissertação: a contaminação de LNAPL em meio fraturado e a elaboração de um modelo conceptual de um aquífero fraturado. Além disto, merecem destaque os guias técnicos provenientes de entidades reguladoras que descrevem como proceder para caracterizar e remediar meios fraturados.

2.1.1. Casos de estudo: LNAPL em maciços fraturados

Quando se fala em casos de estudo existentes sobre este tema, em particular em termos de conceitos, foram encontrados dois artigos na bibliografia disponível, nomeadamente P. HARDISTY et al. (1998) e S. MINEO et al. (2022). No primeiro artigo, o foco consiste na determinação de expressões matemáticas para a caracterização do fluxo de LNAPL e posteriormente a aplicação a um caso real. Já no último documento mencionado, é apresentado um caso de estudo em que o objetivo é avaliar a evolução espacial de uma contaminação de LNAPL numa área industrial na Sicília, em Itália.

Em P. HARDISTY et al. (1998), o foco é de cariz teórico, em que se tenta confirmar a veracidade dos conceitos e expressões de caracterização de fluxo desenvolvidas. Começou-se, portanto, por separar a penetração de LNAPL na zona não saturada da penetração na zona saturada, pois o seu comportamento será diferente consoante a presença de água. Assim, para a zona não saturada, através das propriedades do fluido e a abertura das fraturas, determinou-se a equação da condutividade de uma fratura para um fluido e, com a cota, espessura, comprimento da fratura e viscosidade de um fluido, averiguou-se a equação que remete ao fluxo em fraturas individuais.

Passando para a zona saturada, é necessário primeiramente determinar a pressão capilar da água-LNAPL e a pressão de entrada na fratura, pois se esta última for inferior, o LNAPL não entra na fratura. A pressão do LNAPL está relacionada com a diferença entre a densidade da água e o LNAPL a tensão de interface entre a água e o LNAPL, a abertura da fratura e o efeito da gravidade. Para além disto, de forma a avaliar a migração lateral do contaminante, desenvolveu-se uma equação que determina a distância lateral da migração de LNAPL, através da distância entre as diferentes famílias de fraturas, o ângulo que estas formam em relação à horizontal, a abertura e o número de fraturas.

De forma a verificar a veracidade das fórmulas matemáticas desenvolvidas, estas foram aplicadas num estudo de caso, nomeadamente numa fábrica de gás em Alberta, no Canadá. Aqui é conhecida a estrutura geológica do local bem como as litologias constituintes, como se encontra ilustrado na Figura 2.1. Para além destes dados, conhecem-se também todas as características das fraturas presentes no local através de um conjunto de técnicas, incluindo sondas acústicas em poços. No final, os resultados obtidos nas fórmulas do fluxo foram favoráveis e positivos. Esta é uma abordagem mais particular para determinar o comportamento do LNAPL em profundidade num meio fraturado, isto porque é necessário saber com pormenor toda a geologia da área de estudo, quer em termos litológicos, quer estruturais quanto às suas descontinuidades, o que nem sempre acontece em casos de estudo desta natureza.

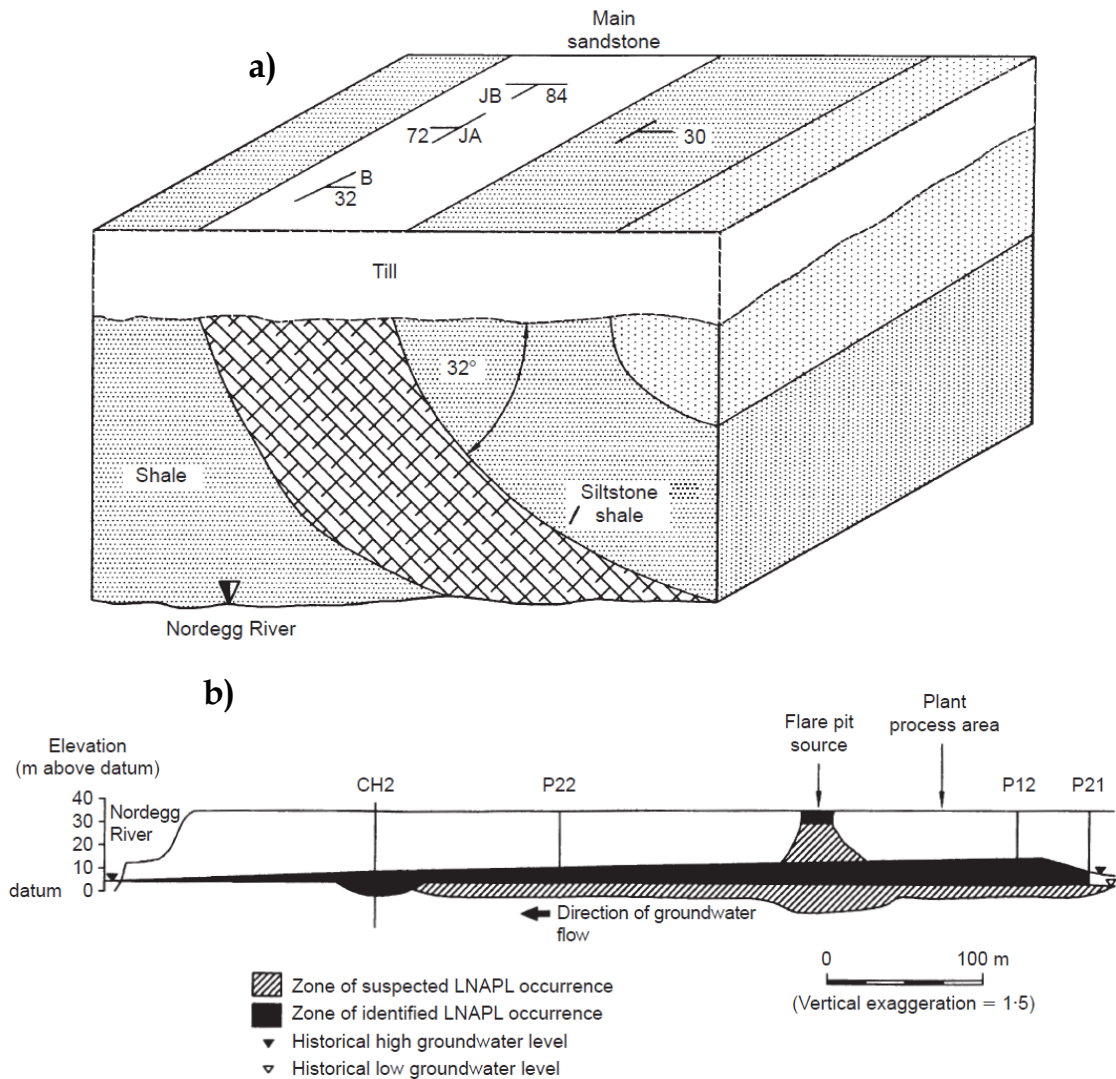


Figura 2.1 - **a)** Estrutura da unidade principal (arenito) na área de uma fábrica de gás em Alberta; **b)** Distribuição do LNAPL na unidade principal na área de uma fábrica de gás em Alberta (retirado de HARDISTY, P. E., et al., 1998)

Em MINEO et al. (2022), o interesse neste caso surgiu do facto da contaminação existente na área industrial migrar com uma tendência anómala, ou seja, era inconsistente com a direção estática do fluxo subterrâneo da área. Para resolver este problema, efetuou-se uma recolha de informação e organizou-se a mesma em SIG, tendo sido possível restituir o estágio evolutivo da pluma entre 2014 e 2020, como se pode observar na Figura 2.2. A metodologia adotada consistiu na reunião de dois tipos de informação: uma, relativa à estratigrafia, grau de fraturação da rocha, nível da água subterrânea, espessura de fase livre (entre 2014 e 2020), a química do produto e a contaminação dissolvida de cada um dos 630 poços na área de estudo; a segunda, recolhida através de resultados obtidos de estudos geoestruturais e geofísicos, em particular perfis de reflexão sísmica que permitiram mapear algumas estruturas subterrâneas. Todos estes resultados contribuíram para a obtenção de um modelo geológico, modelo hidrogeológico, modelo de evolução da pluma e a datação da contaminação.

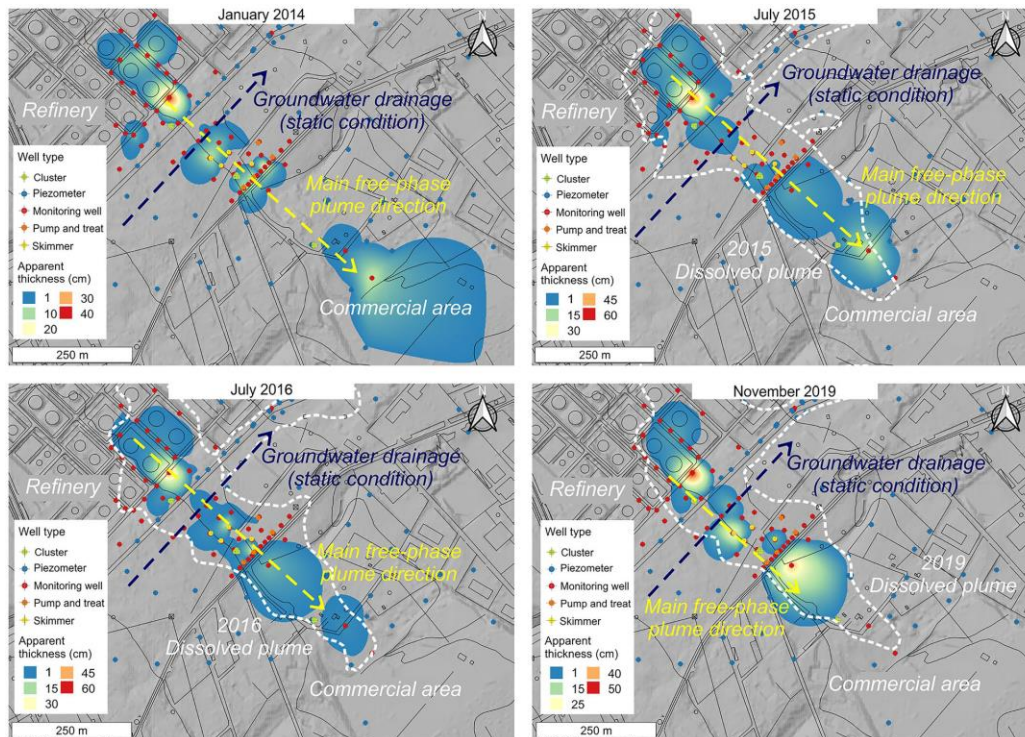


Figura 2.2 - Comparação entre a espessura aparente da pluma de fase livre medida entre janeiro de 2014, julho de 2015, julho e novembro de 2016 (retirado de MINEO et al., 2022)

Assim, concluiu-se que as causas para a condução da pluma de contaminação preferencial sob a condição dinâmica induzida pelas atividades antrópicas compreendiam a fraturação do maciço rochoso e a presença de estruturas de origem tectónica. Em termos da temática deste artigo, é de toda a relevância para a presente dissertação. Através dos métodos aplicados obtiveram-se os resultados que também se esperam obter nesta dissertação.

2.1.2. Casos de estudo: modelo conceptual de aquíferos fraturados

Em termos de casos de estudo cujo foco principal é a construção de um modelo conceptual de aquíferos fraturados, refira-se o trabalho de FERREIRA (2015). Este estudo vai de encontro a um dos objetivos principais da presente dissertação, neste caso a construção de um modelo conceptual de um meio fraturado, através de resultados maioritariamente obtidos em bibliografia e trabalhos de campo (como a observação do maciço *in situ* e levantamento de descontinuidades).

O referido estudo foi elaborado com o intuito de estudar, de forma pormenorizada, a hidrogeologia de um distrito mineiro em Caetité, no Brasil. Através dos resultados obtidos esperou-se averiguar alternativas para uma melhor captação de águas neste local, de forma a diminuir a escassez de água na população durante os períodos de seca. Uma peculiaridade deste local de estudo é o facto de consistir numa área onde ocorre atividade de extração e processamento mineiro, nomeadamente de urânio. Como tal, é coerente considerar-se a possibilidade deste local estar contaminado, visto que os produtos da extração desta substância radioativa podem apresentar um risco para a população que habita neste distrito e até nas

suas proximidades. Assim, para além da criação de um modelo conceptual, avaliou-se a possibilidade de haver risco de contaminação naquela zona, nomeadamente por urânio e também por nitrato devido à utilização elevada de pesticidas na região.

A metodologia adotada nesse estudo teve uma influência significativa na metodologia utilizada na presente dissertação, dadas as técnicas utilizadas que correspondiam com aquilo que era possível ser feito para caracterizar o maciço rochoso em análise nesta dissertação. Em primeiro lugar foi efetuado o levantamento bibliográfico da informação existente com o objetivo de caracterizar fisicamente a região, depois seguiram-se os trabalhos de campo de forma a efetuar-se o reconhecimento da área, a avaliação da geologia regional e local e o levantamento das descontinuidades. Após estas etapas, caracterizou-se física e hidroquimicamente o sistema aquífero como uma forma de compilar todos os dados obtidos e posteriormente efetuar-se a interpretação dos resultados. Por fim, reunidos todos os dados necessários, procedeu-se à última etapa desta metodologia, e objetivo deste estudo, que é a elaboração do modelo conceptual do aquífero fraturado.

No final foi possível propor formas de obter uma melhor gestão dos sistemas aquíferos presentes na área de estudo, para além de diagnosticar os problemas relacionados com os recursos hídricos subterrâneos da região, como é o caso do risco potencial de contaminação por urânio, os conflitos pelo uso da água, as consequências do clima semiárido que é típico naquela região, entre outros.

2.1.3. Normas guia provenientes de entidades reguladoras

No que toca à contaminação em meio fraturado, é encorajado pelas empresas da área que as entidades reguladoras forneçam documentos que sirvam de guia para a resolução desta problemática, de modo que exista uma norma aprovada pelo Estado e qual a melhor forma de abordar cada caso. Nos Estados Unidos da América existe uma organização denominada *Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC)* que consiste numa coligação ambiental liderada pelo Estado em que são produzidos guias e orientações que aprofundam o conhecimento técnico e facilitam a tomada de decisões regulatórias de qualidade, para salvar a saúde humana e o meio ambiente.

Como a contaminação em meios fraturados constitui um risco para a saúde humana tal como para o ambiente, a ITRC produziu um guia com vários módulos para a caracterização e remediação de maciços fraturados, onde se encontram diversos documentos que descrevem conceitos fundamentais, técnicas de remediação consoante cada caso, e metodologia para o estudo da região contaminada. Estes e muitos mais temas interessantes para a temática em análise encontram-se na página da organização <https://itrcweb.org/>. Em Portugal, de facto, faltam guias desta natureza para que o estudo e posterior remediação destes locais sejam efetuada adequadamente e seria algo do interesse não só da própria entidade que elabora estas normas, como também das empresas que aplicam estas técnicas.

Foram utilizados como parte da base teórica para esta dissertação, dois módulos do documento da ITRC relativo à caracterização e remediação de rocha fraturada, que são eles o terceiro módulo relativo à hidrologia (<http://fraturedRx-1.Itrcweb.org>) e o quinto módulo que diz respeito à caracterização da área de estudo (<http://fraturedRx-1.Itrcweb.org>). O módulo da hidrologia aborda tópicos como o comportamento do fluxo subterrâneo no maciço e outras temáticas relativas à captação de águas. Já o quinto módulo agrupa as várias etapas de um estudo preliminar da área de estudo juntamente com os objetivos a alcançar em cada uma.

De destacar, para além dos documentos mencionados, o apêndice D que diz respeito ao apêndice de rochas fraturadas (<https://lnapl-3.Itrcweb.org>), em que é referido o comportamento do LNAPL em meio fraturado, para além de se apresentar um *background* técnico e um resumo de todos os conceitos fundamentais para abordar esta temática. Para além disto possui dois tópicos que aludem à elaboração de um modelo conceptual de uma contaminação de LNAPL e quais as técnicas de remediação a adotar dependendo da aplicabilidade em diferentes tipos de rochas e a potencial janela temporal que levará a que esta técnica atue na totalidade.

2.2. Conceitos teóricos relativos ao maciço fraturado

2.2.1. Descontinuidades

Como já foi referido anteriormente, para conseguir determinar o trajeto dos contaminantes num maciço rochoso, é necessário estudar as descontinuidades que o compõem, pois é através destas que a contaminação fundamentalmente se vai movimentar.

A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (SIMR), define descontinuidade como um termo genérico para fraturas mecânicas em maciço rochoso que possuem uma baixa ou inexistente resistência à tração. Ora, esta definição engloba as falhas, diaclases, planos de estratificação, xistosidade, ... No presente caso de estudo, apenas se consideraram as diaclases como descontinuidades, isto porque são estas que tornam o meio descontínuo, não tendo sido registado nenhum dos outros tipos de descontinuidades no local, até pelas próprias características do meio geológico - um complexo vulcânico.

Convencionalmente, uma diaclase ou fratura consiste num plano onde não se verifica movimento paralelo à superfície de fratura (caso contrário classifica-se como falha). Uma fratura individual tem uma extensão espacial limitada e é descontínua no seu próprio plano.

Em qualquer afloramento, as fraturas têm um determinado comprimento e espaçamento entre elas, como tal, pode haver situações em que há interseção entre várias, formando redes mais ou menos contínuas de fraturas. São estas interconexões que permitem que haja circulação de fluidos por dentro do maciço rochoso. Desta forma, é pertinente analisar as fraturas não como elementos individuais, mas como parte de um conjunto de várias famílias com

características semelhantes, e a partir deste agrupamento, estudar a maneira como as diferentes famílias se interrelacionam entre si.

Segundo L. FERREIRA (2015), para caracterizar as fraturas presentes no maciço, deve efetuar-se um levantamento sistemático quantitativo destas estruturas para além de se efetuar amostragem e ensaios que forneçam informação sobre o seu comportamento aquando submetidas a alterações do estado de tensão *in situ*. No entanto, como apenas é relevante para este estudo a forma como a contaminação irá circular nas fraturas, o levantamento *in situ* das descontinuidades é suficiente.

Note-se que não se irão fazer distinções entre diferentes tipos de fraturas de acordo com a sua génese pois não é significativo para o objetivo da dissertação, apenas se vão agrupar e distinguir as diversas diaclases de acordo com as suas características atuais e como se dispõem no maciço. O método de eleição para efetuar este levantamento é o *Scanline* que irá ser descrito de seguida. Neste método irão ser determinados os parâmetros mais relevantes das fraturas para a caracterização da percolação de fluidos no maciço (Figura 2.3), sendo eles a sua orientação, espaçamento, persistência, rugosidade e abertura (e respetivo preenchimento, se existir). Através destes parâmetros medidos no campo, poder-se-ão determinar outras propriedades que serão úteis para a caracterização das descontinuidades no maciço.

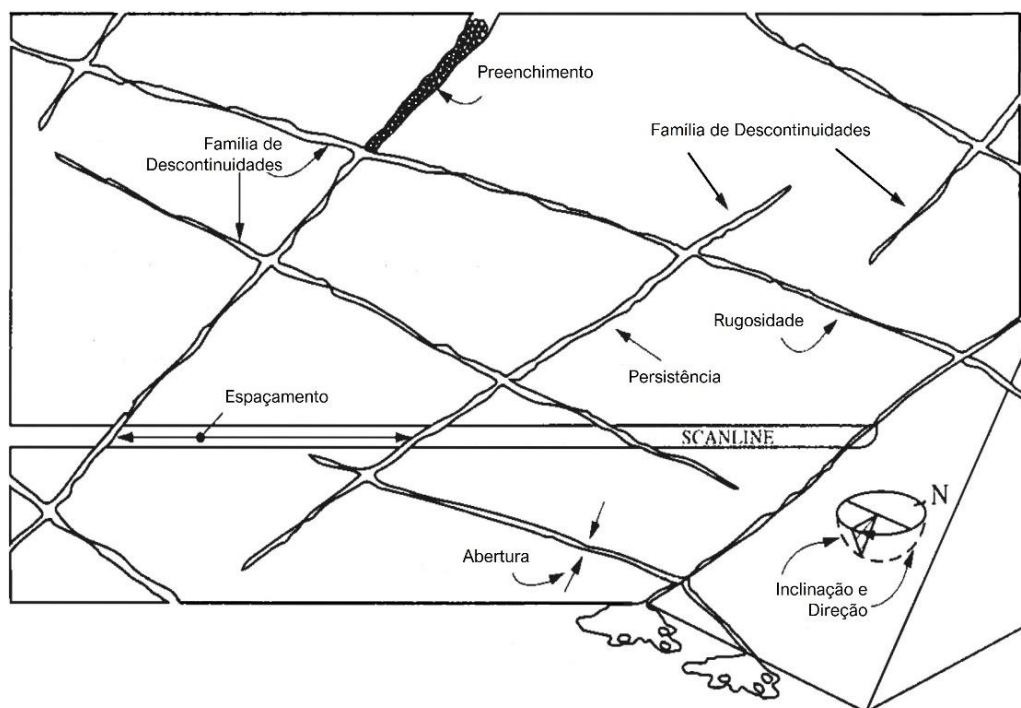


Figura 2.3 - Parâmetros das descontinuidades determinados no campo (adaptado de AZARAFZA et al., 2018)

2.2.1.1. *Scanline*

O processo de *scanline* consiste na observação direta e levantamento das características das descontinuidades referidas previamente, que intersejam uma linha reta (como uma fita métrica) colocada na superfície da rocha, neste caso, num afloramento, como se demonstra na

Figura 2.4. As *scanlines* são geralmente efetuadas na horizontal, no entanto, no caso de as fraturas serem na sua maioria horizontais, a linha deve ser disposta na vertical, devendo sempre e em qualquer caso registar a orientação da linha.

Após o levantamento no campo, faz-se um tratamento de todos os dados recolhidos. É importante realçar que os resultados obtidos são fortemente enviesados para fraturas orientadas perpendicularmente à linha de *scanline*.

Assim, as informações obtidas pela realização dos levantamentos de campo através do processo de *scanline* em afloramento permitem criar um banco de dados que irá permitir qualificar o comportamento das fraturas do maciço e determinar o fluxo potencial dos contaminantes.

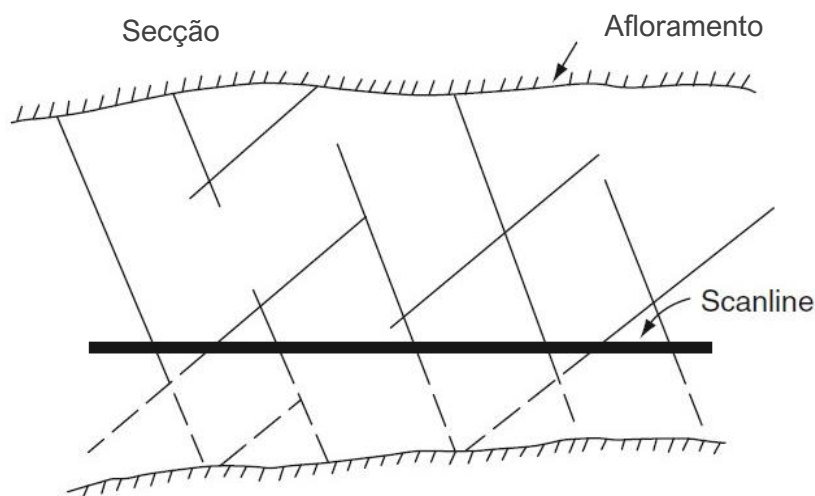


Figura 2.4 - Método *scanline* para estudo de descontinuidades (adaptado de SINGHAL & GUPTA, 2010)

2.2.1.2. Parâmetros das Descontinuidades

Orientação

A orientação de uma fratura corresponde à sua posição ocupada no espaço tridimensional, que pode ser definida através da sua direção e mergulho, ou pela sua direção do mergulho (α) e mergulho/inclinação (β), como se pode verificar na Figura 2.5. Nesta dissertação utilizou-se o último método para efetuar o levantamento das diaclases.

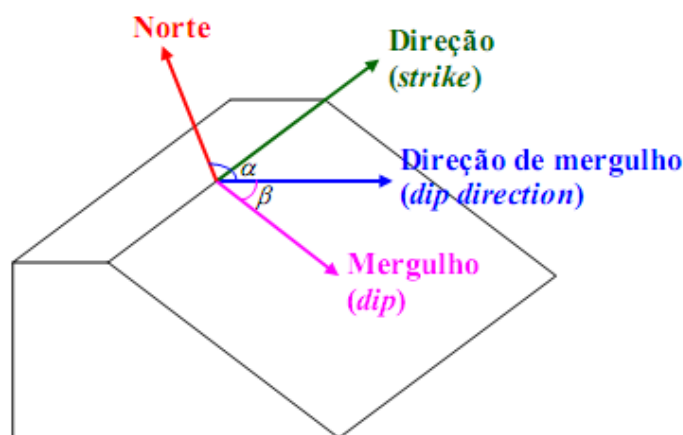


Figura 2.5 - Parâmetros necessários para definir a orientação espacial de fraturas (retirado de FERREIRA, 2015)

A direção pode ser definida como o ângulo que o plano de fratura faz com o plano horizontal, variando de 0° a 360° e é medido a partir do norte magnético no sentido dos ponteiros do relógio. O mergulho ou inclinação corresponde ao ângulo de inclinação máxima do plano de fratura com o plano horizontal perpendicular à direção, os valores deste variam de 0° (plano horizontal) a 90° (plano vertical). A direção do mergulho é o ângulo formado pela projeção horizontal da linha de mergulho com o respectivo Norte, esta é medida no sentido horário a partir do Norte e varia entre 0° e 360° .

A partir da recolha destes dados do campo, é possível efetuar uma projeção estereográfica no *software Dips* da *Rocscience* e assim agrupar as diversas fraturas em famílias de modo a averiguar quais são as direções mais importantes e, conseqüentemente, a orientação preferencial do fluxo de contaminantes através das fraturas. No entanto, não se pode considerar unicamente a direção preferencial das fraturas, pois outros fatores vão ditar se é ou não possível haver circulação de fluidos pelas descontinuidades.

Espaçamento

O espaçamento entre fraturas corresponde à distância entre elas medida ao longo de uma linha com localização e orientação específicas. Comummente consideram-se 3 abordagens diferentes na medição dos espaçamentos entre fraturas, sendo elas o espaçamento total, o espaçamento de uma família de fraturas e o espaçamento ao longo da normal da família de fraturas. Neste trabalho efetuou-se a medição do espaçamento com base no espaçamento entre famílias, ou seja, efetua-se a medição da distância entre cada fratura da mesma família. Na Tabela 2-1 estão representadas as diferentes classes adotadas para caracterizar o espaçamento entre fraturas no maciço rochoso em estudo, de acordo com a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (SIMR).

Tabela 2-1 - Classificação do espaçamento entre fraturas segundo a SIMR, 2007

Espaçamento das Fraturas	
Descrição	Espaçamento (cm)
Extremamente Pouco Espaçadas	< 2
Muito Pouco Espaçadas	2 - 6.
Pouco Espaçadas	6 - 20.
Moderadamente Espaçadas	20 - 60.
Espaçadas	60 - 200
Muito Espaçadas	200 - 600
Extremamente Espaçadas	> 600

O espaçamento entre as descontinuidades vai condicionar o tamanho do bloco da rocha intacta, definindo assim o papel que este terá na sua relevância face à influência das descontinuidades. No caso de as fraturas possuírem um espaçamento muito pequeno, o maciço rochoso poderá apresentar um comportamento isotrópico determinado pelas propriedades dos conjuntos de blocos mais ou menos uniformes como um todo, podendo ser considerado, quanto à hidrogeologia, um meio poroso. No espectro oposto, em que as fraturas se encontram muito afastadas, o comportamento do maciço será como o de um meio fraturado ou fissurado.

Persistência

A persistência ou comprimento de plano de descontinuidade é uma medida que representa a extensão ou tamanho da área de uma descontinuidade. A persistência encontra-se diretamente ligada com o tamanho dos blocos e, conseqüentemente com o grau de fraturação e interconectividade do maciço, como se observa na Figura 2.6. Esta é estimada pelo comprimento da descontinuidade ao longo da direção e inclinação da face do maciço rochoso.

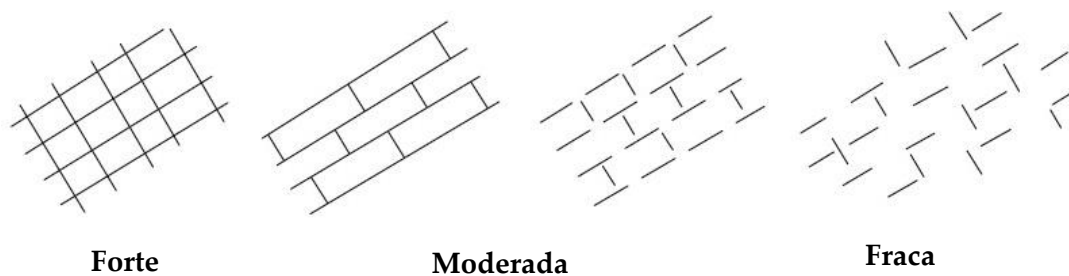


Figura 2.6 - Influência da persistência de uma descontinuidade no grau de fraturação e interconectividade (adaptado de SINGHAL & GUPTA, 2010)

É considerada uma medida aparente devido ao facto de que, em afloramento, apenas se mede o comprimento da fratura na inclinação em que o afloramento se encontra. Podendo continuar a sua extensão para dentro do maciço ou para outras direções o que torna difícil de quantificar unicamente com a observação da face do maciço aflorante.

Na Tabela 2-2 estão representadas as diferentes classes adotadas para caracterizar a persistência das fraturas no maciço rochoso em estudo, de acordo com a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (SIMR).

Tabela 2-2 - Classificação da persistência das fraturas segundo a SIMR, 2007

Persistência das Fraturas	
Persistência	Extensão (m)
Muito Baixa	< 1
Baixa	1 - 3.
Média	3 - 10.
Alta	10 - 20.
Muito Alta	> 20

Apesar da dificuldade de aferir com rigor a persistência do maciço rochoso, este parâmetro é importante para caracterizar o fluxo de contaminantes e outros fluidos nas descontinuidades, isto porque quanto mais longa for a fratura, maior será a probabilidade de esta interseccionar outras fraturas, aumentando o volume da rede de fraturação em que podem circular fluidos no maciço. Da mesma forma, com o aumento da extensão da descontinuidade, maior o volume de fluido ou de contaminante que poderá movimentar-se no maciço rochoso.

Rugosidade

As paredes das fraturas não são superfícies lisas e planas, estas contêm irregularidades ou asperezas que vão influenciar a resistência ao corte de uma descontinuidade. A existência de rugosidades aumenta a resistência ao corte, que diminui com o aumento da abertura e, em geral, com a espessura do preenchimento. Assim, a rugosidade é caracterizada pelas asperezas e ondulações na superfície da descontinuidade. Note-se que nesta dissertação o termo rugosidade também vai englobar a ondulação das descontinuidades, pois para o objetivo do estudo, não é necessário um aprofundamento sobre este parâmetro.

A medição da rugosidade no campo de uma fratura pode ser feita por vários métodos, como com recurso a um pente de aço ou a um rugosímetro. Para além destes métodos quantitativos, pode-se efetuar uma medição qualitativa através da comparação visual da descontinuidade através de perfis tipo de rugosidade como o representado na Figura 2.7. Este tipo de perfil é denominado de perfil de rugosidade JRC ("Joint Roughness Coefficient"), em que o JRC é um parâmetro que descreve a morfologia da rugosidade das paredes das descontinuidades. Este é o método mais utilizado para levantamentos no campo devido à sua simplicidade e rapidez de utilização, tendo sido também o escolhido para medir este parâmetro no presente estudo.

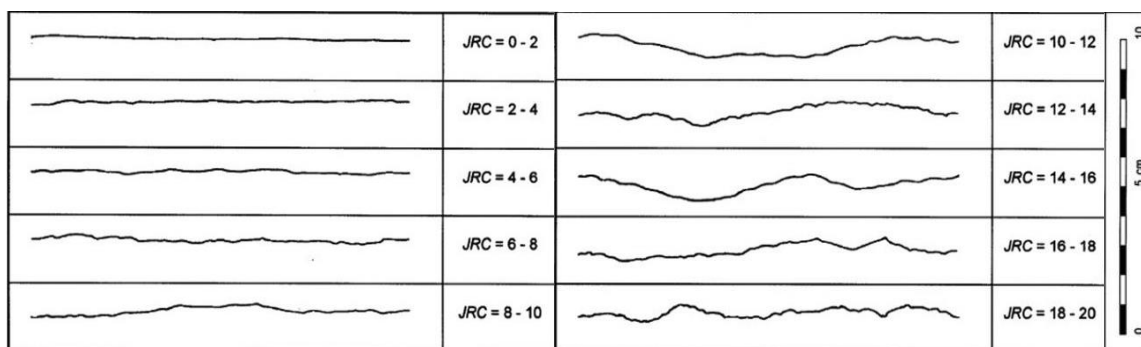


Figura 2.7 - Perfis típicos de rugosidade JRC definidos por BARTON & CHOUBEY (1977) (retirado de RAFEK, et al., 2017)

Do ponto de vista hidrogeológico, a rugosidade reduz não só a condutividade hidráulica, como o fluxo de fluido na fratura, pois vai fazer com que as paredes tenham um maior atrito, o que, por conseguinte, vai diminuir a velocidade de percolação. Para além disto, leva também a um efeito de canalização do fluxo preferencial. Ora, estes dois fatores vão levar a uma redução da porosidade efetiva e tornar as velocidades de fluxo irregulares, tornando este num fluxo turbulento.

Por vezes as irregularidades das paredes das fraturas podem criar autênticas barreiras ao fluxo, aumentando assim o potencial de retenção ou a própria da aderência do material transportado às paredes das fraturas. Por consequência, este fenómeno pode levar a um possível preenchimento da descontinuidade, diminuindo a abertura da mesma e assim, reduzindo o volume de fluido circulante através das fraturas.

Abertura

A abertura de uma fratura corresponde à distância perpendicular entre as suas paredes, quando esta não se encontra preenchida. Este espaço intermédio poderá ser ocupado por água ou por ar. Este parâmetro pode variar consideravelmente ao longo do tempo devido não só a mudanças no campo de tensão *in situ* ou por interações dos constituintes da rocha com o meio ambiente, criando reações biogeoquímicas como a dissolução e a precipitação. O produto destes fenómenos pode ser um preenchimento de diversas origens, que podem influenciar o fluxo potencial.

A medição pode se realizar com o auxílio de uma fita métrica, graduada em milímetros ou com um paquímetro. No caso dos trabalhos de campos realizados no âmbito desta dissertação, recorreu-se a uma fita métrica graduada em centímetros com subdivisão em milímetros, e as medições basearam-se nas classes da Tabela 2-3.

Tabela 2-3 - Classificação dos tipos de abertura das fraturas segundo a SIMR, 1981

Abertura das Fraturas	
Descrição	Abertura (cm)
Muito Fechada	< 0,01
Fechada	0,01 - 0,025
Parcialmente Aberta	0,025 - 0,05
Aberta	0,05 - 0,25
Moderadamente Ampla	0,25 - 1
Ampla	> 1
Muito Ampla	1 - 10.
Extremamente Ampla	10 - 1000
Cavernosa	> 1000

Geralmente a abertura das fraturas tende a ser superior mais perto da superfície ou ao nível do solo devido ao facto de estarem mais sujeitas a fenómenos de erosão ou alteração. Contrariamente, em profundidade a abertura das descontinuidades tende a diminuir (podendo até fechar) pois com a profundidade a pressão litostática é maior e vai ter tendência a fechar cada vez mais a fratura. Note-se que as rugosidades vão influenciar o tamanho da abertura e dificultam a sua medição no campo.

Quanto à influência da abertura das descontinuidades no fluxo de contaminantes ou outros fluidos, com o aumento da área da secção transversal, maior será a capacidade de fluxo nas fraturas.

Preenchimento

As fraturas podem se encontrar preenchidas com um material que ocupa o espaço entre as paredes adjacentes de uma descontinuidade, que se denomina como preenchimento. O preenchimento consiste num material sólido de composição diferentes da parede rochosa e normalmente é menos resistente que a matriz rochosa.

Este material pode ter várias origens, propriedades físicas e mecânicas, podendo ser homogéneo ou heterogéneo e preencher parcial ou completamente a fratura. O preenchimento pode ser produto da alteração da própria rocha devido à passagem de fluidos (como acontece com os minerais argilosos), ou ainda ser composto por material transportado e precipitado na abertura da fratura (no caso dos sais e hidróxidos). Assim, o preenchimento está diretamente relacionado à resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade das descontinuidades.

A sua medição ou avaliação é puramente qualitativa, ou seja, no campo descreve-se o tipo de preenchimento e como este se encontra instalado na abertura da descontinuidade. De notar que o grau e o tipo de preenchimento podem sofrer variações importantes a curto prazo do ponto de vista da resistência, se existirem mudanças no seu teor em água ou se ocorrerem movimentos ao longo das paredes dessa fratura. Estas variações ocorrem principalmente nos materiais de enchimento mais alterados ou frágeis.

Relativamente ao comportamento de fluidos nas discontinuidades, o preenchimento de uma fratura reduz a sua abertura, o que leva a uma redução proporcional na capacidade de fluxo. Para além disso, as propriedades hidráulicas do material que constitui o preenchimento pode afetar o fluxo, como no caso da permeabilidade, que vai depender da mineralogia e do tamanho do grão.

2.2.2. Propriedades índice: porosidade e resistência

Para além da caracterização das discontinuidades, é do interesse da problemática em estudo, a análise do próprio material rocha que constitui o maciço e qual a influência que poderá ter no comportamento da contaminação quando esta se encontra em circulação no maciço. Na teoria, o basalto será um material com uma resistência à compressão elevada e com uma porosidade baixa, portanto qualquer fluido não circulará no seu interior, mas sim nos espaços vazios que este poderá possuir como fraturas, contactos com outras litologias ou até mesmo tubos lávicos que serviram outrora para a circulação do magma.

Na realidade, esta abordagem é muito pouco conservadora pois não considera o estado de alteração do material rocha que pode refletir-se numa porosidade e resistência tão baixa ao ponto que a rocha poder não ser mais considerada como um meio resistente e impermeável, existindo, conseqüentemente, maior circulação de fluidos. Esta alteração é uma consequência, neste tipo de rochas, da presença frequente de minerais argilosos (principalmente argilas expansivas) que resultam da alteração dos minerais ferromagnesianos.

Existindo esta possibilidade, a única forma de ter uma ideia do estado atual da rocha no maciço no que toca às suas características mecânicas é através de ensaios *in situ* ou ensaios de laboratório com recolha de amostras no campo. Dado que o foco desta dissertação é entender o comportamento da rocha na presença de contaminantes e de que forma é que as suas propriedades índice vão influenciar a evolução destes em profundidade, as características da rocha que poderão ser determinantes são a sua porosidade e resistência à compressão simples.

2.2.2.1. Porosidade

De acordo com a AAPG (*American Association of Petroleum Geologists*), a porosidade é a razão entre o volume de vazios (poros) e o material rocha num determinado volume. Esta característica está intrinsecamente ligada à capacidade de que a rocha tem de captar fluidos, pois os poros serão espaços por onde as partículas poderão infiltrar-se, e conseqüentemente armazenar quantidades consideráveis de fluido. Para além disto, a presença de poros na estrutura do material rocha influencia o seu comportamento, nomeadamente diminui a sua resistência, uma propriedade que irá ser aprofundada posteriormente.

No caso de se tratar de uma escala ao nível de um afloramento, podem-se distinguir dois tipos de porosidade: porosidade primária (volume dos poros entre os fragmentos das rochas clásticas) que diz respeito à massa rochosa e porosidade secundária (posterior fracturação e alteração da rocha) que alude ao historial da rocha, podendo existir variações ao longo

do maciço. Nesta parte da dissertação apenas se avaliou a porosidade primária, que é a que representa as características de porosidade do material rocha.

Nos basaltos, a variação da porosidade encontra-se geralmente associada ao estado de alteração e à tectonização a que a rocha foi sujeita, ou seja, considerada como porosidade secundária. Com a progressão da alteração e de forças de natureza tectónica, a porosidade irá também ser maior, sendo um bom indicativo na avaliação destes dois parâmetros. Esta dissertação apenas tem como objetivo a análise das condições do maciço atualmente, portanto só serão determinados os valores de porosidade, não sendo relevante a tentativa de averiguação dos fenómenos que afetaram o maciço.

A determinação dos valores de porosidade aberta de uma rocha foi efetuada em laboratório, de acordo com a norma EN 1936 (2008).

Determinação da porosidade aberta

Este ensaio pode dividir-se em duas etapas: a preparação dos provetes e o procedimento. O primeiro passo é a amostragem no campo, em que devem ser recolhidas amostras suficientes para serem elaborados 6 provetes por ponto no campo, a partir das ditas amostras. Já no laboratório, estes provetes podem apresentar forma de cilindros, cubos ou prismas, devendo ser obtidos por meio de serragem ou carotagem, neste caso utilizou-se a serra.

Os provetes obtidos apresentaram um volume aparente de pelo menos 60 cm³. Com os provetes obtidos, procedeu-se à sua secagem na estufa, à temperatura constante de $70 \pm 5^\circ \text{C}$ durante 24 ± 2 horas (Figura 2.8 a)). Estando os provetes secos, mantiveram-se num exsiccador até atingirem a temperatura ambiente, de modo a não ganharem humidade (Figura 2.8 (b)).

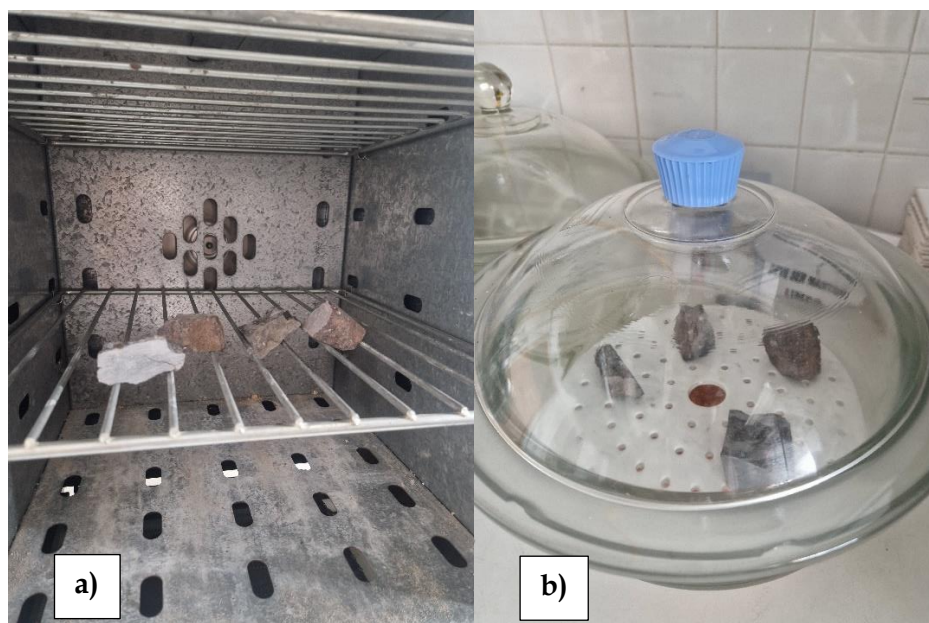


Figura 2.8 - Amostras a secar na estufa (a) e posteriormente a arrefecer no exsiccador (b)

Posteriormente, passou-se à etapa do procedimento, onde se começou por pesar cada provete seco, obtendo-se m_d . De seguida, estes colocaram-se no recipiente de vácuo e baixou-se gradualmente a pressão até atingir os $2,0 \pm 0,7$ kPa e manteve-se durante $2 \pm 0,2$ horas de modo que todo o ar nos poros abertos do provete fosse retirado, como se encontra ilustrado na Figura 2.9.

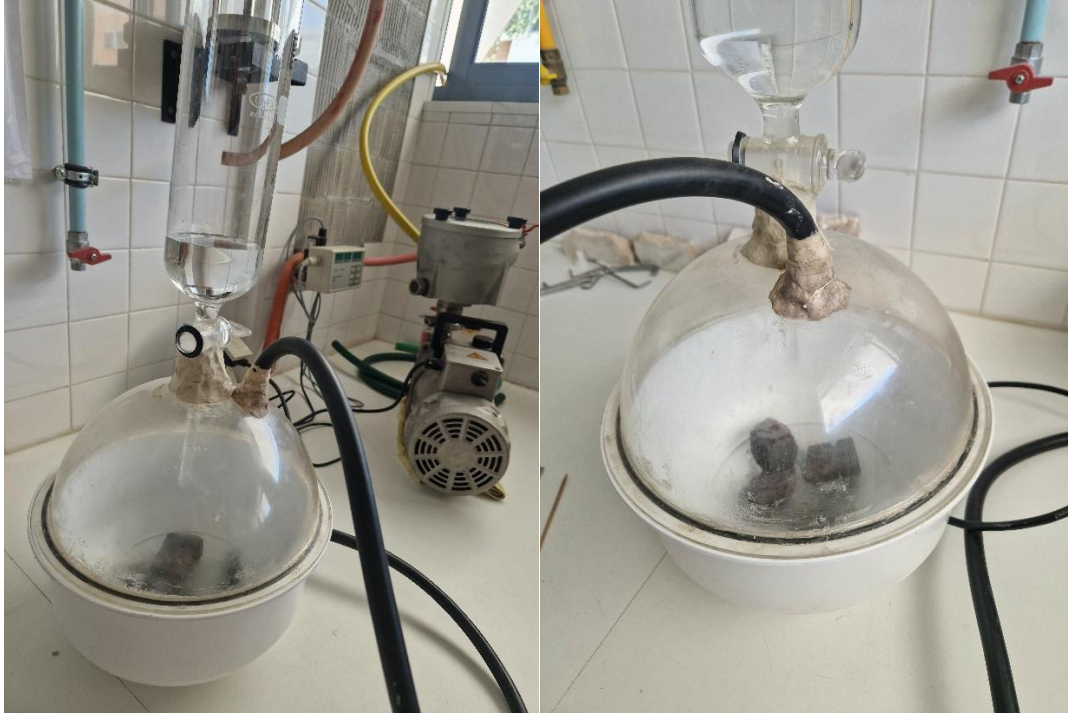


Figura 2.9 - Amostras dentro da câmara de vácuo com uma ampola de decantação impregnada de modo a encher a câmara de vácuo com água de forma controlada e sem perturbar o sistema de vácuo

Após isto, introduziu-se lentamente água destilada à temperatura de $20^\circ \pm 5^\circ$ C no recipiente de forma que todos os provetes ficassem imersos em não menos de 15 minutos e manteve-se a pressão de $2,0 \pm 0,7$ kPa. Concluído este passo, restaura-se a pressão atmosférica no interior do recipiente e deixam-se os provetes imersos durante 24 ± 2 horas. Por fim, passado este período de tempo, pesam-se os provetes imersos, obtendo-se m_h e rapidamente limpa-se de forma a obter a massa do provete m_s .

Para além da porosidade aberta (p_o), através deste ensaio, é possível determinar outros parâmetros por meio de fórmulas matemáticas, sendo eles o volume de poros abertos (V_o), o volume aparente (V_b) e a massa volúmica aparente (ρ_o). As respetivas equações são as seguintes:

$$V_o = \frac{m_s - m_d}{\rho_{rh}} \times 1000 \text{ (ml)} \quad \text{(Equação 1)}$$

(Em que a massa aparente da água (ρ_{rh}) a 20° C é 998 kg/m^3).

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} \times 1000 \text{ (ml)} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\rho_b = \frac{md}{ms - mh} \times \rho_{rh} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$p_o = \frac{ms - md}{ms - mh} \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{(Equação 4)}$$

De acordo com a IAEG (*International Association of Engineering Geology*), os valores de porosidade obtidos neste ensaio podem-se classificar como está descrito na Tabela 2-4. Deve-se ter em consideração de que este ensaio foi feito apenas a uma pequena porção da rocha, ou seja, não significa necessariamente que todo o maciço em estudo apresente os valores obtidos. Portanto, o que este ensaio transmite, é um valor representativo da porosidade do maciço, mas que pode ou não corresponder à realidade do maciço como um todo.

Tabela 2-4 - Classificação da rocha de acordo com a sua porosidade segundo a IAEG, 1979

Classe	Porosidade (%)	Descrição
1	> 30	Muito Alta
2	30 - 15	Alta
3	15 - 5.	Média
4	5 - 1.	Baixa
5	< 1	Muito Baixa

Como já foi referido, através dos valores obtidos neste ensaio, consegue-se averiguar a massa volúmica aparente que, de acordo com a norma EN 1936 CEN (1997), para rochas densas as diferenças entre a massa volúmica aparente obtida em laboratório e a massa volúmica real são mínimas, pelo que se pode considerar o valor da massa volúmica aparente como sendo o valor da massa volúmica real. Assim, vai-se utilizar o valor médio de massa volúmica aparente obtido neste ensaio para cada zona como o valor de massa volúmica da rocha no ensaio para determinação da resistência à compressão uniaxial que será explicado no subcapítulo seguinte.

2.2.2.2. Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples determina a eficiência da rocha em manter o seu arranjo original, ou seja, manter coesos os seus componentes. Naturalmente, uma resistência baixa reflete um estado de alteração da rocha alto, isto porque vão existir componentes que já foram erodidos ou alterados, tornando a rocha menos resistente. Assim, a tendência da rocha será possuir uma menor resistência à superfície onde está sujeita a fenómenos que levam à sua alteração, e em profundidade este parâmetro ir aumentado. Como foi previamente referido, a porosidade na rocha influencia diretamente a resistência, ou seja, com o aumento do número de poros na rocha, a rocha terá mais espaços vazios que representam pontos de fraqueza.

Este parâmetro pode ser determinado em laboratório através do ensaio da resistência à compressão uniaxial (UCS) com a recolha de amostra no campo. Outro método, mais expedito, de determinar a resistência da rocha é através de ensaios *in situ* simples, podendo ser

estimada a partir de correlações com dados obtidos em ensaios esclerométricos, como o esclerómetro ou martelo de Schmidt. Este foi o método adotado para a determinação da resistência da rocha devido não só à sua fácil aplicação, mas também pelo facto de se efetuar à superfície do afloramento, local onde a resistência é, supostamente, mínima. Desta forma, se a resistência à superfície for elevada, em profundidade será ainda maior, criando assim um limite inferior para o valor deste parâmetro.

Determinação da dureza de Schmidt

O teste do esclerómetro ou martelo de Schmidt fornece um número de ressalto do pistão de aço na extremidade do equipamento, resultante da aplicação do martelo na rocha de interesse, a partir do qual a resistência uniaxial pode ser estimada. O esclerómetro é constituído por um sistema de um pistão com uma mola impregnada de forma que este, ao ser pressionado contra a superfície do afloramento, transfere energia à rocha, deformando a mola (Figura 2.10). É a recuperação do comprimento da mola que traduz os valores relativos à dureza da rocha.



Figura 2.10 - Esclerómetro do tipo Schmidt utilizado para a determinação da resistência da rocha (retirado de FAIM, 2014)

O esclerómetro utilizado é do tipo L, com uma energia de impacto de 0,735 Nm e é recomendado efetuarem-se 20 ensaios por lote amostrado. Para iniciar o ensaio, coloca-se o esclerómetro perpendicularmente à superfície do maciço rochoso e aplica-se uma força ao aparelho até se ouvir um clique do pistão ao retrair. O valor apresentado no visor (de 0 a 60) é o correspondente à dureza de Schmidt naquele local. Repete-se o mesmo procedimento vinte vezes por cada ensaio para depois se fazer a média dos valores obtidos e obter-se a dureza de Schmidt para cada local do afloramento. No final, obtém-se um arranjo de valores por local numa zona do campo, caracterizando-a completamente.

Como foi referido anteriormente, os resultados deste ensaio podem ser correlacionados com outros valores de propriedades da rocha para se obterem parâmetros geomecânicos. É o caso da correlação entre a densidade média da rocha com a dureza obtida no campo para se obter um valor da resistência à compressão uniaxial da rocha, com recurso ao ábaco de Miller (Figura 2.11). Com base na posição que se efetuou o ensaio do martelo de Schmidt e o valor de massa volúmica obtido através do ensaio da determinação da porosidade aberta, é possível determinar a resistência à compressão uniaxial da rocha em cada local do afloramento.

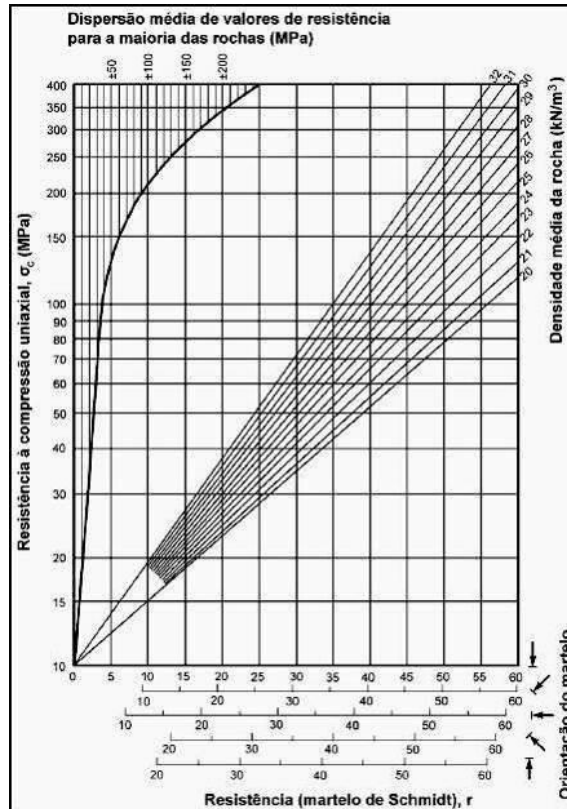


Figura 2.11 - Ábaco de Miller que correlaciona a dureza de Schmidt com a resistência à compressão uniaxial (adaptado de VALLEJO & FERRER, 2011)

Da mesma forma que se pode classificar a rocha de acordo com os seus valores de porosidade, através da Tabela 2-5 pode-se caracterizar os resultados obtidos da resistência à compressão uniaxial, conseguindo-se fazer uma melhor interpretação da gama de valores obtidos.

Tabela 2-5 - Classificação das rochas de acordo com a sua resistência à compressão uniaxial, segundo a SIMR, 1981

Resistência à Compressão Uniaxial	
Descrição	RCU (MPa)
Muito Baixa	< 6
Baixa	6 - 10.
Moderada	20 - 60
Alta	60 - 200
Muito Alta	> 200

2.2.3. Contaminação em maciço fraturado

2.2.3.1. Contaminante em estudo - LNAPL

Para além das características do maciço, tem de se ter em consideração o comportamento do contaminante presente na área de estudo pois, dependendo do tipo de contaminação, a sua evolução em profundidade irá ser diferente. Dependendo da sua densidade, os contaminantes podem ser ou não solúveis em água, por exemplo, no caso dos sais, estes dissolvem-se em água e circulam pelo aquífero como uma mistura sem interface.

No caso dos contaminantes imiscíveis, ou NAPL (*Non-Aqueous Phase Liquids*), estes são insolúveis e formam uma interface física com a água. Dentro do grupo dos contaminantes que não se misturam com a água, distinguem-se dois tipos, os LNAPL (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*) e DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*), como se pode observar na

Figura 2.12. No primeiro caso, os contaminantes são menos densos que a água, que é o caso dos hidrocarbonetos de petróleo. Estes flutuam sobre o nível freático nos aquíferos e normalmente dispersam-se sobre ele sob a forma de filmes.

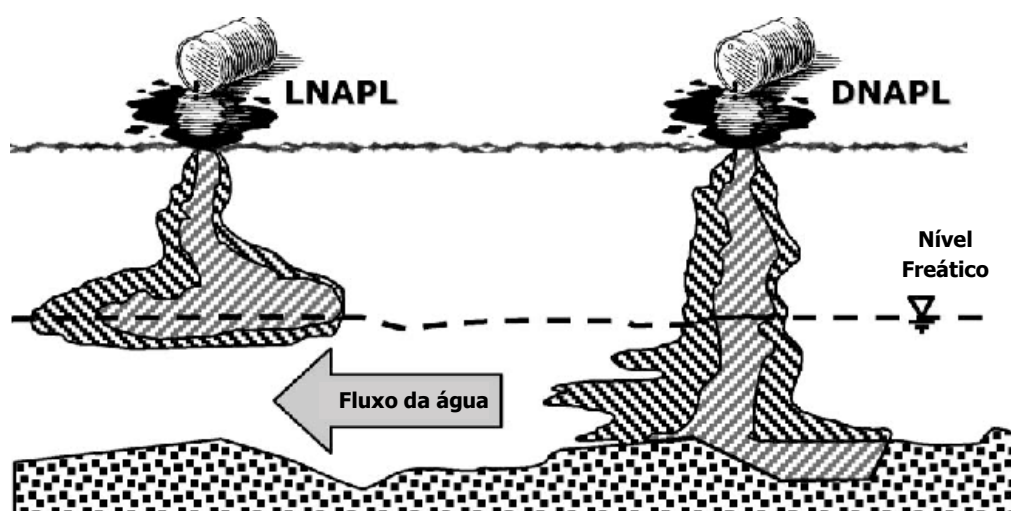


Figura 2.12 - Diferença entre LNAPL e DNAPL (adaptado de FLORES et al., 2011)

No espetro oposto tem-se os DNAPL que são mais densos que a água, como por exemplo solventes clorados, e tendem a atingir profundidades, afundando até às camadas mais profundas e confinantes do aquífero. (FLORES et al., 2011).

Na área de estudo, a contaminação detetada é do tipo LNAPL, mais concretamente de hidrocarbonetos como a gasolina e gasóleo, isto é, compostos com densidade inferior a 1; portanto, o foco deste estudo será para este tipo de contaminante. Estes compostos podem se encontrar na subsuperfície na fase líquida imiscível ou particionada (LNAPL), dissolvidos na água em profundidade como parte da fase aquosa, sob a forma de vapor do solo ou até mesmo na fase sólida como resultado da adsorção das partículas do solo, como se encontra ilustrado na Figura 2.13. Assim, a água subterrânea vai dissolver os componentes solúveis do LNAPL

e transportá-los para o nível freático formando uma pluma, enquanto os componentes voláteis serão transportados para as partes superiores do aquífero por difusão molecular causando contaminação secundária na zona não saturada por volatilização ou por dissolução, restando uma fase livre do produto, em regra sobrenadante.

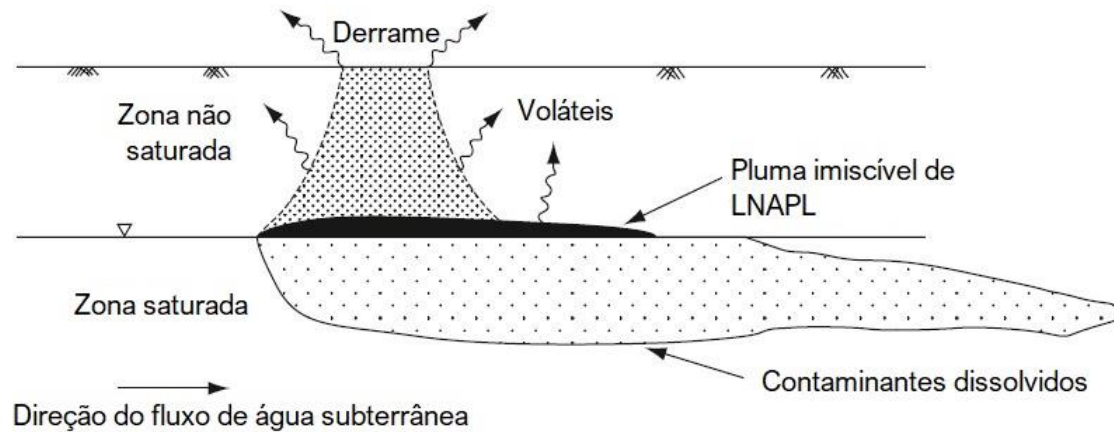


Figura 2.13 - Diferentes formas que os compostos de LNAPL podem apresentar em profundidade (adaptado de SINGHAL & GUPTA, 2010)

Num típico caso de derrame de LNAPL em meio poroso, o contaminante é libertado à superfície ou próxima dela e migra verticalmente em profundidade. Neste processo de migração, se o volume derramado de LNAPL for suficiente para ultrapassar a capacidade de armazenamento residual do solo, continuará o seu caminho até atingir a franja capilar do nível freático. Como o contaminante é menos denso que a água, vai acumular-se sobre ela, podendo causar uma depressão na interface LNAPL-nível freático. Posteriormente, com o acumular de volume de LNAPL flutuante, a tendência é dispersar-se lateralmente no sentido do fluxo da água subterrânea à medida que a franja capilar por onde ele passa se torna saturada (HARDISTY, 1998).

Nesta situação, há fatores que vão determinar a ocorrência e evolução de LNAPL em profundidade. Tais parâmetros são fundamentalmente as características do próprio LNAPL (densidade, solubilidade, composição, volatilidade e viscosidade) e do meio físico (geometria do poro, pressão capilar, teor de humidade e armazenamento residual, heterogeneidades hidrogeológicas em diferentes escalas).

Ora, quando o meio é descontínuo ou fraturado, o comportamento do LNAPL não é tão facilmente descrito usando os princípios e técnicas adotadas para meios porosos. Embora se apliquem os mesmos princípios físicos ao fluxo em meios porosos e em meios fraturados, nestes últimos, o que vai ditar o caminho preferencial da contaminação são as heterogeneidades do meio, neste caso as fraturas, que se comportam como caminhos de fluxo de contaminantes finitos e restritos. Conseqüentemente, para determinar o fluxo preferencial, tem de se averiguar as características das fraturas de onde o contaminante poderá passar, o que representa um estudo bastante mais complexo do que no caso de um meio homogêneo (ITRC, 2018).

Dada a complexidade do maciço rochoso analisado neste trabalho, no que diz respeito ao seu estado de alteração, litologia e estado de fraturação, considera-se uma abordagem correta associar um tipo de meio a cada nível de forma que o modelo conceptual da contaminação seja o mais realista possível.

2.2.3.2. Tipos de movimentação de LNAPL em meio fraturado e poroso

De acordo com as condições geológicas, geomecânicas e hidrogeológicas do local, as fraturas individuais ou redes de fraturas podem-se tornar caminhos descontínuos por onde pode circular água e contaminantes. O conhecimento da geometria das fraturas, possíveis heterogeneidades, e as interações entre a matriz da rocha e as suas respectivas fraturas é crítico para a compreensão do destino e transporte do contaminante. Os constituintes dos NAPL (quer seja DNAPL ou LNAPL) possuem substâncias que se dissolvem na água subterrânea, criando plumas de fase aquosa que são controladas pela advecção, dispersão e difusão. Estes componentes dissolvidos migram consoante a direção do fluxo subterrâneo, independentemente de a fonte de contaminação permanecer estanque devido a fenómenos de captura capilar (VANDREKWAAK & SUDICKY, 1996), ou seja, por causa da capilaridade, as gotículas de água ou partículas de contaminante irão fixar-se nas paredes do maciço. De uma forma geral, os mecanismos de transporte que atuam em meio fraturado são os mesmos que em meio poroso, o que varia é apenas a sua velocidade e impacto que estes terão no meio.

Quando se fala somente na circulação de fluidos nas fraturas, a advecção e convecção constituem os principais mecanismos de transporte, devido à qual os solutos são transportados na horizontal e na vertical a uma velocidade linear. Na maioria dos casos, enquanto a advecção é o processo de transporte predominante ao longo das fraturas, o transporte difusivo prevalece na matriz e é ortogonal ao plano das fraturas. Em meios fraturados, o transporte por advecção e convecção é muito mais rápido do que em meios porosos (desde que a matriz seja impermeável e a sua porosidade seja insignificante), podendo variar a sua velocidade consoante as características das fraturas por onde estes circulam (rugosidade, abertura, preenchimento, ...). Desta forma, pode-se afirmar que o transporte através da matriz rochosa por advecção em rochas fraturadas é geralmente insignificante devido à sua baixa permeabilidade. No que toca a meios porosos, a advecção é relativamente constante e lenta (salvo a existência de heterogeneidades significativas no meio que poderão alterar a sua trajetória ou velocidade de percolação).

Relativamente à dispersão, o fluido terá tendência a espalhar-se, o que vai causar a sua diluição, e devido a este fenómeno, o fluido irá se espalhar tanto na longitudinal tanto na transversal. No entanto, a dispersão longitudinal tem uma força superior a qualquer direção normal ao fluxo (dispersão transversal). Em meios porosos, este mecanismo é pouco significativo pois em termos teóricos, o meio poroso é homogéneo e isotrópico, não existindo elementos que possam levar à dispersão do contaminante. No caso dos maciços fraturados, a dispersão deve-se às diferentes velocidades dentro das paredes das fraturas (devido a dife-

renças na abertura e na rugosidade ao longo da fratura) e também às diferenças nas velocidades da passagem do fluido de uma fratura para outra, na interseção e convergência de fraturas que causam a mistura e dispersão transversal.

O efeito da dispersão é também maior em meios fraturados e consolidados do que em meios não consolidados, isto porque a distribuição do tamanho dos poros é maior em rochas consolidadas e, conseqüentemente, a distribuição de velocidades também o será. Para além disto, o facto de um meio consolidado ser mais compacto, também leva a que haja uma maior ramificação das linhas de fluxo e, logo, a uma maior dispersão lateral (SINGHAL & GUPTA, 2010). Particularmente numa rocha que contenha múltiplas famílias de fraturas interconectadas, este processo será significativo, resultando numa dispersão de um determinado contaminante através de um volume cada vez maior ao longo da direcção do fluxo.

A difusão é um fenómeno derivado da dispersão e consiste num movimento gradual de partículas de um determinado líquido devido ao gradiente de concentração entre duas regiões vizinhas, de uma região de alta concentração para uma região com baixa concentração. A difusão causa principalmente uma desaceleração na migração do fluido e uma diminuição da sua concentração. Para além disto, é um fenómeno que só tem importância maioritariamente em velocidades mais baixas e pode ocorrer mesmo se o fluido estiver estanque (devido ao movimento ser induzido principalmente sob a influência do gradiente de concentração), o que no caso de meios porosos ocorre com grande impacto devido à baixa e constante velocidade de percolação do contaminante. No entanto, em alguns casos, os contaminantes difundem-se rapidamente das fraturas para a matriz rochosa pouco permeável. A difusão, de novo, para fora da matriz, entretanto, já poderá ocorrer ao longo de décadas ou séculos, e a matriz torna-se efetivamente um reservatório de contaminante a longo prazo (NASEM, 2015).

Este fenómeno também é importante para a avaliação do risco de contaminação de um aquífero, isto porque pode ser considerado um processo de atenuação natural, pois atenuará a taxa na qual os contaminantes migram na direcção do fluxo, removendo volume de contaminante do fluxo na fratura e retardando assim o avanço de contaminantes ao longo desta. Este retardo resultante da difusão do contaminante na matriz durante a advecção ao longo da fratura é causado pela perda de contaminante das fraturas dominadas pela advecção para a matriz (GOLUBEV & GARIBYANTS, 1971; TANG et al., 1981; SUDICKY & FRIND, 1982; VANDERKWAAK & SUDICKY, 1996). Embora as fraturas menos permeáveis possam não contribuir significativamente para o volume do fluxo de água subterrânea, os contaminantes vão migrar destas para caminhos mais permeáveis devido à difusão e à advecção lenta. Aplicando todas as características enumeradas anteriormente para cada mecanismo de transporte de contaminante, pode-se definir qual o comportamento do contaminante dependendo do meio onde está inserido, como se encontra ilustrado na

Figura 2.14. Ora, neste exemplo teórico existe uma fonte de contaminante à superfície de um nível de solo (meio poroso), que se encontra sobrejacente a uma rocha fraturada (meio fraturado).

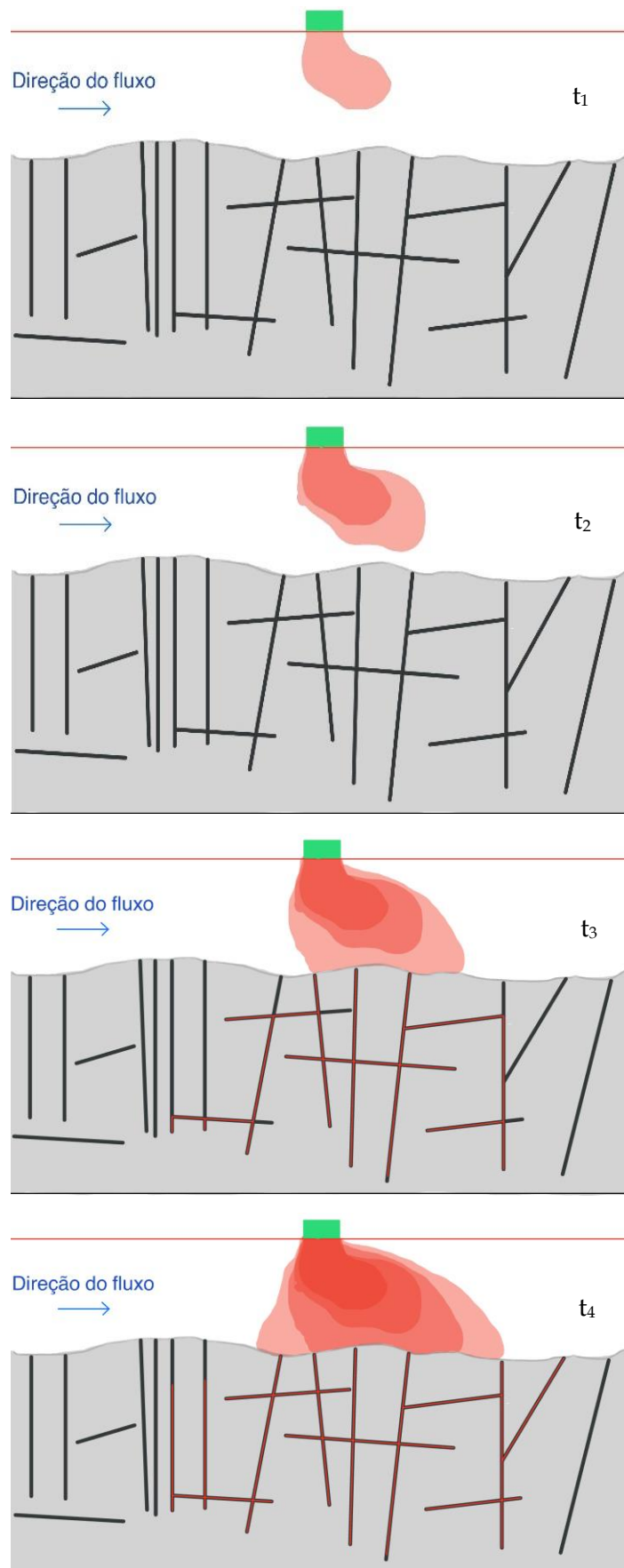


Figura 2.14 - Esquematização da evolução de um contaminante em meio poroso e em meio fraturado ao longo do tempo (t_1 , t_2 , t_3 e t_4) a partir de uma fonte à superfície (assumindo que não há fluxo no meio fraturado)

No início da sua evolução (t_1), o contaminante encontra-se apenas a percolar em meio poroso, originando uma pluma que se dispersa a uma velocidade relativamente constante e a favor da direção preferencial do fluxo no meio. Posteriormente, e enquanto o contaminante percola somente em meio poroso (t_2), a pluma continua com uma direção concordante com a do fluxo de água subterrânea. Para além disto, a pluma aumenta de tamanho existindo uma maior concentração no seu interior do que na interface pluma-solo devido aos fenómenos de atenuação natural. Durante todo o tempo em que a contaminação se concentra apenas em meio poroso contínuo, os principais mecanismos de transporte serão a advecção (a uma velocidade lenta e constante) e a difusão que vai desacelerar a migração da pluma como consequência da sua atenuação.

Com a interseção da pluma na rocha fraturada (t_3), vai existir uma alteração no comportamento da contaminação, pois as características do tipo de transporte vão variar com a entrada do contaminante noutra meio. A advecção que até agora ocorria a uma velocidade baixa e constante, com a existência de uma matriz rochosa constituída por caminhos preferenciais de percolação (fraturas), a sua velocidade torna-se variável. No caso do contaminante penetrar numa fratura, a sua velocidade vai aumentar ou diminuir consoante as características dos parâmetros que a constituem. No caso da fratura se apresentar sem preenchimento, aberta e sem rugosidades, a velocidade vai aumentar comparativamente à situação observada quando a pluma apenas se encontrava em meio poroso.

Para além disto, há um mecanismo de transporte que vai desempenhar um papel importante na evolução da contaminação, sendo ele a dispersão. No caso do meio poroso, como se trata de um meio globalmente homogêneo e isotrópico, a dispersão é praticamente inexistente (com a exceção de existirem algumas heterogeneidades no meio que possam alterar este equilíbrio). No entanto, ao existirem fraturas que variam em termos de orientação, persistência, espaçamento, etc. vão ser introduzidos elementos que vão levar à dispersão do contaminante ao longo do meio. Este é um fator determinante no que toca a estudos de avaliação da contaminação numa área pois independentemente da localização da fonte, se existirem fraturas com características favoráveis à dispersão da pluma, a contaminação pode afetar uma área bastante superior ao esperado. De notar que na grande maioria dos casos, a contaminação não segue estritamente a direção do fluxo do meio quando se encontra em meio fraturado.

Contrariamente aos outros dois mecanismos anteriormente referidos, a difusão é aquele que vai ser menos significativo na evolução da contaminação no meio fraturado comparativamente ao meio poroso onde previamente se encontrava inserido. Tal ocorre devido a dois fatores importantes: o primeiro devido à velocidade de percolação do contaminante que vai ser elevada quando se movimenta pelas fraturas, tornando a difusão não tão eficaz como no meio poroso; o segundo deve-se ao facto da matriz rochosa ter uma porosidade bastante baixa, principalmente quando comparada com um solo, tornando o processo de difusão menos eficaz.

Com a permanente injeção de contaminante a partir da fonte, a pluma continuará a aumentar e a interseccionar cada vez mais fraturas (t_4) e conseqüentemente a percolar de forma heterogénea pela área contaminada. Se a fonte cessar, a pluma ficará estagnada e a contaminação poderá começar a diminuir a sua concentração devido à atenuação natural, principalmente em meio poroso. No caso do maciço fraturado, independentemente da interrupção da contaminação do local, devido a oscilações do nível freático, o contaminante poderá interseccionar outras fraturas que outrora não conseguia atingir e continuar o seu percurso ao longo da área contaminada.

2.2.3.3. Contaminação de LNAPL em meios contínuos - porosos

O comportamento de LNAPL em meios contínuos ou porosos, será diferente do que acontece nos meios descontínuos ou fraturados, afetando a forma como se deverá abordar a contaminação, conforme o meio em que esta se encontra inserida. Quando há derrame de LNAPL no solo, este circula em profundidade devido à força gravítica, movendo-se através dos poros na zona não saturada. A contaminação segue o caminho que oferece menor resistência, preferencialmente movendo-se a favor do gradiente para qualquer espaço vazio, ou seja, que esteja apenas ocupado por ar.

As partículas de água presentes nos poros de maiores dimensões podem ser deslocadas por meio de partículas de LNAPL que migram por entre estes, mas a água presente nas áreas com poros de tamanho mais reduzido, vai se fixar fortemente devido às forças capilares, impedindo a migração da contaminação para estes poros menores. Alguma desta contaminação que migra em profundidade na zona não saturada fica retida nos vazios do solo, deixando para trás um rasto de partículas de LNAPL desde a superfície.

Se for derramado contaminante suficiente, as partículas irão eventualmente atingir o nível freático, onde os espaços entre as partículas de solo se encontram preenchidas por água. Numa fase inicial, o LNAPL não é capaz de transferir a água para fora dos vazios na zona saturada devido ao facto de ser menos denso, e a sua migração fica interrompida temporariamente como resposta à força capilar imposta. No entanto, se a quantidade de LNAPL a entrar no solo continuar a aumentar e a migrar para lá do nível freático, a sua massa coletiva eventualmente tornar-se-á grande o suficiente para criar uma força gravitacional que supera a força capilar oposta (pressão de entrada nos poros), deixando entrar algum contaminante nos poros, deslocando parte da água neles contida, como está ilustrado na Figura 2.15. Este fenómeno continuará a ocorrer e em maior escala à medida que mais contaminante penetra na zona saturada do solo (EOEEA, 2016).

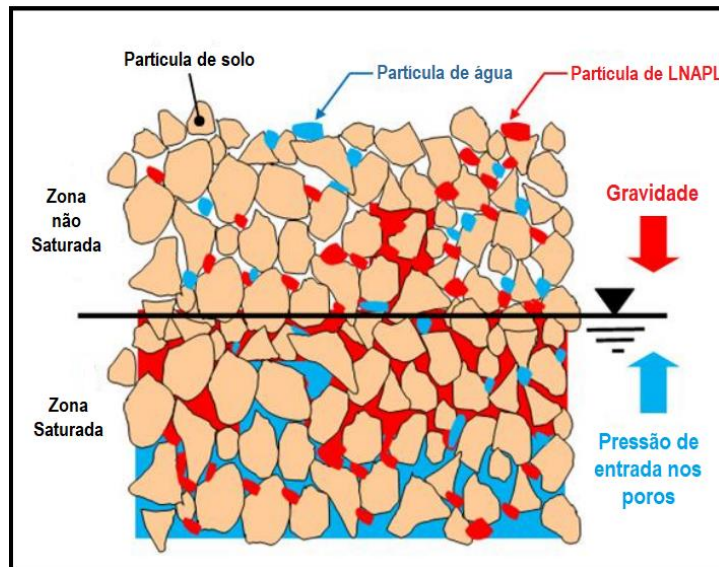


Figura 2.15 - Esquema representativo do comportamento do LNAPL em meio contínuo (adaptado de EOEAA (2016))

Durante um período de 1 a 2 anos, a uma macroescala, se o derrame de LNAPL for interrompido, a contaminação entra num estado de quase equilíbrio, ou seja, deixará de se estender vertical e lateralmente pelo meio, salvo exceções onde existam caminhos de fluxo preferenciais. Não obstante, a uma escala local, poderá haver pequenas flutuações devido ao movimento do nível freático. Assim, apesar de a uma escala maior a pluma de contaminação se apresentar estável, poderá exibir um comportamento móvel a uma escala menor (EOEEA, 2016).

2.2.3.4. Contaminação de LNAPL em meio descontínuo - fraturado

Comparativamente ao meio poroso descrito no subcapítulo anterior, o meio descontínuo ou fraturado tem uma maior complexidade e, por conseguinte, a contaminação irá circular de modo distinto dentro do maciço dependendo do nível em que se encontra. Num maciço rochoso fraturado coexistem 2 tipos de meios: um meio fraturado (constituído pelas fraturas e outras discontinuidades do maciço) e um meio poroso (constituído essencialmente pela matriz do maciço). Este último possui uma maior porosidade e curta continuidade lateral, enquanto o meio fraturado é caracterizado por uma porosidade média baixa, mas uma grande continuidade lateral.

Como já foi referido anteriormente, quer a água subterrânea quer outros fluidos em profundidade, circulam ao longo das discontinuidades do maciço, e são as propriedades destas heterogeneidades que vão determinar quais as fraturas que vão contribuir para o fluxo preferencial, bem como o seu tipo e orientação. De acordo com a porosidade e permeabilidade quer das fraturas, quer da matriz, o maciço pode ser classificado como um meio puramente fraturado, um meio de porosidade dupla ou um meio heterogéneo (Figura 2.16).

Num meio puramente fraturado, a porosidade e a permeabilidade do maciço são dadas somente pelas fraturas, enquanto a matriz é impermeável; neste caso, o LNAPL irá circular apenas nas fraturas. Já num meio de porosidade dupla, tanto as fraturas como a matriz contribuem para o fluxo, apesar das fraturas serem os principais contribuintes. No caso do meio ser heterogêneo, as fraturas têm uma permeabilidade francamente baixa, podendo estar preenchidas por argila ou por um material siltoso.

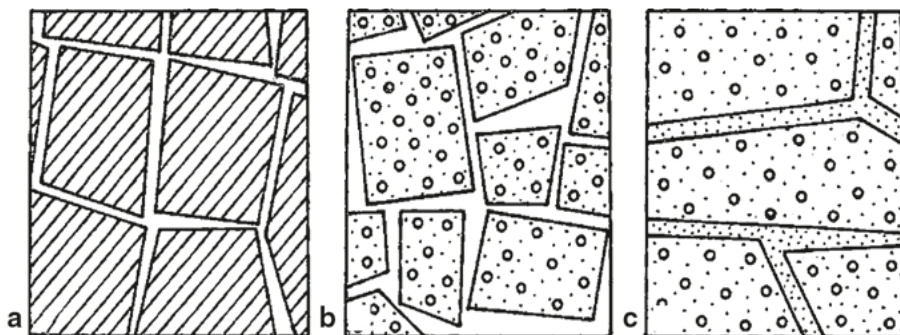


Figura 2.16 - Representação esquemática de um meio puramente fraturado (a), um meio com porosidade dupla (b), e um meio heterogêneo (c) (retirado de SINGHAL & GUPTA, 2010)

Os meios identificados podem também ser comparados a modelos de fluxo subterrâneo, em que existem equações matemáticas que descrevem como o fluxo se vai comportar dependendo do meio onde se encontra. Para esta dissertação não se adotou esta abordagem devido à falta de dados de parâmetros hidrogeológicos que só seriam possíveis de adquirir com recurso a ensaios *in situ* para determinação de propriedades como a permeabilidade, o grau de fraturação e de alteração do maciço. No entanto, não deixa de ser relevante a associação destes modelos para a construção de um modelo conceptual da área de estudo se existir um estudo posterior em que se determinem estes parâmetros.

De acordo com BERRYMAN & WANG (1995), reconhece-se que o meio de porosidade dupla se comporta como um meio de porosidade equivalente (MPE). Esta é uma abordagem simples que assume que a matriz rochosa, incluindo fraturas e redes de fraturas, pode ser representada por um meio poroso equivalente com uma condutividade hidráulica equivalente em todos os pontos numa determinada área (GHASEMIZADEH et al., 2015). Para além desta situação, aplica-se também o modelo MPE quando a densidade de fraturação é elevada ou a abertura das fraturas é constante e as orientações destas são bem distribuídas (em vez de constantes). Neste caso, a percolação de água subterrânea numa rede de fraturas muito extensa pode ser tratada como um meio contínuo equivalente e a condutividade hidráulica de um sistema pode ser descrito através da lei de Darcy (WOESSNER & POETER, 2020). Assim, podem se comparar meios com estas características com meios contínuos/porosos o que facilita a compreensão do comportamento hidrogeológico de cada formação, pois apesar de se considerar um meio fraturado, pode ter comportamento de meio poroso.

Em meios considerados como possuindo um comportamento poroso, como já foi referido, a condutividade hidráulica pode ser descrita através da lei de Darcy. A condutividade

hidráulica, em termos práticos, representa a facilidade com que um determinado fluido circula por entre um material poroso. Ora, este conceito é relevante para avaliar a contaminação de uma determinada área, e conseqüentemente em fases futuras, e planejar a sua remediação, pois vai quantificar em termos de distância que o contaminante consegue percorrer num determinado intervalo de tempo. Se o contaminante percolar facilmente no meio, é considerado como tendo uma condutividade hidráulica elevada; se o contaminante percolar de forma mais dificultada no meio, é considerado como possuindo uma condutividade hidráulica baixa. Naturalmente, este conceito está relacionado com a permeabilidade, sendo esta alta ou baixa, respetivamente. É de frisar que apesar de possuir unidades de velocidade (L/T), a condutividade hidráulica não é considerada uma velocidade, mas sim a representação das propriedades de transmissão do material poroso (WOESSNER & POETER, 2020). A equação que descreve a condutividade hidráulica (K) em meios que apresentam um comportamento típico de meio poroso é a seguinte:

$$K = -Q \frac{\Delta h}{\Delta LA} \quad (\text{Equação 5})$$

Aqui a condutividade hidráulica vai depender do caudal (Q) que está em L³/T, o gradiente hidráulico ($\frac{\Delta h}{\Delta L}$) que está em L, e da área da secção (A) que é expressa em L².

Em FREEZE & CHERRY (1979) foram estudadas e experimentadas as propriedades físicas do meio poroso correlacionáveis com a condutividade hidráulica, e desenvolveu-se a seguinte equação:

$$K = \frac{kg\rho}{\mu} \quad (\text{Equação 6})$$

Esta expressão relaciona propriedades do fluido como a sua densidade (ρ) em M/L³ (sendo M uma dada unidade de massa) e a sua viscosidade dinâmica (μ) em M/(LT), com a constante gravitacional (g) em L/T² e a permeabilidade intrínseca (k) que é dada em L². Esta equação facilita a determinação da condutividade hidráulica pois muitas vezes não se sabe ao certo o caudal, e nesta expressão apenas é necessário saber as propriedades do contaminante e a permeabilidade intrínseca que pode ser calculada da seguinte forma:

$$k = C \frac{\rho}{\mu} \quad (\text{Equação 7})$$

Nesta expressão, o valor C representa o coeficiente de permeabilidade, que pode ser conhecido através de ensaios de laboratório (em amostras indeformadas) ou *in situ*, ou pelo recurso a valores tabelados típicos da granulometria de cada meio, como os que se encontram expressos na Tabela 2-6.

Tabela 2-6 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade em cm/s de acordo com a granulometria do solo, de acordo com B. EVIRGEN & A. TUNCAN (2015)

Tipo de solo	k (cm/s)
Cascalho	1 - 100
Areia Grosseira	1 - 0,01
Areia Fina	0,01 - 10 ⁻⁴
Silte	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶
Argila	> 10 ⁻⁷

No espectro oposto identifica-se o meio puramente fraturado que corresponde a uma matriz impermeável, mas com fraturas; este pode ser associado ao modelo de rede de fraturas discretas (RFD). Neste modelo analisa-se cada fratura como um elemento discreto, portanto é uma abordagem mais complexa, e o comportamento hidráulico é em função da abertura, comprimento, densidade, orientação, conectividade e material de preenchimento de cada fratura. É claro que este modelo exige um estudo mais detalhado do meio, sendo esta a sua principal desvantagem na utilização, mas em certas situações é necessário, tal como é o caso de rochas com algumas famílias de fraturas que contribuam para o fluxo de água subterrânea. Para além disto, não há garantia de que um modelo que reproduza as propriedades geométricas aparentes de uma rede de fraturas irá captar as suas características essenciais de fluxo ou transporte ou que se assemelhem ao máximo à realidade.

Da mesma forma que os meios porosos, a condutividade hidráulica em meios fraturados pode ser descrito através de equações. Na verdade, a condutividade hidráulica de uma rocha fraturada é dependente não só da condutividade hidráulica da sua matriz, como também do espaçamento entre fraturas, da sua abertura, rugosidade das paredes e da sua interconectividade. Como já foi referido, os maciços fraturados são tipicamente anisotrópicos devido às variações direcionais das fraturas. Em alguns casos, é bastante comum a condutividade hidráulica vertical ser superior à horizontal pois as fraturas praticamente verticais tendem a possuir uma abertura superior do que aquelas com uma inclinação mais baixa. Tal acontece porque as fraturas verticais não respondem à carga do material sobrejacente com mesmo nível que as fraturas horizontais ou mesmo com outras orientações (WOESSNER & POETER, 2020).

No caso dos meios puramente fraturados, a condutividade hidráulica da matriz é mínima, portanto considera-se apenas a condutividade hidráulica dada pelas fraturas. D. SNOW (1968) desenvolveu uma equação que estima a condutividade hidráulica equivalente (e permeabilidade intrínseca) de um meio em que esteja inserida uma família de fraturas paralelas:

$$K_{\text{família de fraturas}} = \frac{\rho g N b^3}{12 \mu} \quad (\text{Equação 7})$$

Aqui, a condutividade hidráulica equivalente (K) é dada em L/T, a abertura das fraturas é dada por L , a viscosidade do fluido (ρ) é dada em M/L³, a constante gravitacional (g) é em L/T², a viscosidade dinâmica (μ) é dada em M/(LT) e N corresponde ao número de fraturas

por unidade de distância num talude rochoso, ou seja, $N=1/\text{espaçamento médio entre as fraturas da família}$, dada em L. Já a permeabilidade intrínseca (k) em L^2 é dada por:

$$k_{\text{família de fraturas}} = \frac{Nb^3}{12} \quad (\text{Equação 8})$$

2.3. Metodologia

Ao longo deste estudo vão ser detalhados todos os passos da metodologia adotada para atingir os objetivos previamente descritos. Como foi referido anteriormente, a dissertação de L. FERREIRA (2015) foi uma importante referência para efetuar a caracterização do maciço rochoso em análise, no que toca aos métodos utilizados. A razão por que foi adaptada a metodologia deste trabalho é que, contrariamente aos outros casos de estudo encontrados, apenas foram utilizadas técnicas que se adequavam à situação em estudo. Ora, não existe informação detalhada sobre as fraturas na área de estudo, nem resultados de ensaios geotécnicos, o que significa que qualquer tentativa de compreender o comportamento geotécnico do maciço *in situ* seria impossível. Desta forma, recorreu-se à recolha bibliográfica de toda a informação existente sobre a formação em estudo, e aos resultados derivados de trabalhos de campo efetuados nas proximidades da área de estudo.

A forma como inicialmente se decidiu abordar este problema foi como um estudo geológico-geotécnico convencional da formação alvo, ou seja, começar por reunir toda a informação preexistente disponível sobre a litologia, hidrogeologia, geomorfologia e tectónica do local. Assim, obtém-se um conhecimento geral da área de estudo e o que esperar do comportamento do maciço quando analisado mais detalhadamente. É nesta fase também que se determinaram os potenciais locais onde vão ser efetuados os trabalhos de campo, efetuando um reconhecimento prévio a cada um deles, antes de se dar início à próxima etapa. Antes do início desta fase também se acompanharam, em contexto de estágio, trabalhos efetuados na área de estudo, de forma a compreender o arranjo de cada nível do CVL e a posição do nível freático no local.

Posteriormente, é importante realizarem-se trabalhos de campo para não só confirmar a informação previamente recolhida, como estudar a rocha a uma escala local. Neste caso realça-se a importância de efetuar o levantamento das discontinuidades existentes no maciço e de determinar certas características geomecânicas essenciais para a elaboração do modelo conceptual. Para além disto, é pertinente o trabalho de laboratório de forma a complementar o máximo possível as observações do campo. Nesta fase de trabalhos de campo e laboratório é onde poderão ocorrer dificuldades, nomeadamente no levantamento das discontinuidades no campo, isto porque como se está em ambiente urbano, a existência de afloramentos de boa qualidade e acessíveis é escassa. Por esta razão tem de se procurar nas periferias da zona urbana por taludes de estrada ou em zonas descampadas por afloramentos que reúnam as características exigidas para este estudo.

Após os trabalhos de campo e de laboratório, é possível associar as diferentes rochas pertencentes à unidade geológica estudada em cada local, com os níveis amostrados no local em estudo, de acordo com a sua semelhança em termos de características constituintes (textura, cor, grau de alteração, litologia, porosidade, resistência...). O que esta metodologia pretende determinar são as propriedades do maciço na área de estudo, correspondendo às que lhe são semelhantes em afloramentos nas suas proximidades. Para tal, pretendeu-se realizar uma análise mais completa estando a falar-se na caracterização de um volume representativo do maciço em vez de um testemunho de sondagem, que apenas reflete uma pequena porção de rocha.

De modo a complementar esta avaliação, os procedimentos laboratoriais e *in situ*, vão fornecer informação preciosa sobre o comportamento do material rocha, algo que não consegue ser averiguado somente pela observação visual no campo. Estando efetuada a associação, a fase seguinte é a determinação do comportamento do fluxo subterrâneo em cada nível do maciço rochoso, visto que cada um tem um comportamento hidrogeológico distinto, como se verá mais adiante. A delimitação dos diferentes meios constituintes do maciço fraturado vai permitir avaliar da melhor forma a evolução da contaminação ao explicar as condições hidrogeológicas de cada meio onde esta se encontra inserida.

Por fim, caracterizados cada um dos meios no maciço fraturado consoante a forma como a contaminação poderá evoluir e qual será a sua movimentação dentro do maciço, obtém-se todas as ferramentas necessárias para a construção do modelo conceptual. A partir daqui o modelo poderá ter várias utilidades de acordo com a finalidade ou fase em que se encontra o projeto, podendo-se dividir o volume analisado entre tipos de maciço fraturado ou por níveis. Com isto, a avaliação será efetuada com uma maior qualidade pois ter-se-á uma maior compreensão de como a contaminação irá evoluir em profundidade e, conseqüentemente, qual a melhor estratégia a adotar aquando da sua remediação.

Em termos de resultados esperados, é previsto adquirir-se uma base de dados sobre o maciço rochoso, relativos às suas características geomecânicas e a sua variação em profundidade e lateralmente. Também se espera determinar os parâmetros relativos às descontinuidades inseridas no maciço perto da área de estudo. Por consequência, ir-se-á obter um modelo geológico da área de estudo onde está ilustrado de forma simplificada todas as informações recolhidas que dizem respeito ao caso de estudo. Esta abordagem pode então ser replicada para outras áreas com características semelhantes à da área de estudo em termos do posicionamento dos diferentes níveis do complexo.

ENQUADRAMENTO DA FORMAÇÃO EM ESTUDO - CVL

3.1. Enquadramento Geológico

A área de estudo encontra-se inserida no Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL), mais concretamente no seu extremo sul. Esta extensa formação com cerca de 200 km² faz parte de um dos episódios de magmatismo mais relevantes que acompanhou a abertura do Atlântico Norte, e abrange diversos concelhos vizinhos de Lisboa, estendendo-se até Torres Vedras e Arruda dos Vinhos (MATOS ALVES et al., 1980). Esta unidade engloba diferentes tipos de estruturas (chaminés, escoadas, soleiras, diques, ...) que se encontram visivelmente degradadas e de rochas (basaltos, piroclastos, brechas, traquitos, ...), sendo que predominantemente se encontram basaltos, como se pode observar na Figura 3.1.

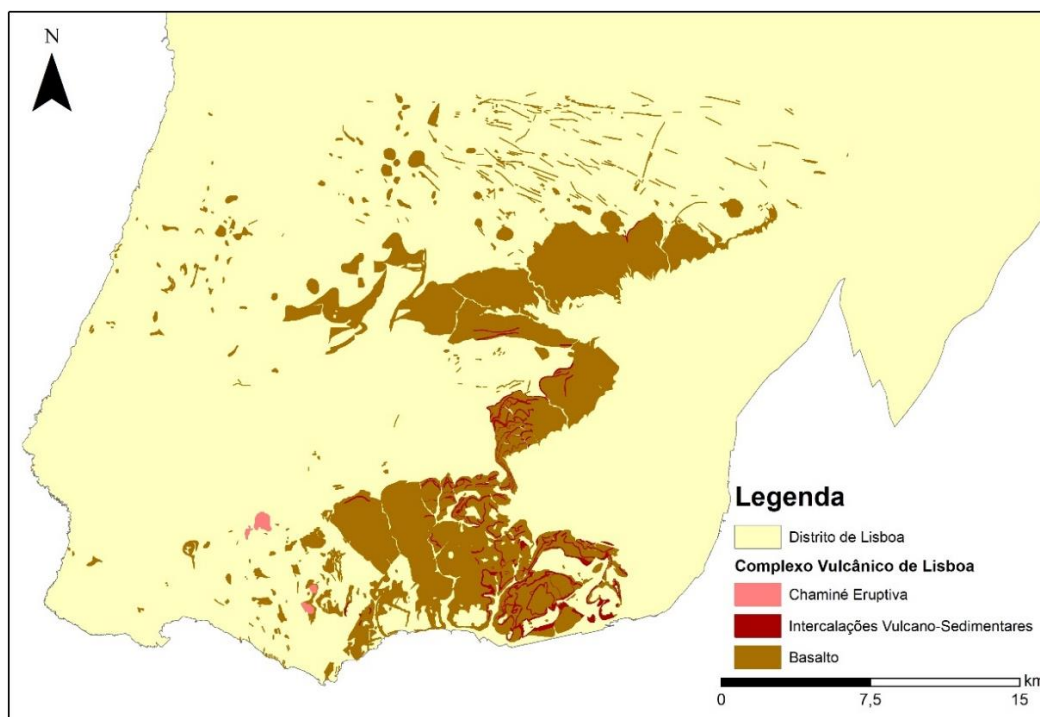


Figura 3.1 - Enquadramento Geológico do Complexo Vulcânico de Lisboa

Genericamente, o CVL caracteriza-se por cerca de seis mantos lávicos separados por uma sucessão de níveis de materiais piroclásticos, expelidos durante fases explosivas (tufos, brechas vulcânicas, aglomerados, ...) e que se associam a depósitos de argilas e conglomerados basálticos originários de escoadas lávicas, durante fases efusivas (ALMEIDA et al., 2017). O tipo de vulcanismo é maioritariamente efusivo e de ambiente subaéreo, estando os produtos piroclásticos em menor percentagem. Este nível do CVL faz parte das intercalações vulcano-sedimentares que correspondem aos materiais provenientes da atividade explosiva deste episódio magmático, constituído essencialmente por cinzas e *lapili* intercalados entre escoadas basálticas. Estas intercalações apresentam-se normalmente muito alteradas, não consolidadas e de cores avermelhadas e arroxeadas. Relativamente à sua espessura esta é relativamente pequena, compreendendo-se entre alguns centímetros e poucos metros (PAIS et al., 2006).

Este complexo vulcânico instalou-se sobre os calcários do Cretácico pré-existentes nesta zona, dando origem a uma superfície relativamente irregular (ALMEIDA, 1991). Consequentemente possui espessuras francamente diversas, quer se esteja a falar de escoadas lávicas, como também de produtos piroclásticos, variando entre centenas e escassos metros (RAMALHO et al., 2001).

3.2. Enquadramento Estrutural e Tectónico

Entre os 7 e os 100 Ma (milhões de anos), ocorreram, do ponto de vista tectónico, três eventos de grande importância para a região de Lisboa: o primeiro, há cerca de 72 Ma (no Cretácico Superior), um evento tectono-magmático, durante o qual se instalaram, principalmente, as lavas do CVL. O segundo, terá ocorrido há cerca de 30 Ma (entre o Eocénico e o Oligocénico), durante o qual se depositaram os sedimentos continentais detríticos do Complexo de Benfica. Por fim, o terceiro foi um evento tectónico neogénico, provavelmente entre os 7 e os 2 Ma, durante o qual a região da oriental de Lisboa se terá elevado de cotas altimétricas próximas do nível do mar até às que atualmente atinge. Do primeiro evento tectónico referido, Lisboa regista quase exclusivamente, lavas e piroclastos do CVL, cujos aparelhos alimentadores se situariam, crê-se, na região da atual serra de Sintra e, eventualmente, na região de Loures (RIBEIRO et al., 2017).

O CVL encontra-se disposto segundo uma estrutura monoclinal com uma ligeira inclinação para Sul e que acompanha as camadas cretácicas e os mantos lávicos. Os relevos basálticos, fortemente alterados e parcialmente obliterados, evidenciam a ação de um conjunto de fenómenos erosivos (naturais e antrópicos) que terão contribuído para a existência pontual e descontínua de morfologias típicas de terrenos vulcânicos e para a formação de paleossolos (SERRALHEIRO, 1978). A região da área de estudo apresenta-se assim como uma zona de relevos bem definidos, sobre formações meso-cenozoicas, onde se podem verificar diversas falhas e rochas eruptivas correspondentes ao CVL que recortam esta paisagem (PAIS et al., 2006).

Os centros emissores mais importantes, que correspondem na sua generalidade a chaminés vulcânicas, encontram-se ainda hoje bem visíveis em diversos locais, frequentemente alinhados segundo direções WNW-ESE e NW-SE (KULLBERG & KULLBERG, 2000). Trata-se de um vulcanismo tipicamente alcalino, intraplaca continental (MATOS ALVES et al., 1980). Os magmas primários, resultantes de pequena percentagem de fusão do manto superior, deram origem aos basaltos. Após cristalização fracionada e, em menor escala, assimilação crustal do soco, formaram-se as rochas mais diferenciadas (PALÁCIOS, 1986).

3.3. Enquadramento Hidrogeológico

Relativamente à hidrogeologia, a zona onde aflora o Complexo Vulcânico de Lisboa, insere-se na unidade hidrogeológica da Orla Ocidental Indiferenciada, não tendo sido identificado qualquer sistema aquífero, como consta na Figura 3.2.

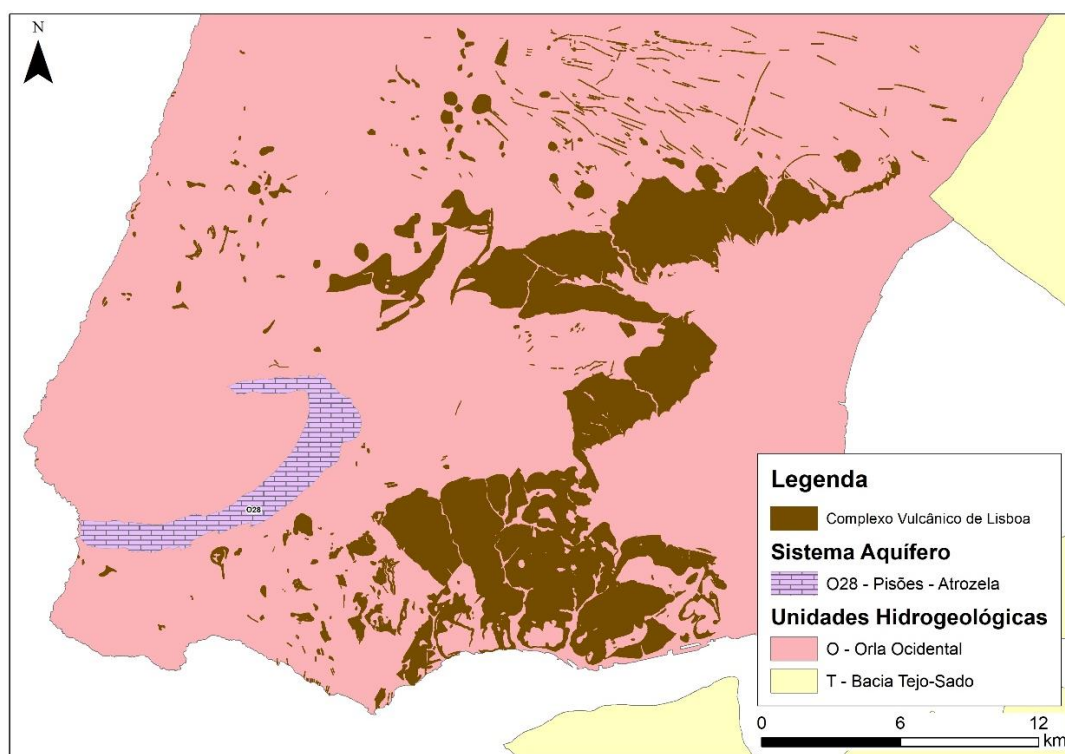


Figura 3.2 - Enquadramento Hidrogeológico do Complexo Vulcânico de Lisboa

De forma geral, a permeabilidade das formações do CVL é média a baixa, isto porque, perante um maciço rochoso, só haverá circulação de água através das fraturas do mesmo, ou por outras descontinuidades. No entanto, localmente, existem diversas variações que podem fazer com que a permeabilidade do CVL aumente ou diminua consoante a diferente zona do maciço, ou seja, nos níveis de piroclastos alterados e nos basaltos mais decompostos ou em maior profundidade nas zonas onde ocorrem camadas de rocha sã. Logo, é imperativo saber a variação do grau de alteração e fraturação do maciço para aferir os valores de permeabilidade do maciço.

Como averiguado anteriormente, superficialmente, os materiais estão mais alterados e decompostos, sendo eles os depósitos de piroclastos, que vão formar um meio poroso. Sob estes, encontram-se os materiais provenientes de escoadas lávicas como os basaltos e brechas vulcânicas, podendo tornar o comportamento hidrogeológico mais complexo. Em profundidade, onde se encontra maioritariamente basalto de melhor qualidade, a permeabilidade vai depender quase exclusivamente da rede de fraturação.

De acordo com observações efetuadas em piezómetros instalados no local, o nível freático próximo da área de estudo encontra-se estabilizado em torno dos 10 m de profundidade, ao nível das formações rochosas do CVL, circulando a água, essencialmente, em meio fraturado.

TRABALHOS DE CAMPO

4.1. Trabalhos na área de estudo

Esta dissertação teve origem no contexto de estágio na *Egiamb*, e foi baseado num projeto adjudicado a esta empresa por uma entidade externa possuidora de instalações onde se verificaram indícios de contaminação por hidrocarbonetos de petróleo. No âmbito da avaliação da contaminação dos solos e das águas subterrâneas foram efetuados trabalhos de investigação *in situ* compreendendo a execução de sondagens e amostragem nos dois meios afetados. Como tal, no decurso do estágio, foram acompanhados alguns trabalhos no local em estudo e feita a recolha de dados que vieram a integrar o trabalho de campo efetuado neste estágio, de modo a obter uma descrição das amostras correspondentes ao CVL que lá aflora, a monitorização do nível da água e do produto em fase livre (LNAPL) nos vários piezómetros instalados no local e bem como a análise da sua variação ao longo do período de estudo. Em termos de trabalho de gabinete, analisou-se ainda a variação dos valores da precipitação ocorrida durante o tempo que decorreu o estudo, pois esta influenciará quaisquer oscilações do nível freático.

4.1.1. Descrição das sondagens efetuadas no local

Para ser possível uma boa descrição e avaliação da formação em análise, efetuaram-se sondagens à rotação com recolha de amostra, de forma que esta preservasse ao máximo a sua integridade e as fraturas que a constituem. Assim, foi possível individualizar dois tipos de sucessões da formação em estudo que, do ponto de vista geológico-geotécnico, de cima para baixo, foram caracterizados da seguinte forma (Figura 4.1):

- Piroclastos consolidados, alterados a muito alterados, de tons castanhos avermelhados a esbranquiçados, por vezes com impregnações carbonatadas ou intercalações de brechas e/ou basalto vesicular. Podem também ocorrer em passagens mais superficiais níveis argilo-siltosos castanho-avermelhadas com fragmentos de basalto cinzento-esverdeado. Esta camada apresenta uma espessura que varia de 3,5 m a 7,5 m.

- Brecha vulcânica constituída por basalto vesicular impregnado numa matriz argiloso-siltosa avermelhada, alterada na parte superior da camada, com cerca de 1,5 m de espessura média. Inferiormente encontra-se basalto, de tom cinzento-escuro, cinzento-acastanhado a cinzento-esverdeado, com veios e fraturas preenchidas por materiais de natureza carbonatada/calcítica. Este encontra-se num estado muito alterado adquirindo um aspeto areno-siltoso e argilo-arenoso (W_{4-5}), ora medianamente alterado (W_3) e com fraturas próximas a muito próximas (F_{4-5}), passando em profundidade para medianamente afastadas (F_3).



Figura 4.1 - Testemunhos de sondagem correspondentes ao nível dos piroclastos (a) e ao nível das brechas vulcânicas e basaltos (b)

De forma a classificar o maciço de acordo com a sua qualidade e assim avaliar com maior rigor o mesmo do ponto de vista geotécnico, é importante determinar o RQD (*Rock Quality Index*). Para tal, recorreu-se aos valores de RQD determinados a partir dos tarolos de sondagem recuperados, tendo-se obtido um RQD médio de 36%, valor que permite classificar globalmente o maciço como de fraca qualidade.

É possível também verificar que existe fraturação sub-horizontal persistente, muito provavelmente acompanhando planos de “estratificação”. Estes planos são cortados verticalmente e obliquamente por redes de fraturação complexa, que imprimem ao maciço o aspeto de pequenos blocos rochosos semi-ortogonais.

4.1.2. Variação do nível freático na área de estudo

Como foi explicado previamente, as oscilações do nível da água em profundidade, vão influenciar diretamente a posição da contaminação no maciço. No caso em estudo foram construídos 10 piezômetros de 12m a 15m ao longo da área e, mensalmente, foram registadas as variações do nível freático e nível de contaminante (LNAPL).

Na Tabela 4-1 encontram-se os resultados dos meses relativos ao período em estudo. Desde o início do estudo até ao mês de janeiro há uma subida geral do nível freático, refletindo os períodos chuvosos característicos dos três últimos meses do ano. Assim, as cotas do nível da água e consequentemente do contaminante, serão mais altas. De referir que alguns piezômetros não têm um comportamento concordante com os restantes na área, como é o caso do PZ08 que se mantém relativamente a uma cota constante durante todo o ano, e o PZ02 cujo nível freático parece variar de forma independente da pluviosidade.

Desde janeiro até maio de 2023, globalmente o nível de água em toda a área de estudo desceu até maiores profundidades, o que representa diretamente a pouca precipitação que ocorreu nesses meses. No mês seguinte apenas se refletiu uma pequena subida do nível freático nos piezômetros PZ04 e PZ04-02, talvez pelo facto de ter havido precipitação suficiente para existir esta pequena alteração. Desde este mês até ao fim do período de estudo, o nível freático continuou a diminuir como reflexo dos meses quentes que passaram.

De notar que apenas nos últimos dois meses do ano, o nível de LNAPL não teve o mesmo comportamento que o nível freático, isto porque com o decorrer do período de estudo e do projeto houve a remoção deste contaminante dos piezômetros. No mês de agosto houve uma maior extração no PZ04 o que levou a que o contaminante não acompanhasse ao mesmo tempo a subida do nível freático e no mês de setembro o contaminante no PZ04 e no PZ04-02 recuperou ao ponto de aumentar em cota mesmo com a descida do nível freático.

Tabela 4-1 - Resultados das medições efetuadas desde outubro de 2022 até setembro de 2023 nos piezômetros da área de estudo

	Piezómetro	PZ01	PZ02	PZ03	PZ04	PZ04-02	PZ05	PZ06	PZ08	PZ09
Nível de Água (m)	Outubro de 2022	9,63	5,81	10,50	10,08	9,52	11,84	13,31	12,03	10,51
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,79	6,74	11,77	12,90	-	9,53
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	3,29	2,78	0,07	0,41	-	0,98
Nível de Água (m)	Novembro de 2022	9,40	5,72	10,28	8,19	6,48	11,71	12,82	12,03	10,04
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,23	6,25	11,66	12,51	-	9,24
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	1,96	0,23	0,05	0,31	-	0,80
Nível de Água (m)	Dezembro de 2022	8,83	5,54	8,93	8,32	5,87	11,62	12,43	12,03	9,15
Nível de Óleo (m)		-	-	-	5,27	5,58	11,56	11,74	-	8,40
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	3,05	0,29	0,06	0,69	-	0,75
Nível de Água (m)		8,78	5,66	9,67	4,98	4,89	11,18	9,09	11,14	7,38

Nível de Óleo (m)	Janeiro de 2023	-	-	-	4,92	4,81	11,16	8,67	-	6,70
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	0,06	0,08	0,02	0,42	-	0,68
Nível de Água (m)	Fevereiro de 2023	8,97	5,92	9,84	5,93	6,71	11,42	10,36	12,03	8,10
Nível de Óleo (m)		-	-	-	5,68	6,02	11,4	9,92	-	7,53
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	0,25	0,69	0,02	0,44	-	0,57
Nível de Água (m)	Março de 2023	9,12	5,87	9,99	6,70	6,49	11,6	11,36	12,02	8,65
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,00	5,88	11,59	10,77	-	7,96
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	0,70	0,61	0,01	0,59	-	0,69
Nível de Água (m)	Abril de 2023	9,13	5,89	9,99	8,09	7,70	11,71	11,96	12,02	8,96
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,13	6,07	11,70	11,37	-	8,22
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	1,96	1,63	0,01	0,59	-	0,74
Nível de Água (m)	Maio de 2023	9,38	5,91	10,25	7,02	7,83	11,83	12,34	12,03	9,24
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,61	6,81	11,80	11,81	-	8,51
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	0,41	1,02	0,03	0,53	-	0,73
Nível de Água (m)	Junho de 2023	9,49	5,93	10,36	6,92	7,34	11,92	12,48	12,04	9,33
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,26	6,11	11,80	11,81	-	8,60
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	0,66	1,23	0,12	0,67	-	0,73
Nível de Água (m)	Julho de 2023	9,55	5,89	10,43	7,20	7,58	12,61	11,79	12,00	9,34
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,79	6,59	12,20	11,77	-	8,61
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	0,41	0,99	0,41	0,02	-	0,73
Nível de Água (m)	Agosto de 2023	9,68	5,90	10,54	8,73	8,48	11,88	12,91	12,00	9,43
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,76	6,64	11,86	12,48	-	8,69
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	1,97	1,84	0,02	0,43	-	0,74
Nível de Água (m)	Setembro de 2023	9,68	5,62	10,55	7,81	7,03	11,94	13,08	12,00	9,35
Nível de Óleo (m)		-	-	-	6,80	6,83	11,88	12,60	-	8,61
Espessura Fase Livre (m)		-	-	-	1,01	0,20	0,06	0,48	-	0,74

Em adição a esta monitorização mensal, foram registados os dados relativos à pluviosidade mensal relativos à estação meteorológica Lisboa/Gago Coutinho (579). Estes valores de precipitação vão ser bastante relevantes pois, em meses mais chuvosos, o nível freático tenderá a aumentar com a entrada de grandes volumes de água no solo/rocha. Já nos meses secos, a tendência do nível da água é a diminuir pois, com o aumento da temperatura, a água tenderá a evaporar e não havendo reposição da mesma através da pluviosidade, a água vai se fixar em maiores profundidades.

A Figura 4.2 ilustra essa mesma variação sazonal da precipitação durante o período de estudo e é possível observar com clareza que os meses mais chuvosos do ano compreendem os meses de setembro até janeiro e os meses mais secos vão desde fevereiro até agosto. Observa-se então que há uma variação sazonal notável, desde meses muito chuvosos como de-

zembro, até meses completamente secos como julho e agosto. Estas mudanças abruptas e oscilações mensais vão justificar, em parte, as variações em profundidade do nível freático e, conseqüentemente, do contaminante sobrenadante o que reforça a importância de averiguar qual será o comportamento do contaminante em cada nível do CVL.

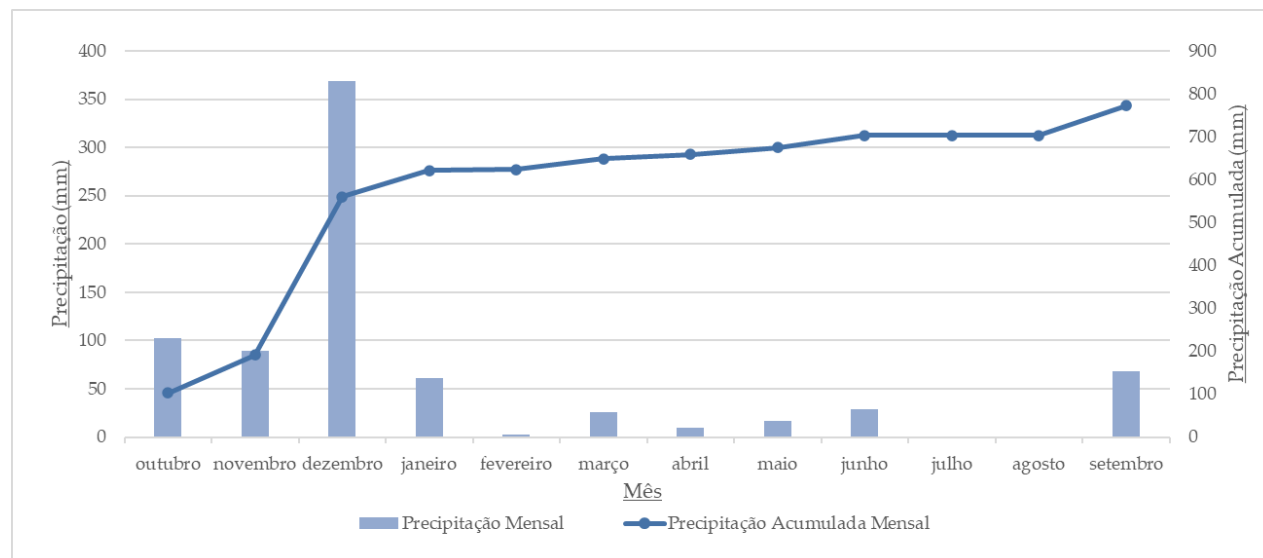


Figura 4.2 - Registo dos valores da precipitação mensal e mensal acumulada desde outubro de 2022 até setembro de 2023

4.2. Trabalhos em afloramentos perto da área de estudo

Como já foi referido em capítulos anteriores, realizaram-se trabalhos de campo para um melhor reconhecimento do CVL. Esta etapa tem como finalidade caracterizar os dois elementos que constituem o maciço fraturado: o material rocha que o constitui e as discontinuidades nele contidas. Para a avaliação da rocha, recorreu-se à elaboração de ensaios *in situ* e de laboratório (com amostras recolhidas em alguns pontos no campo). Já para a análise das discontinuidades recorreu-se ao levantamento dos parâmetros que as caracterizam através do método da *scanline*.

A área de estudo encontra-se inserida num meio urbano, ou seja, encontram-se poucos locais onde seja possível fazer uma observação direta a um talude e que este esteja em bom estado de conservação. Como seria de esperar, a área de estudo não é exceção, não havendo afloramentos adequados ao levantamento em toda a zona. A única forma de contornar esta adversidade foi procurar taludes relativamente perto do local em estudo onde aflorasse a mesma unidade geológica da área de estudo e com características adequadas, por exemplo zonas descampadas, taludes de estrada, frentes de antigas pedreiras, ...

Para o efeito, fez-se um estudo de gabinete para averiguar quais os locais que poderiam apresentar frentes de qualidade para se poder efetuar esses mesmos trabalhos. Para tal, recorreu-se à bibliografia disponível onde havia referências a locais que cumprissem os requisitos desejados, ou seja, que não só se localizassem na área de estudo ou nas suas proximidades,

como também a rocha aflorante pertencesse ao Complexo Vulcânico de Lisboa, e que este não se encontrasse altamente degradado ou coberto de vegetação de forma que fosse possível observá-lo e estudá-lo.

Com base nas mesmas exigências recorreram-se a ferramentas de fotografia aérea e mapas, nomeadamente o *Google Earth* para se descobrirem locais que pudessem conter frentes adequadas para os trabalhos de campo. Posteriormente compilaram-se os locais encontrados quer através de fontes bibliográficas, quer por ferramentas digitais, no *Google Earth* e obteve-se o mapa da Figura 4.3.

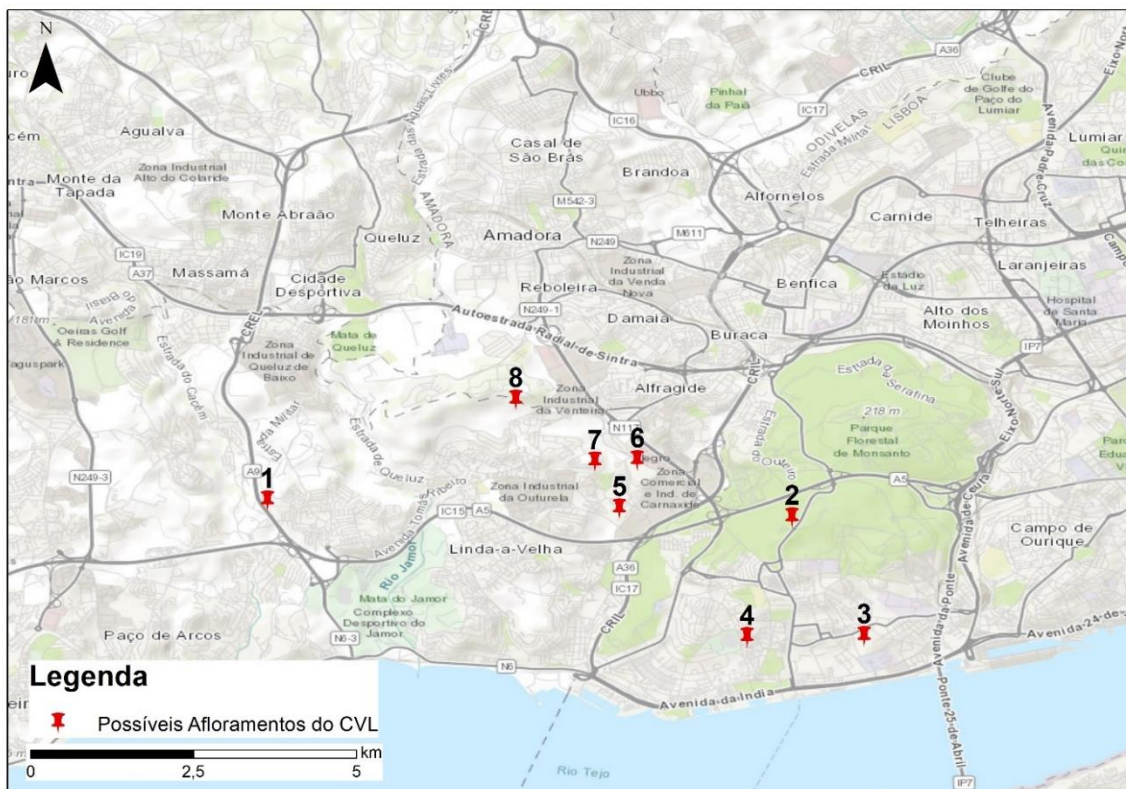


Figura 4.3 - Localização de possíveis afloramentos do CVL na região próxima à área de estudo

Após um reconhecimento inicial de todos os locais enumerados anteriormente, reduziram-se os 8 possíveis afloramentos a apenas 3. Este reconhecimento consistiu numa visita de reconhecimento a cada sítio para averiguar se cada um cumpria os seguintes requisitos:

- No local aflora o Complexo Vulcânico de Lisboa;
- No local é possível ter acesso direto ao afloramento;
- No local o afloramento não se encontra coberto por vegetação, solo, aterros ou outros materiais que impedem ter uma vista clara do maciço para o seu estudo.

Assim, os 3 pontos que apresentaram estas características são os pontos 3, 6 e 7. Nos capítulos seguintes apresenta-se uma descrição dos trabalhos de campo efetuados nos pontos referidos previamente, bem como os seus resultados em termos de levantamento das descontinuidades, ensaios *in situ* e ensaios de laboratório.

4.2.1. Ponto 3 - Geomonumento da Rua Aliança Operária

A primeira paragem dos trabalhos de campo foi no Complexo Desportivo da Boa-Hora em Lisboa, onde está inserido o geomonumento número 6 do concelho de Lisboa denominado de “Geomonumento da Rua Aliança Operária”. Neste local aflora o Complexo Vulcânico de Lisboa, nomeadamente material rochoso pertencente ao episódio efusivo, consistindo em colunas de basalto proveniente de escoadas lávicas.

O afloramento encontra-se em bom estado de conservação, conseguindo observar-se fraturação do mesmo em quase toda a sua extensão, como se pode confirmar na Figura 4.4. Apesar da sua condição, o facto de ter uma rede metálica de contenção tornou difícil a medição da atitude das fraturas. Para além disto, existiam locais com bastante vegetação que cobria algumas zonas do afloramento, impedindo o levantamento de descontinuidades do mesmo nesses locais. O afloramento em questão tem uma orientação nordeste-sudoeste e apresenta uma extensão de cerca de 90 m e uma altura que varia progressivamente de 16 m a 10 m de nordeste para sudoeste. Neste local houve recolha de amostras da superfície do afloramento para o ensaio da determinação da porosidade.



Figura 4.4 - Vista geral do Afloramento da Rua Aliança Operária

Primeiramente efetuou-se uma análise geral de todo o afloramento, onde se observou que o maciço aparenta possuir 3 famílias de fraturas, como se pode observar na Figura 4.5 que se repetem de forma quase regular ao longo de todo o maciço: duas famílias subverticais e uma subhorizontal. As famílias subverticais representam o comportamento típico das formações de natureza basáltica, ou seja, em disjunção colunar. A disjunção colunar, ou disjunção

prismática, é a designação dada às formações constituídas por grandes prismas de rocha separadas por diaclases paralelas que se formam como resultado das tensões que se geram durante o arrefecimento das escoadas lávicas, sendo exclusivas das rochas ígneas do tipo vulcânico e subvulcânico (MY BRAIN, 2019).



Figura 4.5 - Famílias de fraturas existentes no afloramento do Ponto 3, a vermelho e a azul as famílias subverticais e a laranja a família subhorizontal

De notar que neste local apenas foram possíveis caracterizar 24 descontinuidades, isto porque, como em outros locais, a existência da rede metálica complicou bastante o processo, para além de que uma grande porção no centro do afloramento, possuía uma vegetação relativamente densa, o que impediu o levantamento de descontinuidades nessa zona. Acrescenta-se ainda que devido ao facto das descontinuidades subhorizontais se encontrarem a uma cota muito elevada, não foi possível a sua caracterização. Não obstante, vão ser tomadas em conta, apesar de os valores atribuídos serem estimativas derivadas da observação no campo, em fotografias no local e ferramentas digitais como o *Google Earth*. A *scanline* efetuada possui um comprimento de 20 m, uma altura de cerca de 1,50 m e uma orientação horizontal, paralela ao afloramento (nordeste - sudoeste). Analisando cada família de fraturas individualmente, pode-se verificar que cada uma delas tem um comportamento distinto, como se pode confirmar nos parágrafos seguintes.

4.2.1.1. Resultados - Famílias subverticais

Orientação

De uma forma geral, estas discontinuidades são as que mais se destacam perante as subhorizontais, e com base nas características deste tipo de formação descritas previamente, nomeadamente o facto de se tratar de uma disjunção colunar, em afloramento destacam-se duas famílias com inclinações opostas, delimitando uma coluna de basalto lávico. Após completados os trabalhos de campo e ter-se averiguado a orientação de cada discontinuidade através do método da *scanline*, foram colocados os dados do campo no *software Dips*, de forma a agrupar as fraturas em famílias e determinar a sua atitude média.

Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.6 e, como seria de esperar, existem duas famílias subverticais com direções semelhantes, mas com inclinações em sentido oposto, uma para oeste (família 1) e outra para este (família 2). A família 1 é aquela que possui uma maior inclinação, em média 85° W, e encontram-se inseridas 17 fraturas. Já a família 2 caracteriza-se por uma inclinação inferior à primeira, em média de 43°E, e nela estão contidas 7 fraturas. Note-se que 3 fraturas não foram incluídas em nenhuma família, podendo pertencer a uma terceira família subvertical, mas que não teve expressão suficiente nesta amostragem para ser alvo de caracterização como uma família.

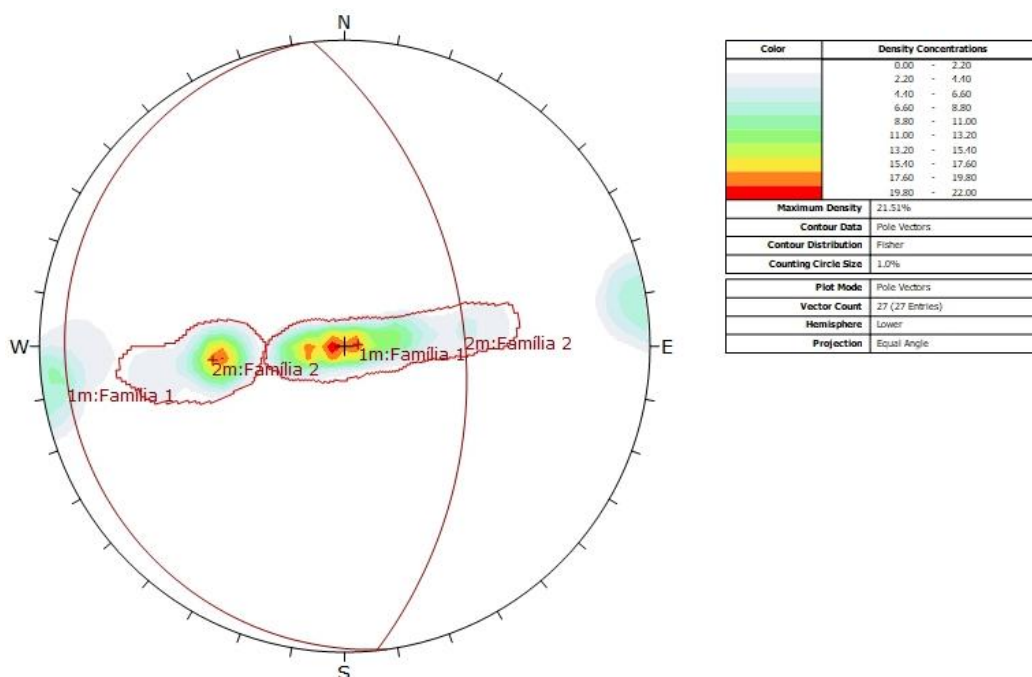


Figura 4.6 - Representação gráfica dos polos e famílias relativas às discontinuidades levantadas no ponto 3 (elaborada com recurso ao *software Dips*)

De uma perspetiva hidrogeológica e considerando apenas estes resultados, pode-se concluir que, se existir circulação de contaminantes pelas fraturas das duas famílias, estes irão fluir do topo até ao fundo do maciço numa trajetória praticamente vertical, migrando pela área de estudo somente em profundidade.

De agora em diante os parâmetros averiguados a cada descontinuidade serão avaliados de acordo com a família em que estas se encontram inseridas e efetuar-se-á uma apreciação global do comportamento das duas famílias no meio fraturado.

Espaçamento

Quanto ao espaçamento entre fraturas caracterizado para este ponto na família 1, este variou entre 0,2 e 3,77 m, e recorrendo à Tabela 2-1, conseguiu-se agrupar estas descontinuidades em 4 classes como se pode observar na Figura 4.7. De frisar que, devido ao facto de existirem duas famílias diferentes de descontinuidades, a medição deste parâmetro foi efetuada apenas entre fraturas da mesma família.

Averiguou-se que não existem fraturas definidas como “Extremamente Pouco Espaçadas”, “Muito Pouco Espaçadas” e “Pouco Espaçadas” e a maior parte destas caracterizam-se como “Espaçadas”, não desprezando as descontinuidades denominadas como estando “Extremamente Espaçadas” que representam 23% de toda a amostragem.

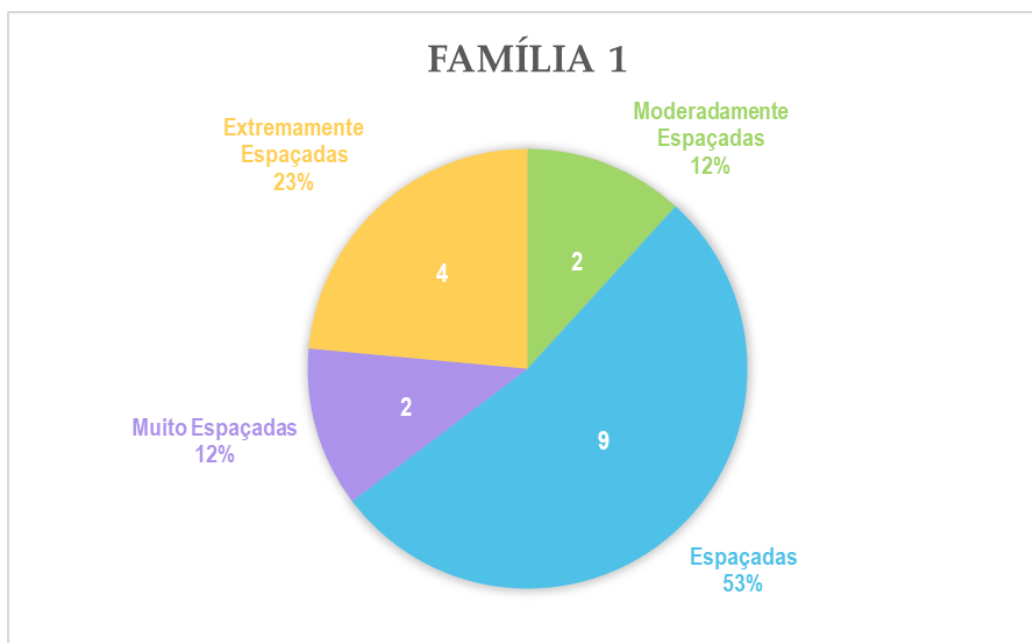


Figura 4.7 - Gráfico relativo ao espaçamento entre descontinuidades da família 1 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Relativamente ao espaçamento entre fraturas da família 2, este foi um pouco diferente daquele caracterizado na família 1. Com o recurso à Tabela 2-1, dividiram-se as sete descontinuidades em 3 classes como se pode observar na Figura 4.8 variando entre 0,71 m e 3,94 m.

Com base na análise dos dados, determinou-se que não existem fraturas definidas como “Extremamente Pouco Espaçadas”, “Muito Pouco Espaçadas”, “Pouco Espaçadas” e “Moderadamente Espaçadas”. Praticamente existe o mesmo número de fraturas para cada classe, sendo que a única com mais de três fraturas associadas é a categoria “Muito Espaçadas”, e as restantes 4 fraturas dividem-se igualmente em “Espaçadas” e “Extremamente Espaçadas”.

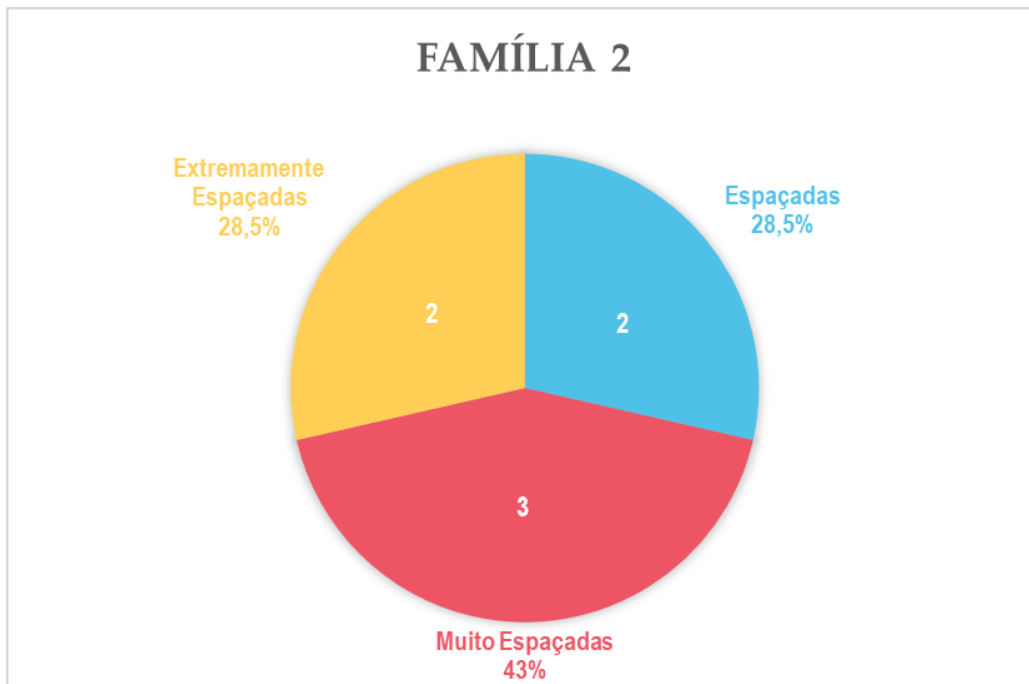


Figura 4.8 - Gráfico relativo ao espaçamento entre descontinuidades da família 2 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

O que se pode afirmar relativamente ao comportamento de um possível contaminante com base nos resultados obtidos neste parâmetro nas duas famílias, é que no caso da primeira, a densidade de fraturação é média a baixa. Como tal, existem apenas alguns caminhos condutores de contaminantes, o que poderá formar redes de fluxo de contaminante por dentro da rocha, transportando a contaminação a vários pontos do maciço. Comparativamente há família 2, a densidade de fraturação é mais baixa, pois globalmente as fraturas encontram-se mais espaçadas que na família anterior, portanto existirão poucos caminhos condutores de contaminantes que poderão formar redes de fluxo de contaminante.

Persistência

No caso da persistência das descontinuidades, em diversas situações foi impossível medi-la de forma assertiva, pois as fraturas estendiam-se até praticamente à altura do maciço. Neste caso recorreu-se a ferramentas digitais, como o *Google Earth*, para determinar a altura do afloramento em cada local de recolha de medições. Assim, apesar de não ser preciso, conseguiu chegar-se a um valor representativo da persistência de cada descontinuidade que se estendia para lá do que era possível medir com a fita métrica.

As classes de persistência em que se agruparam cada uma das descontinuidades da família 1, correspondem às mesmas definidas na Tabela 2-2, sendo que o valor mais baixo medido foi 1,75 m de extensão da fratura, e o valor mais alto foi 13 m. Assim, obteve-se o gráfico da Figura 4.9, em que se pode observar que apenas 2 das 5 classes de persistência se enquadraram nas medições efetuadas.

A classe de persistência “Alta” é sem dúvida a dominante na zona de estudo, representando mais de 80% das descontinuidades amostradas desta família. De notar que as fraturas inseridas nesta classe são as que têm uma extensão igual à altura do talude (entre 10 m e 20 m) e as restantes três descontinuidades foram classificadas como possuindo uma persistência “Baixa”.

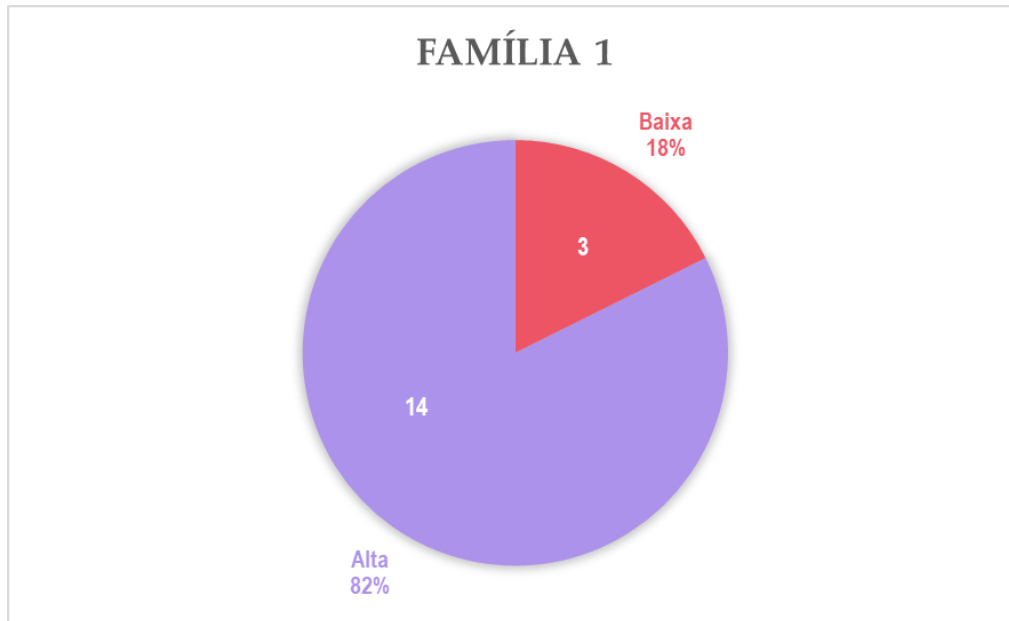


Figura 4.9 - Gráfico relativo à persistência das descontinuidades da família 1 do ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Em termos da persistência das sete descontinuidades da família 2, as classes em que se agruparam cada uma das descontinuidades correspondem às mesmas definidas na Tabela 2-2, sendo que o valor mais baixo medido foi 2,08 m de extensão da fratura, e o valor mais alto foi 13 m. Assim, obteve-se o gráfico da Figura 4.10, em que se pode observar que apenas duas classes se enquadraram nas medições efetuadas.

Da mesma forma que na família 1, a classe de persistência “Alta” é a predominante, representando mais de 85% das descontinuidades amostradas desta família, correspondendo às descontinuidades que têm uma extensão igual à altura do talude (entre 10 m e 20 m) e apenas uma descontinuidade foi considerada como possuindo uma persistência “Baixa”.

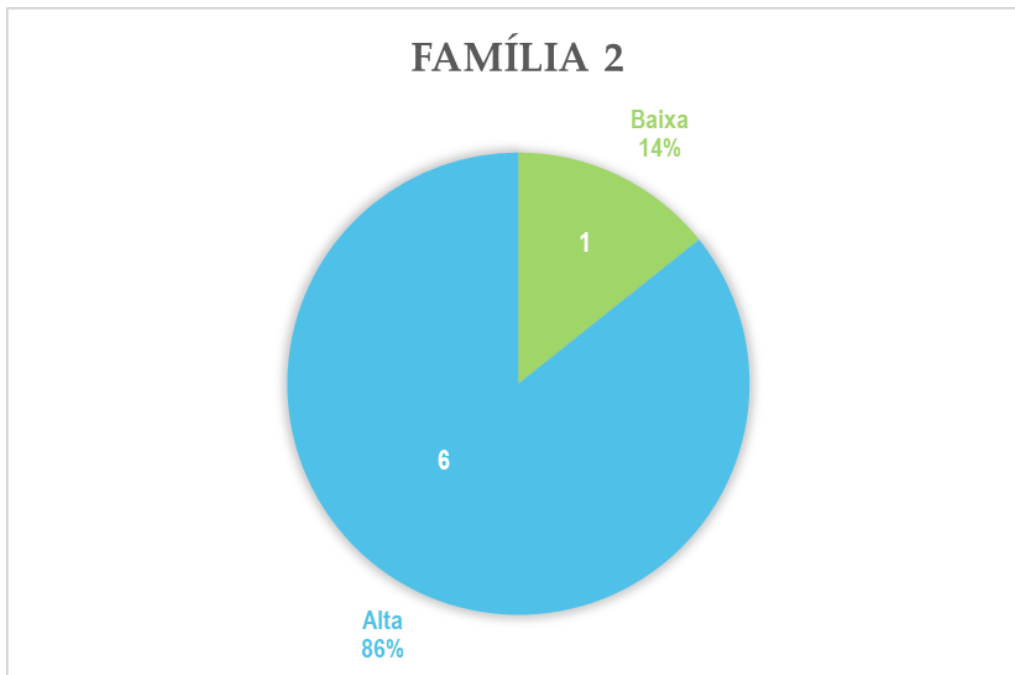


Figura 4.10 - Gráfico relativo à persistência das descontinuidades da família 2 do ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Relativamente à problemática em estudo, é possível concluir que as duas famílias são muito semelhantes no que toca a este parâmetro, portanto o seu comportamento igualmente o será. Assim, a probabilidade das fraturas das duas famílias se intersetarem e formarem redes de fraturas onde pode circular contaminante por entre elas é alta pois a persistência também o é, aumentando a possível área de contacto entre as restantes fraturas do maciço.

Rugosidade

Quanto à rugosidade das paredes das fraturas, recorreu-se ao perfil tipo da Figura 2.7 para avaliar este parâmetro, e sendo uma classificação qualitativa, os resultados vão depender bastante da interpretação do técnico de campo. Como a grande maioria das descontinuidades apresentava uma extensão elevada, a rugosidade variava consoante o ponto onde estava a *scanline* posicionada, assim, optou-se por classificar a zona menos rugosa observada ao longo da fratura, estando do lado da segurança pois será a situação que facilitará mais o fluxo de contaminantes,

Os resultados obtidos relativos à família 1 encontram-se expressos na Figura 4.11, e verifica-se que, de todos os parâmetros relativos a este local, é o que apresenta um maior número de classes (oito), sendo uma característica extremamente variável ao longo do afloramento.

Assim sendo, o valor de rugosidade mais frequente corresponde a uma rugosidade de 6 - 8, seguido de uma rugosidade de 2 - 4, o que em termos percentuais representa 17% e 35% respetivamente.

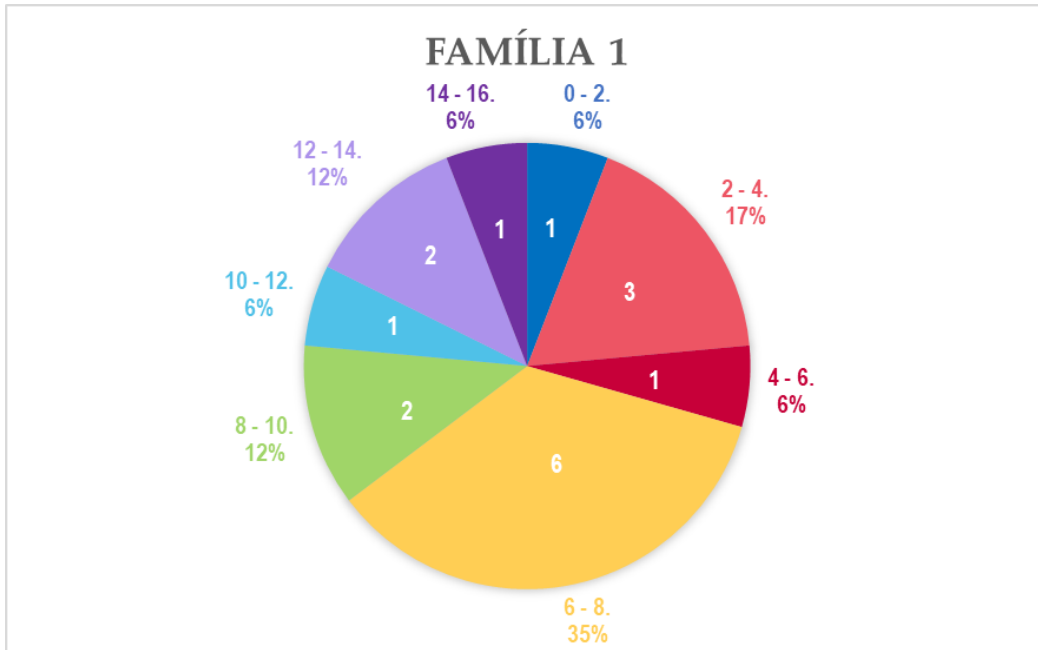


Figura 4.11 - Gráfico relativo à rugosidade das descontinuidades da família 1 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Contrariamente à família anterior, a rugosidade da família 2 é mais uniforme. Os resultados obtidos encontram-se expressos na Figura 4.12, e verifica-se que os valores recolhidos apenas se inserem em 2 classes (2 - 4 e 6 - 8) e com percentagens semelhantes (57% e 43% respetivamente).

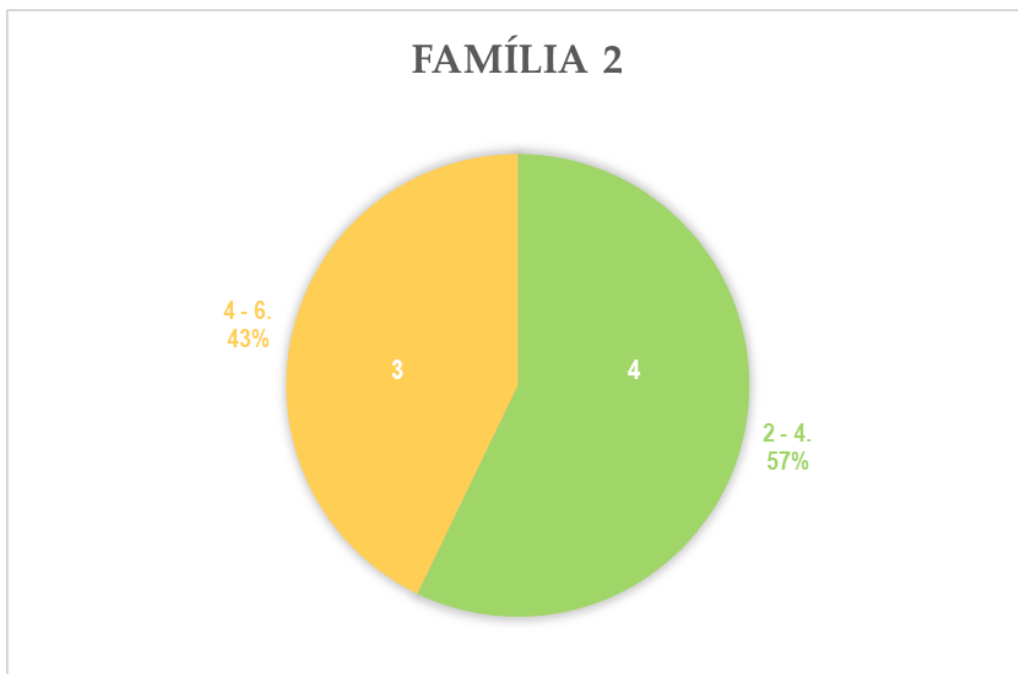


Figura 4.12 - Gráfico relativo à rugosidade das descontinuidades da família 2 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

A rugosidade varia francamente entre as duas famílias e conseqüentemente o comportamento face à circulação de contaminante irá ser igualmente distinto. Ora do ponto de vista hidrogeológico, na família 1 existe um número considerável de fraturas que possuem valores altos de rugosidade, o que leva conseqüentemente a uma velocidade mais baixa de fluxo do contaminante, apesar das fraturas mais lisas também terem a sua dominância. Já na família 2 os valores de rugosidade são mais homogêneos e baixos, o que leva conseqüentemente a uma velocidade mais elevada de fluxo do contaminante, por estas se apresentarem mais lisas e sem atritos que possam diminuir a sua velocidade.

Abertura

Da mesma forma que na rugosidade se adotou o valor mais baixo do perfil de rugosidades como o característico de cada descontinuidade, na abertura fez-se o mesmo procedimento devido à variabilidade deste parâmetro ao longo da fratura, ou seja, para estar do lado da segurança assumiu-se o valor de abertura mais elevado para caracterizar cada fratura. Como esta abordagem é mais conservadora, poderá levar à sobrevalorização do risco, algo que se deve ter em conta. Neste local, a abertura das fraturas da família 1 era relativamente uniforme e com base nas classes definidas na Tabela 2-3 foi possível agrupar os valores de abertura das fraturas medidos de todas as dezassete fraturas da família 1 em quatro classes distintas, onde as medições de abertura variam entre 0,2 e 9 cm.

Observando o gráfico da Figura 4.13, verifica-se que mais de três quartos das mesmas se classificam como “Muito Amplas” e as restantes possuem valores de abertura relativamente elevados.

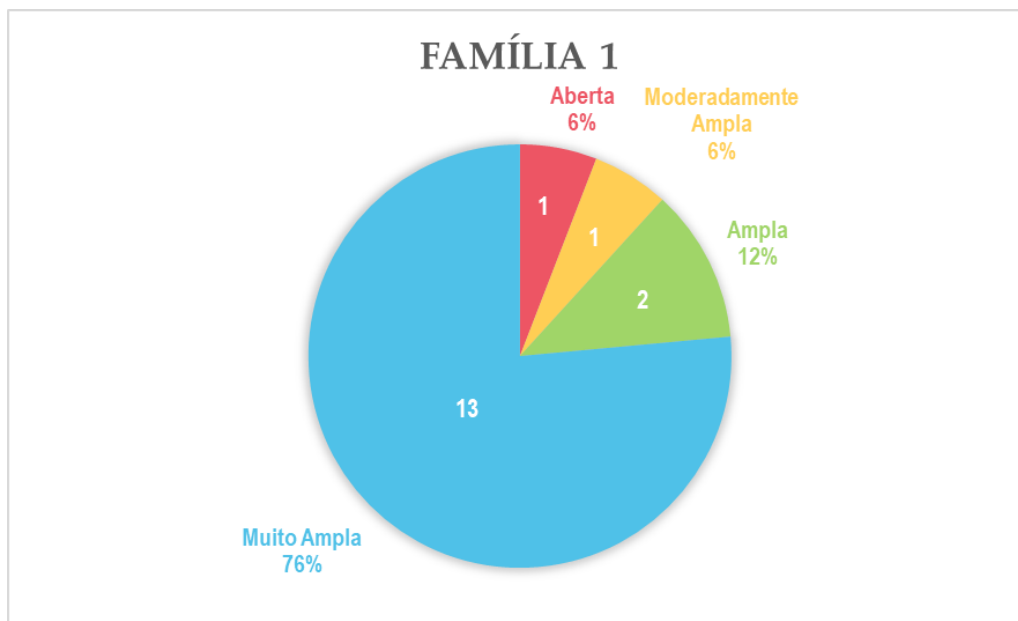


Figura 4.13 - Gráfico relativo à abertura das descontinuidades da família 1 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

No caso da família 2, com base nas classes definidas na Tabela 2-3 todas as sete fraturas caracterizadas nesta família, se classificaram como possuindo uma abertura "Muito Ampla" das paredes das fraturas, variando entre 1,7 e 5 cm. O gráfico obtido relativo a esta característica das descontinuidades na família 2 encontra-se ilustrado na Figura 4.14.

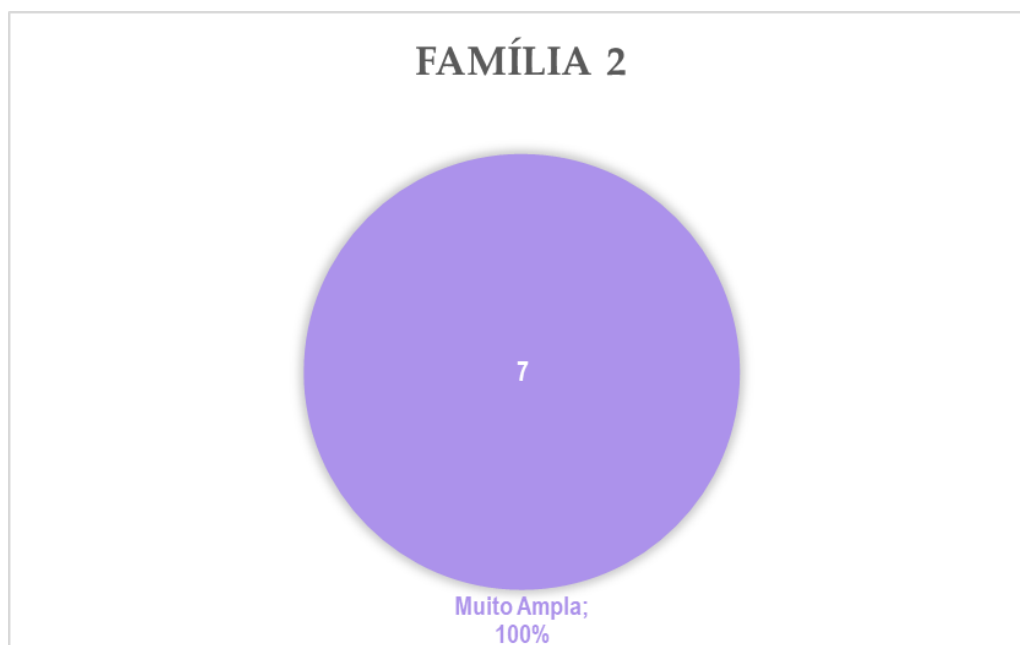


Figura 4.14 - Gráfico relativo à abertura das descontinuidades da família 2 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respectiva percentagem

Ainda que tenham sido encontradas apenas fraturas com valores pertencentes a uma abertura das paredes considerada "Muito Ampla" na família 2, esta é também a classe que se encontra em maior representação na família 1. Portanto pode-se considerar que as duas são relativamente semelhantes no que diz respeito a este parâmetro, com a família 1 poder ter tendência possuir fraturas com uma abertura das paredes menor.

Em termos hidrogeológicos, se apenas se tiver em consideração este parâmetro, a capacidade de fluxo nas descontinuidades nas duas famílias vai ser elevada, principalmente na família 2, devido ao facto de possuir exclusivamente fraturas com uma abertura considerada "Muito Ampla".

Preenchimento

O parâmetro que mais distingue estas duas famílias é sem dúvida a existência de preenchimento, e que vai ser determinante na circulação de contaminante. Relativamente à família 1, não foi encontrado preenchimento em praticamente nenhuma das fraturas, como se pode verificar na Figura 4.15, em que apenas seis das descontinuidades intersectadas pela *scanline* possuíam preenchimento.

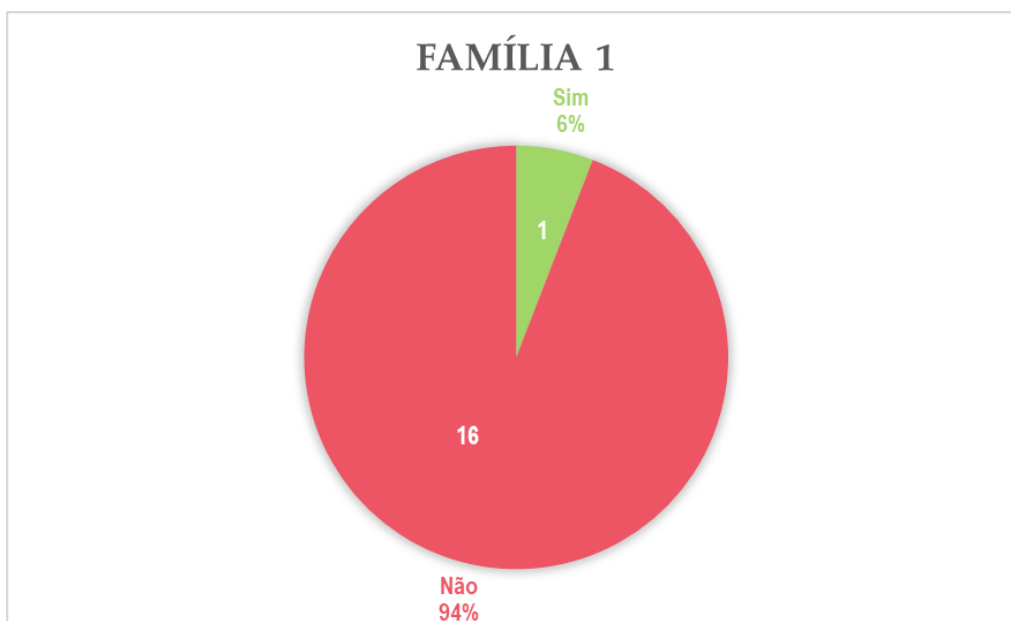


Figura 4.15 - Gráfico relativo ao preenchimento das descontinuidades na família 1 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Contrariamente ao que acontece na família 1, foi encontrado preenchimento em praticamente todas as fraturas recolhidas, como se pode verificar na Figura 4.16, em que apenas uma das descontinuidades intersestadas pela *scanline* não possuía preenchimento.

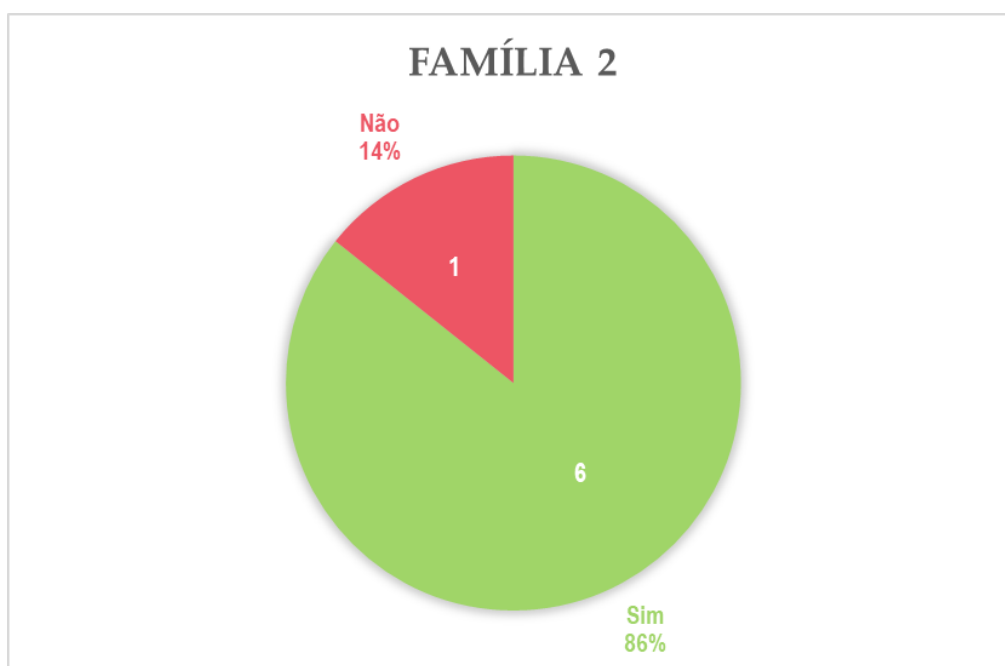


Figura 4.16 - Gráfico relativo ao preenchimento das descontinuidades na família 2 no ponto 3, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Focando apenas nas fraturas com preenchimento, este apresentava-se como um cimento consolidado, de cor esbranquiçada com alguns pedaços de rocha, aparentando ser algum tipo

de carbonato que, em reação com os minerais constituintes da lava proveniente de um episódio efusivo, tenha incorporado outros componentes, como o caso do ferro. Em algumas zonas o enchimento tinha tons avermelhados devido à possível oxidação do mesmo em certos locais do afloramento, confirmando com o facto de que quando estas tonalidades apareciam, as paredes das fraturas encontravam-se meteorizadas e com as mesmas cores vermelhas acastanhadas, como se pode verificar na Figura 4.17.



Figura 4.17 - Fraturas subverticais com enchimento no ponto 3

Devido à dificuldade de acesso direto ao maciço em várias zonas do afloramento, não foram recolhidas amostras deste cimento, apesar de este ser bastante resistente, quase equiparando-se ao próprio material rocha. A dúvida permanece se a origem deste preenchimento é carbonatada e se tal for o caso, implica que este material seja reativo na presença de qualquer substância com pH baixo, considerado ácido.

Assim sendo, relativamente à problemática em estudo, na família 1 a maioria das fraturas apresentam-se sem preenchimento, contrariamente às da família 2 que possuem um cimento de origem carbonatada entre as suas paredes. Se o cimento em análise for algum tipo de carbonato e consoante a quantidade de carbono existente na sua constituição, fluidos com pH ácido irão reagir com o cimento, dissolvendo-o. Caso o cimento não possua estas características, não irá reagir com os fluidos circulantes, vai servir como "tampão" e interromper o seu percurso devido à sua elevada resistência e inércia. Desta forma as fraturas da primeira família terão a capacidade de fazer com que o contaminante circule por entre as suas paredes e no caso do enchimento encontrado nas fraturas da família 2 não ser de origem carbonatada, a sua movimentação será impedida.

4.2.1.2. Resultados - Família subhorizontal

No que diz respeito à família subhorizontal, como se referiu anteriormente, não foi possível a realização de medições precisas e determinação dos parâmetros das descontinuidades recorrendo aos métodos utilizados na família subvertical. No entanto, através da observação direta e com recurso a fotografias tiradas no local conseguiu-se chegar a algumas conclusões. Note-se que se assumiu todas as fraturas analisadas como pertencendo à mesma família, dada a semelhança de propriedades que a caracterizam como a orientação e o espaçamento.

Orientação

Primeiramente admitiu-se que a família possui uma direção subhorizontal e uma inclinação média de 25° SW. Estes valores aferiram-se através da medição da orientação de uma descontinuidade que se encontrava a uma cota mais baixa, com extrapolação para as restantes.

No que diz respeito à problemática em estudo, conclui-se que o fluxo de contaminante dar-se-á subperpendicularmente à altura do maciço, o que permitirá ao mesmo circular entre vários pontos da área de estudo longitudinalmente, dispersando a contaminação (se esta chegar a atingir estas fraturas). Portanto, apesar de não haver circulação de contaminante até profundidades consideráveis, poderá haver o transporte dos contaminantes para diversas zonas da área de estudo onde inicialmente não havia contaminação.

Espaçamento

Quanto ao espaçamento, pode-se afirmar que todas possuem valores muito semelhantes entre si, e com recurso a fotografias e à observação direta no maciço, determinou-se que o espaçamento médio entre as fraturas subhorizontais varia entre 30 e 50 cm, o que de acordo com as classes definidas na Tabela 2-1, insere estes valores na classe “Moderadamente Espaçadas”.

Do ponto de vista hidrogeológico muito provavelmente estas descontinuidades poderão interseccionar outras de uma família diferente, neste caso a subvertical, e formar uma rede de fluxo de contaminante, que irá transportar o mesmo longitudinalmente, podendo chegar a vários pontos da área de estudo.

Persistência

Contrariamente às famílias subverticais, a família subhorizontal possui fraturas com uma extensão muito irregular e na ordem dos cm (inferior a 1 m), o que lhes confere uma extensão inferior às fraturas subverticais, e de acordo com os valores tabelados na Tabela 2-2, classifica-se a persistência desta família como sendo “Muito Baixa”. Isto porque como as fraturas subhorizontais estão delimitadas lateralmente pelas subverticais que destacam cada bloco de rocha, a sua persistência depende do espaçamento entre estas últimas.

Analisando os dados recolhidos, os valores de persistência são bastante favoráveis no contexto deste estudo, porque em teoria terão menos probabilidade de interseccionar outras fraturas e também o transporte longitudinal de contaminante será inferior. Não obstante, como todas as fraturas estão contidas dentro dos blocos de rocha formados pelas fraturas subverticais, independentemente da extensão das fraturas subhorizontais, estarão sempre ligadas às verticais, formando um caminho preferencial horizontal onde irá circular a contaminação de uma fratura subvertical para outra.

Rugosidade

A rugosidade das paredes das fraturas é claramente o parâmetro das discontinuidades que levou a maiores dificuldades na sua medição, isto porque como a sua determinação consiste na comparação de perfis-tipo com a rugosidade da discontinuidade no campo, estando à distância dificulta esta tarefa, especialmente porque a escala dos perfis é relativamente pequena. Deste modo, através da observação direta do maciço e pela análise de fotografias tiradas no local, concluiu-se que a rugosidade média das paredes das discontinuidades, de acordo com os perfis tipo da Figura 2.7, é 4-6. Comparando com os valores obtidos para a rugosidade das paredes das fraturas pertencente à família 2 subvertical, a rugosidade não é muito diferente, situando-se na segunda classe mais predominante na área de estudo daquela família

No que diz respeito à influência deste parâmetro na velocidade de fluxo do contaminante, esta vai ser relativamente elevada, pois apesar de existir alguma rugosidade, a parede continua a ser lisa.

Abertura

Quanto à abertura das diaclases, da mesma forma que a rugosidade, devido ao facto de não ter sido efetuada a medição diretamente nas discontinuidades, o processo de averiguação da abertura média foi bastante dificultado. Contudo, através da observação do afloramento no campo e pelas fotografias tiradas na área de estudo, pode-se afirmar que estas encontravam-se mais fechadas comparativamente às fraturas subverticais, tendo sido assumido uma abertura média de 0,05 cm, o que segundo as classes da Tabela 2-3, denominam-se de fraturas “Abertas”.

Em termos da hidrogeologia, a circulação de contaminantes por entre estas discontinuidades é favorável, apesar de ser menos que em qualquer uma das famílias subverticais.

Preenchimento

No que toca ao preenchimento das fraturas desta família subhorizontal, verificou-se que as fraturas se encontravam todas sem enchimento. No entanto, não se pode descartar a possibilidade de este existir em algum local que possa estar coberto por vegetação ou a uma cota mais alta que impede a sua visualização.

Assim, como não existe enchimento nestas fraturas, o fluxo de contaminantes por entre elas será facilitado, não existindo nenhum elemento que impeça a sua circulação para além do próprio atrito das paredes. Esta situação é a mais desfavorável no que diz respeito a este parâmetro, como foi referido em capítulos anteriores.

4.2.1.3. Resultados - Porosidade aberta

Foram recolhidas diversas amostras de vários pontos do afloramento, de forma que houvesse uma boa representatividade. O ensaio foi realizado nas instalações da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL), nomeadamente no laboratório de mecânica das rochas do departamento de engenharia civil. Este teve como metodologia a descrita no subcapítulo 2.2.2.1, considerando as fórmulas apresentadas no mesmo. Após serragem e secagem das amostras, obtiveram-se os provetes que se encontram ilustrados na Figura 4.18. Como se pode observar, todas as amostras apresentam tonalidades castanhas e cinzentas, e apesar de não ser uma cor homogênea, todas as amostras apresentam esta coloração.



Figura 4.18 - Provetes B1, B2, B3, B4, B5 e B6 provenientes de amostras recolhidas do ponto 3

Em termos de poros e fraturas, são visíveis em quase todos os provetes pequenas fraturas originadas pela serragem. De facto, foi praticamente impossível a serragem de mais de uma face nas amostras devido à criação de fraturas mecânicas e posterior desagregação. Assim, esperam-se valores mais altos que os teóricos para este tipo de rocha, pois as faces que possuem uma maior alteração e consequentemente maior porosidade, encontram-se em maior número que as serradas e sem porosidade. Para além disto, a existência de fraturas vai contribuir para uma porosidade mais elevada.

De notar que, apesar de aparentarem não possuírem fraturas para além das visíveis a olho nu, após efetuado o ensaio, as amostras ainda não totalmente secas, apresentavam padrões dendríticos na superfície serrada do provete, como está ilustrado na Figura 4.19. Conseguiu-se desta forma ver fraturas e possíveis caminhos de entrada de água para dentro do provete. Portanto, mesmo apresentando faces consideradas lisas e sem poros, pode existir

forma da água entrar na matriz-rocha, mesmo que há primeira vista pareça ser altamente improvável.



Figura 4.19 - Fraturas visíveis apenas a meio do processo de secagem dos provetes B1 e B5

Concluído o ensaio e pesados os provetes, os resultados foram colocados na Tabela 4-2, onde estão expressas a massa do provete seco (m_d), massa do provete imerso (m_h) e massa do provete saturado (m_s). Como se pode verificar, as diferenças entre a massa do provete seco e saturado, é de pouco mais de 2 g, podendo refletir porosidades mais elevadas, ainda que, dentro do vasto espectro dos diferentes tipos de rochas, poder ser considerar-se baixo.

Tabela 4-2 - Resultados das medições dos pesos seco, imerso e saturado de cada amostra do ponto 6

	m_d (g)	m_h (g)	m_s (g)
B1	133,21	87,63	135,23
B2	233,45	153,45	236,62
B3	142,04	93,26	144,74
B4	142,53	93,95	143,2
B5	238,77	156,65	241,36
B6	234,92	153,98	237,76

Averiguados os valores das massas secas, imersas e saturadas de cada provete, calculou-se o volume dos poros (V_o), o volume aparente (V_b), a massa volúmica aparente (ρ_b) e a porosidade aberta (p_o) de cada um e posteriormente determinou-se a média dos resultados obtidos por parâmetro. Os valores obtidos de cada uma destas operações encontram-se na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Resultados dos cálculos do volume dos poros, volume aparente, massa volúmica aparente e porosidade aberta de cada amostra do ponto 6 e respetiva média

	V_o (ml)	V_b (ml)	ρ_b (Kg/m ³)	p_o (%)
B1	2,02	47,70	2793	4,2
B2	3,18	83,34	2801	3,8
B3	2,71	51,58	2754	5,2
B4	0,67	49,35	2888	1,4
B5	2,60	84,88	2813	3,1
B6	2,85	83,95	2798	3,4
Média	2,34	66,80	2808	3,5

Analisando estes resultados, verifica-se que certos parâmetros como a massa volúmica aparente e a porosidade, deram valores relativamente semelhantes. Salta imediatamente à vista que o provete B4 apresentou valores mais baixos em termos de volume de poros e porosidade aberta. Enquanto os restantes provetes têm entre 2 ml e 3 ml de volume de poros e 3 % a 5 % de porosidade, o provete B4 tem um volume de poros perto de 1 ml e uma porosidade que nem chega aos 1,5 %. Tal pode-se dever à amostra possuir um maior número de faces serradas que os restantes provetes ou até poderá fazer parte de uma amostra proveniente de uma zona do afloramento com menor porosidade.

Em termos do volume aparente, a média dos valores supera o mínimo recomendado o que é um fator positivo, no entanto 3 dos 6 provetes encontram-se abaixo deste limiar. Tal deve-se ao facto de que durante a serragem, houve amostras que se partiram demasiado e deram origem a provetes mais pequenos. No caso da massa volúmica aparente, os valores obtidos estão concordantes com aqueles encontrados na bibliografia, nomeadamente L. VALLEJO & M. FERRER (2010) que colocam os valores típicos de massa volúmica do basalto entre 2700 kg/m³ e 2900 kg/m³. É importante referir que, como foi explicado anteriormente, devido à elevada densidade do basalto, a massa volúmica aparente calculada neste ensaio pode ser considerada a massa volúmica real da rocha. Para o ensaio da resistência *in situ* para este ponto no campo, o valor de massa volúmica que será utilizado para determinar a resistência à compressão uniaxial através de correlações, será a média dos resultados obtidos para este ponto.

Quanto à porosidade, de acordo com L. VALLEJO & M. FERRER (2010), os valores típicos da porosidade do basalto encontram-se entre o intervalo de 0,1% a 2%, que são inferiores aos obtidos em todos os provetes, com exceção do B4. Esta anomalia pode-se dever a vários fatores, são eles o facto de as amostras possuírem muitas faces alteradas e sem estarem serradas, a etapa da serragem que deu origem a algumas fraturas visíveis nos provetes, e o facto destas amostras terem origem na superfície do afloramento, correspondendo à zona mais alterada. No entanto, apesar de, em termos teóricos para este tipo de rocha, a porosidade ser alta, em termos genéricos e abrangendo todo o tipo de rochas, o basalto do ponto 3 possui uma porosidade "Baixa" de acordo com a Tabela 2-4.

Assim, como o basalto pertencente ao ponto 3 possui uma porosidade baixa, no contexto da problemática em estudo, não haverá circulação significativa de contaminante por entre a rocha nem armazenamento do mesmo.

4.2.1.4. Resultados - Resistência *in situ*

Para além do levantamento das descontinuidades do maciço, efetuaram-se 6 ensaios de resistência *in situ* com recurso ao martelo de Schmidt em várias zonas do afloramento. A metodologia utilizada para efetuar este ensaio foi descrita previamente no subcapítulo 2.2.2.2, sendo que as medições foram feitas perpendicularmente ao afloramento e a uma altura relativamente constante, a cerca de 1,50 m da base. Através do ábaco de Miller da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, efetuou-se a conversão de resistência do martelo para resistência à compressão uniaxial, tendo sido utilizado o valor 28,1 kN/m³ pois foi o valor de massa volúmica obtido no ensaio de determinação da porosidade aberta para amostras deste local. Os resultados obtidos encontram-se expressos na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Resultados do ensaio de resistência *in situ* através do martelo de Schmidt no afloramento do ponto 3 com respetiva conversão para MPa

Ensaio	Distância relativamente ao ponto mais a NE (m)	Média de resultados obtidos no ensaio retirando o valor mais alto e mais baixo da resistência do martelo (x)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
1	6	44	120
2	25,5	33	53
3	34,5	22	29
4	61,5	12	16
5	72	26	38
6	82,5	14	19

Como esperado, dada a morfologia do local, há uma tendência para a diminuição da resistência à compressão uniaxial de NE para SW, isto porque como a altura vai diminuindo, as zonas mais alteradas também irão diminuir de cota. Segundo a Tabela 2-5, apenas o primeiro local onde foram efetuados os ensaios, apresenta uma resistência à compressão uniaxial alta, os restantes são considerados como terem uma resistência moderada.

4.2.2. Ponto 6 - Afloramento da Rua Q.ta do Salrego

Junto ao centro comercial Alegro Alfragide, existe um afloramento na zona perto da saída do parque de estacionamento, onde normalmente se encontram veículos pesados e carlinhas estacionadas. De igual forma que o local anterior, neste afloramento foram implementadas medidas de contenção do talude, que consistem em muros de gabião na base do afloramento e redes metálicas cobrindo toda a rocha aflorante. Da mesma forma que o maciço pertencente ao afloramento anterior, também neste existe alguma vegetação, cobrindo certos locais do talude, mas no geral a sua presença não dificultou os trabalhos de campo.

O afloramento possui 225 m de comprimento, a sua orientação é sudeste-noroeste, e possui uma altura de 6 m, sendo que o terreno é inclinado, aumentando sucessivamente de

cota para noroeste. À primeira vista, é possível notar na vista geral representada na Figura 4.20 que há uma diferença de tonalidade do maciço ao longo de todo o talude, nomeadamente os tons avermelhados no centro do afloramento, enquanto no restante já se exibem tons típicos de um maciço basáltico. Tal como no afloramento anterior, o facto de existir uma rede metálica a cobrir todo o maciço, tornou complicado a medição da orientação das fraturas existentes.



Figura 4.20 - Vista geral do Afloramento do ponto 6, retirado do *Google Earth*

Assim, neste ponto dividiu-se o maciço em 2 partes dadas as diferenças claras entre os dois níveis do CVL: a zona avermelhada constituída por piroclastos consolidados e a zona acinzentada constituída por basalto proveniente de escoadas lávicas, como se pode averiguar na Figura 4.21.

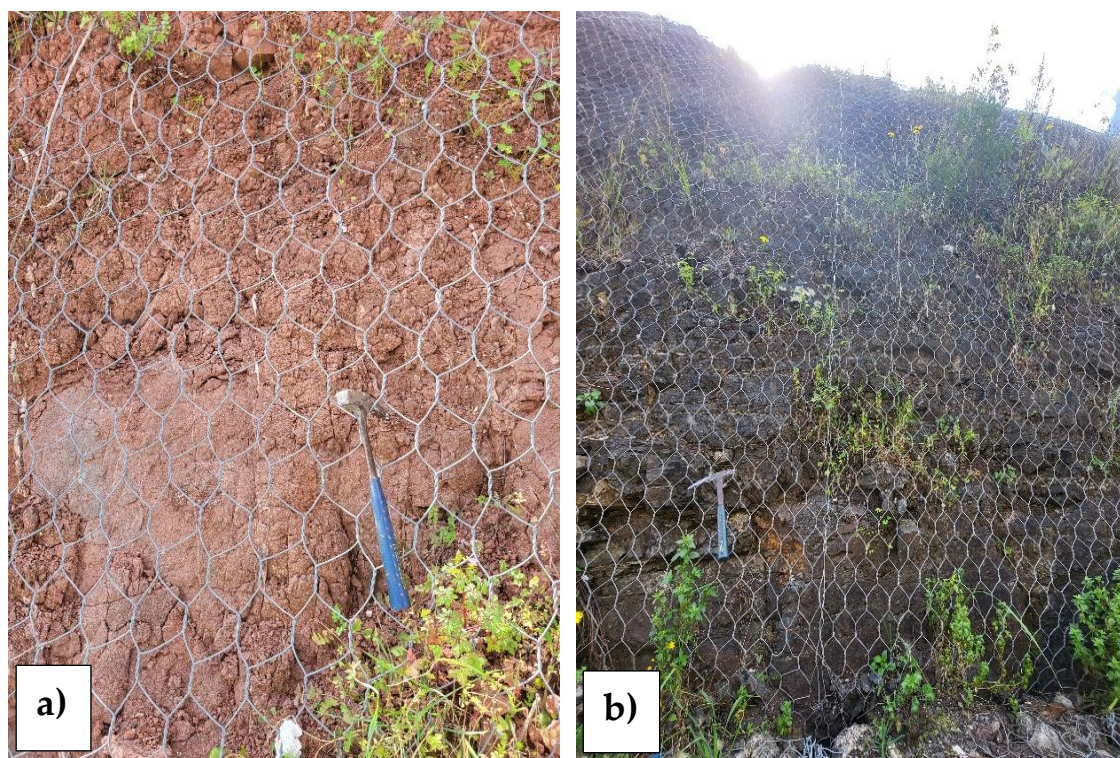


Figura 4.21 - Duas zonas do afloramento do ponto 6: Zona dos Piroclastos (a) e Zona do Basalto (b)

4.2.2.1. Resultados - zona dos piroclastos

Na zona dos piroclastos observou-se uma clara alteração profunda do material rochoso, com tonalidades castanho-avermelhadas. Esta formação apenas aparece no centro do afloramento, possuindo uma extensão de cerca de 45 m. A resistência dos piroclastos era bastante baixa, pelo que se desfaziam os pedaços de rocha nas mãos. Por esta razão não foi possível recolher amostra para fazer ensaios de laboratório devido ao facto que se iriam desfazer durante o procedimento do mesmo. Note-se que sob esta camada de alteração encontra-se rocha que corresponde à zona do basalto, sendo concordante com a ordem em que as formações se apresentam dispostas na área de estudo.

Relativamente à fraturação na zona de piroclastos, apenas existiam na sua maioria veios de natureza carbonatada a surgir por entre as camadas de piroclastos, como se pode verificar na Figura 4.22. Estes veios surgem de forma irregular e em pouca quantidade nesta zona, existindo quase exclusivamente subverticais, com apenas raras ocasiões onde os veios são subhorizontais. Para além disto, os veios apresentam-se salientes e com as paredes erodidas, provavelmente devido ao facto do material com que se encontra preenchido ser mais resistente que o material piroclástico que constitui esta zona.



Figura 4.22 - Veios de natureza carbonatada na zona dos piroclastos do ponto 6, com veios subverticais e subhorizontais

De notar que nesta zona encontraram-se em algumas zonas mais descobertas de piroclastos, basalto vesicular, cujas vesículas se encontravam preenchidos com o mesmo material dos veios dos piroclastos, podendo-se observar na Figura 4.23.



Figura 4.23 - Intercalações de basalto vesicular em alguns locais da zona dos piroclastos

Como foi referido anteriormente, de forma a fazer um levantamento das discontinuidades adequado, efetuou-se uma *scanline* com um comprimento de 43,68 m e 1,25 m de altura

(desde o topo dos muros de gabião). Em toda a sua extensão intersetaram-se 24 descontinuidades e os resultados encontram-se resumidos nos pontos seguintes.

Orientação

Numa primeira observação ao maciço, averiguou-se que as descontinuidades existentes tinham uma orientação bastante semelhante, podendo pertencer todas à mesma família. Após a determinação da atitude de todas as descontinuidades intersetadas pela *scanline*, recorreu-se ao *software Dips* para aferir a orientação média das fraturas levantadas e a definição de famílias. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 4.24.

Confirma-se que nesta zona existe apenas uma família de fraturas, com uma inclinação média de 42° SW, e quanto à direção, é considerada como sendo subvertical confirmando as observações no campo. Note-se que durante os trabalhos de campo e como já foi referido, foram encontradas algumas fraturas subhorizontais, no entanto não foram intersetadas pela *scanline* pois estavam numa zona mais alta, não se conseguindo avaliar as suas características.

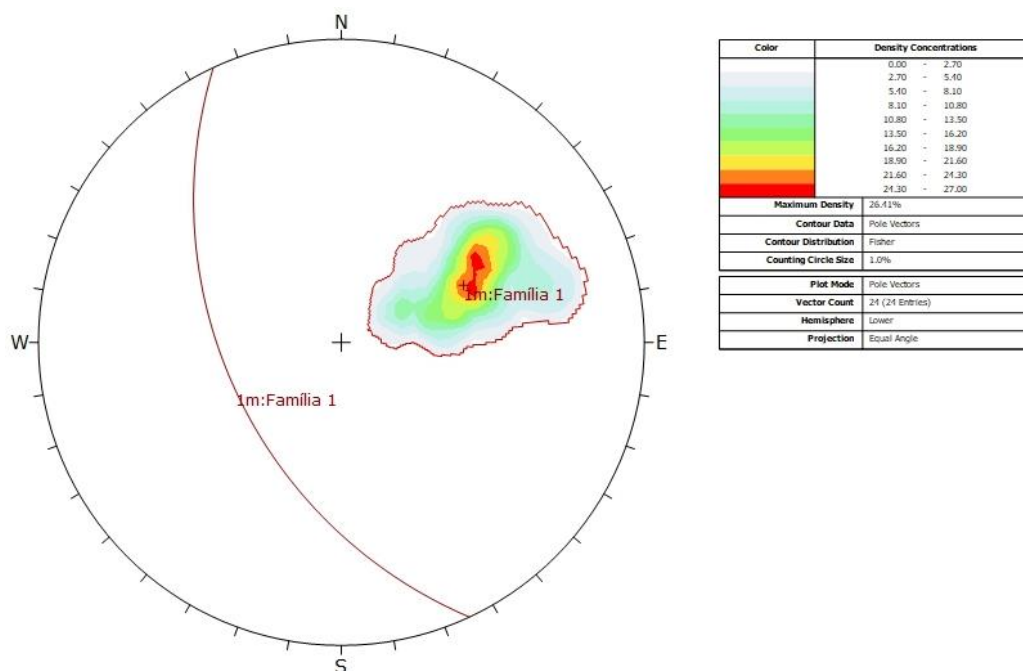


Figura 4.24 - Representação gráfica dos polos e famílias relativas às descontinuidades levantadas na zona dos piroclastos do ponto 6 (elaborada com recurso ao *software Dips*)

Do ponto de vista hidrogeológico, se existir circulação de contaminantes pelas descontinuidades, irão todos percolar de forma quase vertical desde o topo até ao fundo do maciço.

Espaçamento

Relativamente ao espaçamento entre as descontinuidades, este variou entre 0,11 m e 6,18 m e de acordo com a Tabela 2-1, foi possível dividir as fraturas amostradas em cinco classes como é possível observar no gráfico da Figura 4.25. Como se verificou anteriormente,

todas as descontinuidades amostradas pertencem à mesma família, portanto mediu-se a distância entre cada uma das 24 fraturas consecutivas. Assim, conclui-se que não existem descontinuidades definidas como “Extremamente Pouco Espaçadas” e “Muito Pouco Espaçadas”, e que a grande parte destas caracterizam-se como “Espaçadas”.

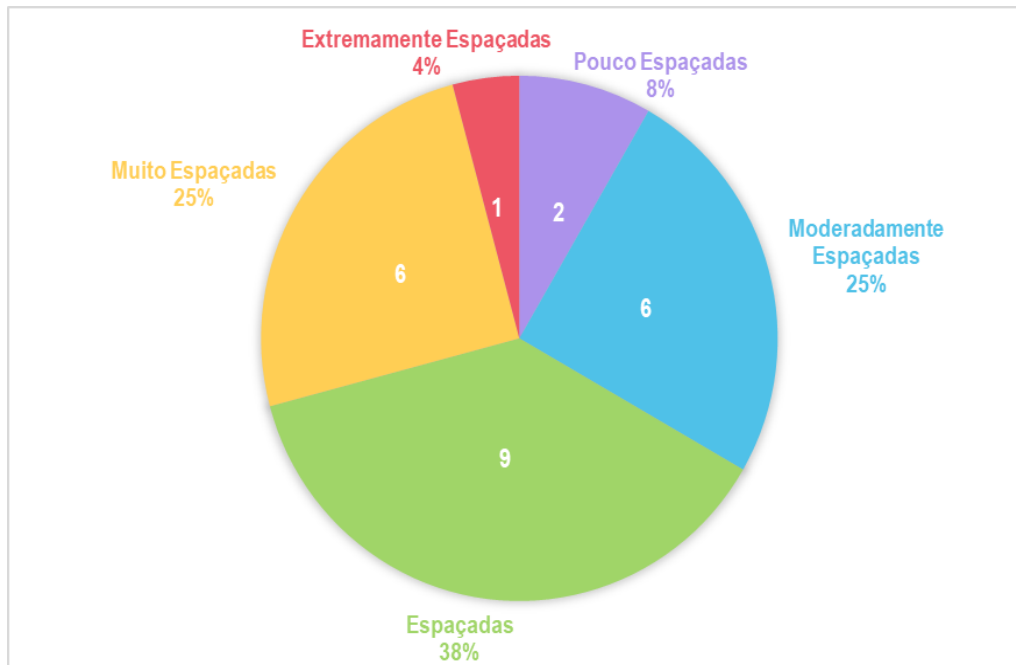


Figura 4.25 - Gráfico relativo ao espaçamento entre descontinuidades da zona de piroclastos do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

O que se verifica nesta zona, analisando apenas este parâmetro, é que a densidade de fraturação será média, portanto não só existem apenas alguns caminhos condutores de contaminantes, como também o maciço terá um comportamento anisotrópico típico de maciço fraturado.

Persistência

Este parâmetro foi o mais complicado de determinar com rigor, isto porque em muitas situações, devido à vegetação e a camadas de alteração superficiais, não se conseguia definir o limite inferior e superior das fraturas, assumindo-se quando tal acontecia, que a extensão da mesma seria igual à altura do talude, de modo a ser mais conservador. Isto porque a pior das situações será quando a extensão da fratura é máxima, e assim, opta-se pelo lado da segurança. Ora, como se pode verificar na

Figura 4.26, mais de metade das fraturas caracterizadas (75%) foram definidas como tendo uma persistência “Média”, com base nos valores da Tabela 2-2, enquanto as restantes seis foram classificadas como tendo uma persistência “Muito Baixa” e “Baixa”.

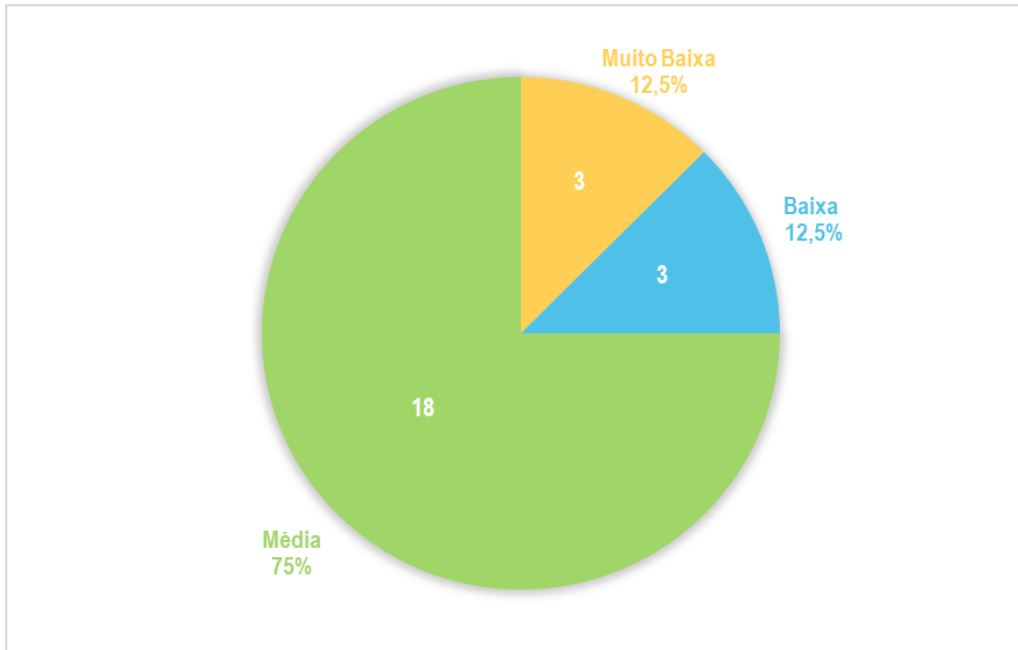


Figura 4.26 - Gráfico relativo à persistência das descontinuidades da zona de piroclastos do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Neste caso, as fraturas definidas como tendo uma persistência média, são as que se assumiu que teriam uma extensão de 6 m, ou seja, igual à altura do talude. No ponto de vista do caso de estudo, verifica-se que relativamente aos resultados obtidos neste parâmetro, poderá haver a possibilidade das fraturas se intersetarem e formarem redes de fraturas onde podem circular contaminantes por entre as mesmas.

Rugosidade

Para classificar a rugosidade das paredes das descontinuidades, recorreu-se ao perfil representado na Figura 2.7. Em muitas das descontinuidades caracterizadas, a rugosidade variava ao longo das mesmas, pelo que se optou por classificar a zona menos rugosa de cada descontinuidade pois será a situação que facilitará mais a circulação dos contaminantes (como foi explicado em capítulos anteriores). Assim, os resultados obtidos pela comparação dos perfis tipo com as descontinuidades do maciço estão expressos na Figura 4.27.

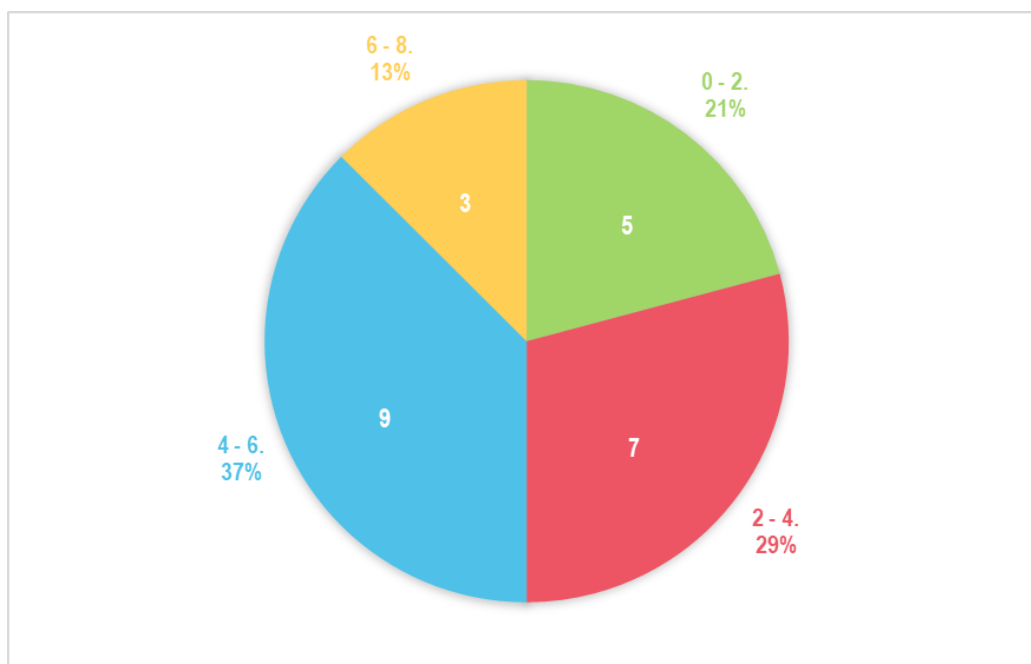


Figura 4.27 - Gráfico relativo à rugosidade das descontinuidades da zona de piroclastos do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respectiva percentagem

O que se pode concluir é que as paredes das descontinuidades encontradas são algo lisas, e encontram-se compreendidas nas quatro primeiras classes de rugosidade, sendo que 21% são totalmente lisas o que indica que qualquer fluido irá ter muita facilidade em circular por entre as descontinuidades, podendo atingir velocidades de fluxo significativas.

Abertura

Como foi referido previamente, nesta zona existem quase exclusivamente veios esbranquiçados que se encontram destacados do maciço, e nalguns casos pode-se verificar a existência de algumas fraturas. No caso dos veios, assumiu-se a largura da abertura da fratura que lhe deu origem como a espessura do veio. Da mesma forma que se assumiu o valor que mais conservador da rugosidade de toda a descontinuidade, quando se efetuou a medição da abertura, esta também variava ao longo da descontinuidade, portanto adotou-se o valor de abertura maior.

As medições variam entre 0,01 cm e 4 cm, havendo alguma irregularidade de valores, como se pode observar na Figura 4.28, cujas classes foram definidas a partir dos valores da Tabela 2-3. Assim, pode-se verificar que cerca de um terço das descontinuidades foram definidas como “Moderadamente Amplas”, seguidas de cinco fraturas com abertura considerada "Ampla" e de igual número foram classificadas fraturas como possuindo uma abertura "Muito Ampla".

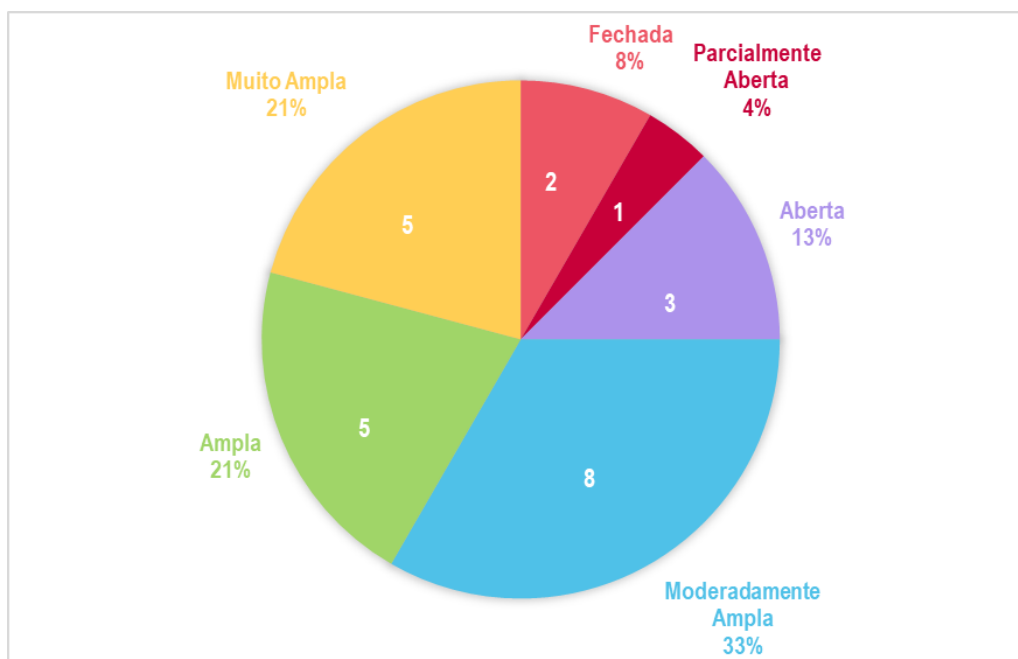


Figura 4.28 - Gráfico relativo à abertura das descontinuidades da zona de piroclastos do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Em termos hidrogeológicos, o que se pode concluir considerando apenas este parâmetro, é que a capacidade de fluxo nas descontinuidades vai ser relativamente elevada devido ao facto de todas as descontinuidades se apresentarem com uma abertura significativa que permite que facilita a entrada e circulação de contaminante.

Preenchimento

Por fim, como já se verificou, existe nesta zona do maciço e caracteriza-se como um material que aparenta ser de natureza carbonatada, mas não cristalizado, de cor esbranquiçada a acinzentada devido à alteração. Este, igualmente à camada superficial alterada, encontra-se muitas vezes fragmentado ao longo das fraturas, sendo também relativamente frágil, chegando a partir-se quando aplicada alguma força ao veio.

Dado o acesso mais facilitado ao afloramento do que no ponto do campo anterior, foi possível a recolha de um pedaço de mostra do enchimento, com a finalidade de observá-lo ao pormenor e poder averiguar a sua mineralogia. Para averiguar este último ponto recorreu-se à utilização do ácido clorídrico (HCl), colocando umas gotas sobre a amostra de cimento. Na verdade, o que se observou foi uma pequena reação de efervescência, o que indica que de facto os veios têm origem carbonatada, mas não na sua forma mais pura. Poderão existir na sua constituição outros elementos químicos que fazem com que a reação entre o HCl e o enchimento seja menos agressiva pois diminuem a quantidade de carbonato existente. Um elemento que poderá fazer parte deste carbonato é o ferro, dada a facilidade que este se tem em fixar a outros elementos e devido à natureza ferromagnésiana da formação que deu origem a este nível.

O gráfico da Figura 4.29 ilustra os resultados obtidos da caracterização deste parâmetro, e como se pode verificar existem mais de 50% destes veios carbonatados a aflorar nesta zona do ponto 6. No espectro oposto, apenas 3 das discontinuidades levantadas não possuíam preenchimento e para além disso, estas mesmas discontinuidades são as que possuem aberturas consideradas “Fechada” e “Parcialmente Aberta”. No caso das oito discontinuidades sobran-tes, estas apenas possuem preenchimento nalguma parte da sua extensão. De notar também que as discontinuidades com maior abertura são as que possuem preenchimento, seguidas das que só possuem nalguns locais da discontinuidade, e por fim as com abertura menor espessura não possuem preenchimento.

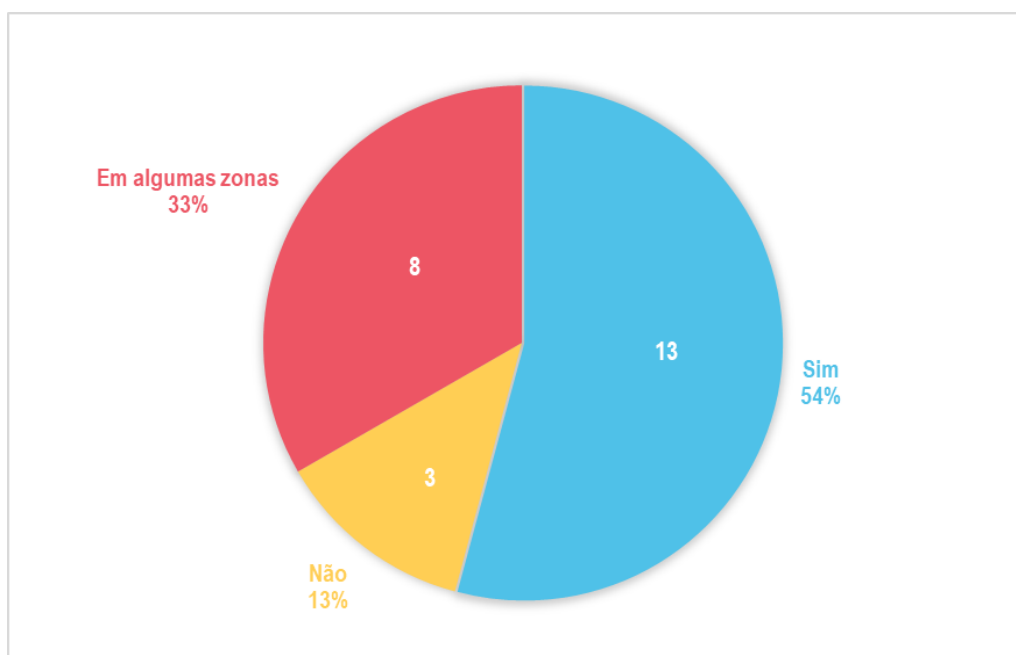


Figura 4.29 - Gráfico relativo ao preenchimento das discontinuidades da zona de piroclastos do ponto 6, com referência ao número de discontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Do ponto de vista hidrogeológico, dada a natureza do enchimento, este irá reagir e dissolver se estiver em contacto com fluidos que possuam um pH ácido. Ora, se por entre estes veios circular algum líquido com pH baixo os veios vão se dissolver, abrindo caminho para o contaminante circular em profundidade e dispersar-se anisotropicamente pela área de estudo. Não obstante, tem de se ter algum pragmatismo com o facto de que se um ácido forte não desencadeou uma reação mais violenta (como seria de esperar de um carbonato mais puro), não será uma água proveniente da escorrência superficial que irá criar essa dissolução.

4.2.2.2. Resultados - zona do basalto

Passando para a zona constituída por basalto proveniente de escoadas lávicas, esta possui uma extensão de 195 m (30 m a noroeste da zona dos piroclastos, e 165 m a sudeste da zona dos piroclastos) e o seu comportamento geológico-geotécnico é bastante semelhante ao do geomonumento da Rua Aliança Operária, as maiores diferenças são o maior estado de

alteração do maciço no ponto anterior, o preenchimento das fraturas e a rocha não estar destacada em grandes blocos prismáticos, mas sim como um maciço fraturado.

No que toca à amostragem, foi possível fazer recolha de amostras nesta zona para posteriormente serem ensaiadas em laboratório. Em termos globais, e contrariamente ao ponto anterior, as fraturas subverticais não dominam o maciço, mas sim as subhorizontais que aparentam ter uma densidade de fraturação alta. Desta forma poderá apenas existir uma família de descontinuidades e ocasionais fraturas com uma orientação aleatória sem pertencerem a uma mesma família.

Para efetuar o levantamento dos parâmetros das fraturas, da mesma forma que na zona dos piroclastos, utilizou-se o método da *scanline*, onde foram apenas intersecionadas 15 fraturas. Nesta zona, dada a aleatoriedade na sua atitude e a escassa presença de fraturas subverticais, só se caracterizaram descontinuidades horizontais, efetuando-se na transversal ao maciço, sete *scanline*'s (com uma extensão de 2 m) a 1,25 m a partir do topo do muro de gabião.

Orientação

Neste ponto, as descontinuidades subhorizontais aparentavam ter atitudes semelhantes, indicando que pudessem ser da mesma família. Depois da recolha de informação no campo relativo à orientação das fraturas subhorizontais, foram inseridas no *software Dips* e procedeu-se à análise da direção e inclinação média, tendo-se obtido a Figura 4.30. Como se pode evidenciar, apenas existe uma família de fraturas subhorizontais nesta zona do ponto 3, confirmando o que se suspeitava no campo. Esta família tem uma inclinação média de 25° S e relativamente à sua direção é praticamente horizontal.

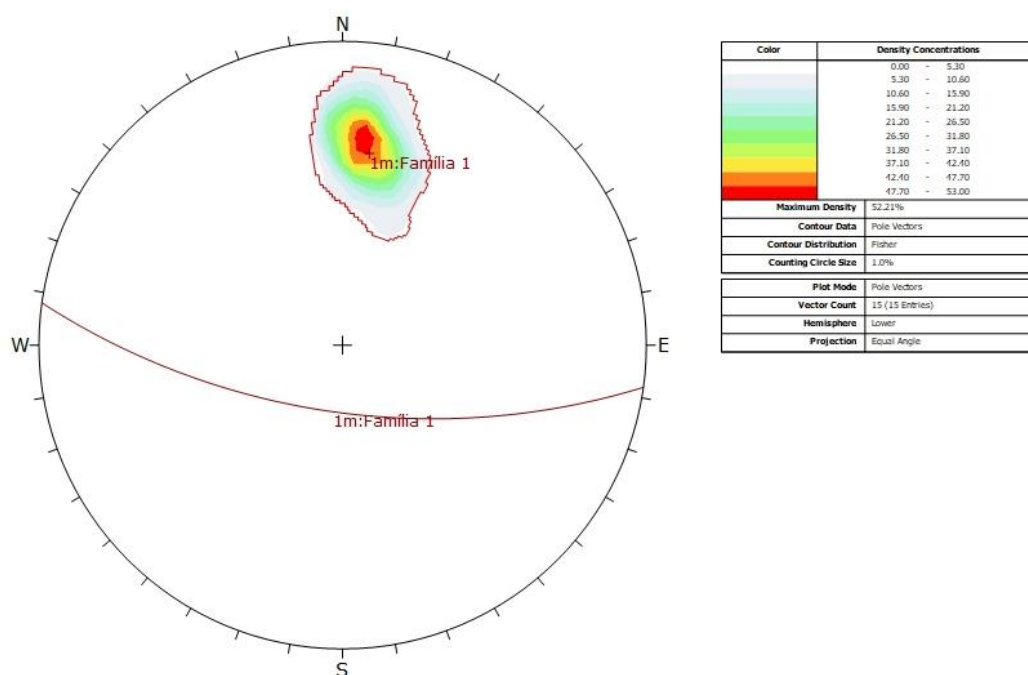


Figura 4.30 - Representação gráfica dos polos e famílias relativas às descontinuidades levantadas na zona do basalto do ponto 6 (elaborada com recurso ao *software Dips*)

Em termos hidrogeológicos, como já foi mencionado no subcapítulo anterior, o facto de existir um número considerável de fraturas subhorizontais, indica que o fluxo de contaminação terá mais facilidade em migrar lateralmente para outros pontos da área de estudo e interseccionar fraturas subverticais criando redes de fluxo de contaminante.

Espaçamento

Em termos gerais, estas fraturas apresentavam espaçamentos relativamente uniformes, com exceção de uma zona em que realmente estas se encontravam mais juntas. Os valores de espaçamento variaram entre 0,06 m e 1,5 m e indo ao encontro com o que está classificado na Tabela 2-1, apenas foram encontradas fraturas que se encontram em quatro classes, como se pode observar no gráfico da Figura 4.31.

Note-se que como todas as descontinuidades subhorizontais pertencem à mesma família, todos os espaçamentos medidos consecutivamente nas 15 fraturas são analisados como um todo. Desta forma, verificou-se que a maioria das fraturas foram classificadas como “Espaçadas” e não existem fraturas definidas como “Extremamente Pouco Espaçadas”, “Muito Espaçadas” e “Extremamente Espaçadas” nesta zona do ponto 3.

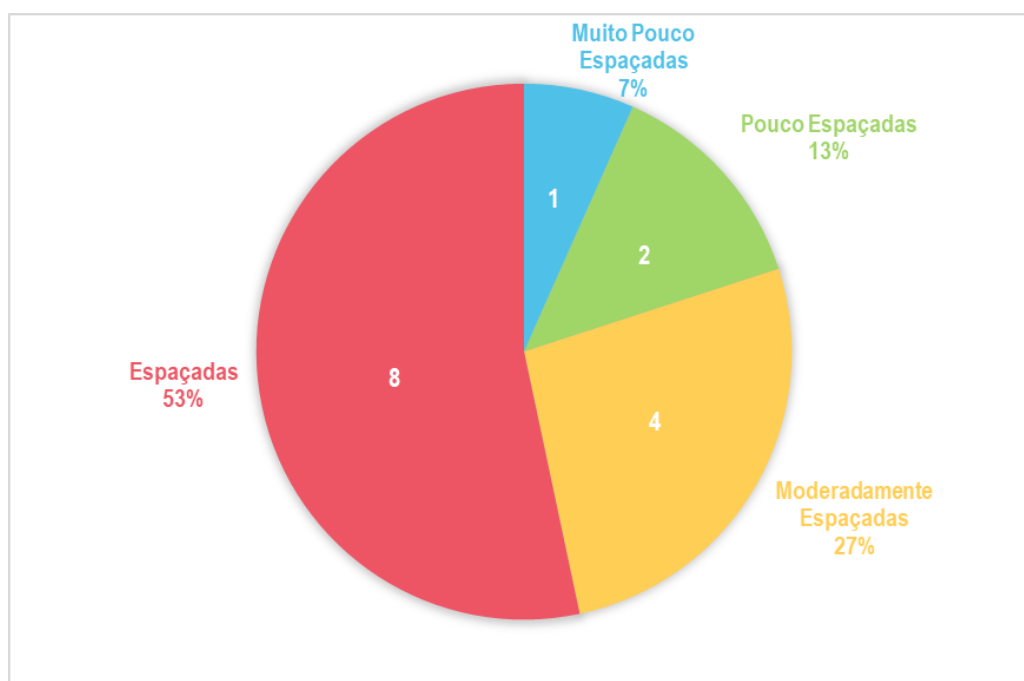


Figura 4.31 - Gráfico relativo ao espaçamento entre descontinuidades da zona do basalto do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

No que toca às características hidrogeológicas, a densidade de fraturação é média a alta, o que significa que estas descontinuidades poderão formar ser caminhos preferenciais condutores da contaminação, para além que o maciço terá um comportamento anisotrópico típico de maciço fraturado, pois não se encontra com uma densidade de fraturação muito elevada.

Persistência

No que toca à extensão destas fraturas, não houve muita variabilidade nesta zona do ponto 3. Para além disso, quando comparado com valores obtidos na zona dos piroclastos, a persistência é consideravelmente inferior. Como foi previamente mencionado, o facto destas descontinuidades pertencerem à mesma família, faz com que todos os valores recolhidos contem para a análise de toda esta zona.

O valor mais alto obtido neste parâmetro foi 5,15 m e o mais baixo foi 0,25 m e segundo as categorias definidas na Tabela 2-2, as descontinuidades amostradas apenas se encontram dentro de três classes, como se pode evidenciar no gráfico da Figura 4.32. Ora, 60% das descontinuidades caracterizadas foram consideradas como tendo uma persistência “Baixa” sendo as restantes classificadas como possuindo uma persistência “Muito Baixa” com a exceção de uma que possuía uma persistência “Média”.

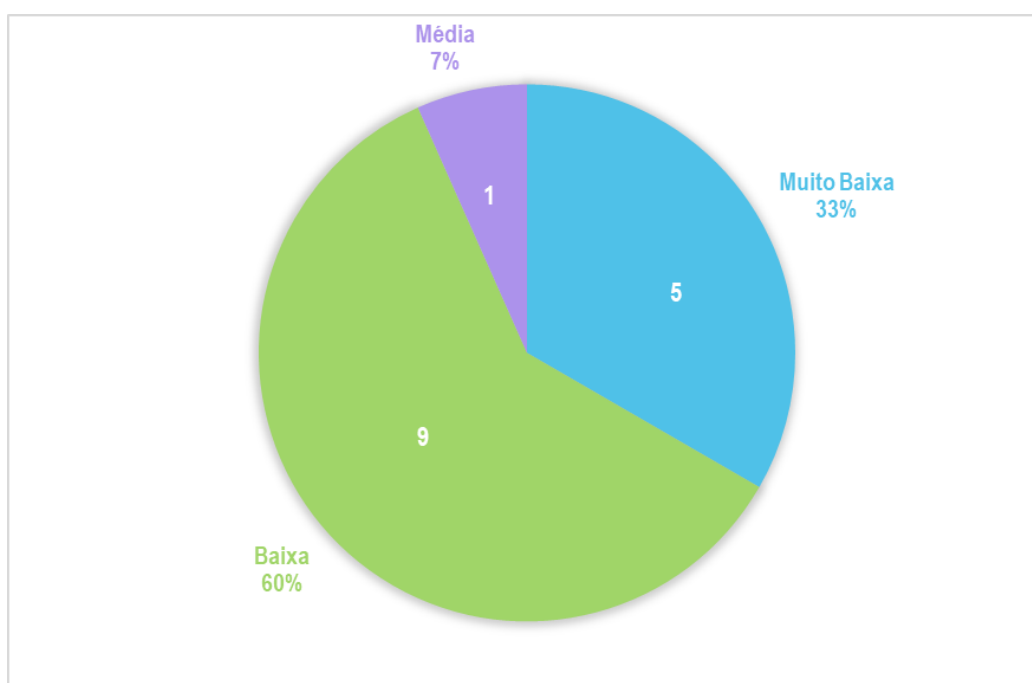


Figura 4.32 - Gráfico relativo à persistência das descontinuidades da zona do basalto do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Quanto à problemática em estudo, o facto de as fraturas serem pouco a muito pouco extensas faz com que a probabilidade destas se interetarem entre elas e outras fraturas criando caminhos preferenciais para a contaminação se movimentar seja baixa.

Rugosidade

Este parâmetro foi determinado através da comparação dos perfis tipo da Figura 2.7 com a rugosidade observada *in situ* nas paredes das descontinuidades. Da mesma forma que se optou por classificar a zona menos rugosa de cada descontinuidade na zona dos piroclastos para se efetuar uma caracterização mais conservadora, nesta zona aplicou-se o mesmo critério.

Igualmente os valores obtidos deste parâmetro em cada descontinuidade são analisados na totalidade para descrever esta zona do ponto 6.

Os resultados obtidos encontram-se ilustrados no gráfico na Figura 4.33 e pode-se concluir que as descontinuidades desta família apresentam uma rugosidade variável ao longo do afloramento e insere-se nas classes de rugosidade média a baixa, sendo que o valor mais abundante é médio abaixo (6 - 8).

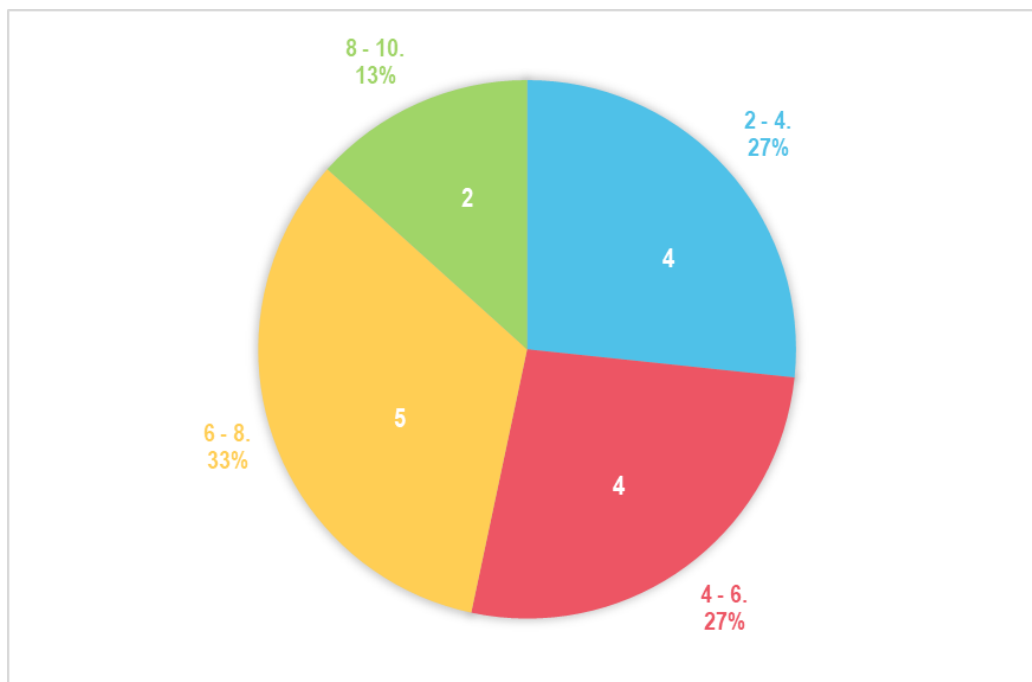


Figura 4.33 - Gráfico relativo à rugosidade das descontinuidades da zona do basalto do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Sendo assim, do ponto de vista hidrogeológico, as paredes das descontinuidades têm tendência a ser lisas, mas com algumas saliências o que irá dificultar um pouco o fluxo de qualquer fluido que por entre elas atravesse. No entanto, dado que as paredes ainda são relativamente lisas, a velocidade de fluxo será significativa.

Abertura

Neste ponto, observou-se que a abertura das descontinuidades não variava muito ao longo da sua extensão contrariamente ao sucedido na zona dos piroclastos, portanto apenas se considerou o valor de abertura coincidente com a *scanline*. Como foi efetuado nos parâmetros anteriores, o facto de todas as fraturas pertencerem à mesma família, faz que a análise desta zona se faça usando todos os valores recolhidos.

As medições variaram entre 0,3 cm e 2,5 cm e classificou-se cada uma das fraturas com os valores definidos na Tabela 2-3, tendo-se obtido o gráfico da Figura 4.34. Observando o gráfico é evidente que a abertura é pouco variável no afloramento, abrangendo apenas três classes e cada uma representa um terço das descontinuidades da área de estudo.

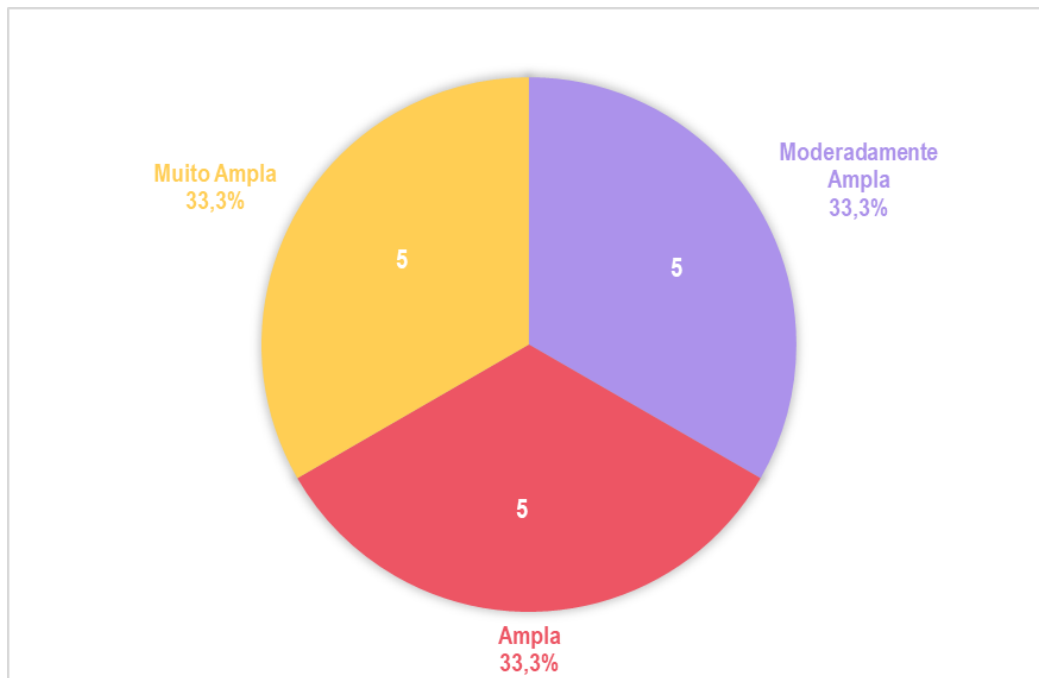


Figura 4.34 - Gráfico relativo à abertura das descontinuidades da zona do basalto do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respetiva percentagem

Conclui-se então que, relativamente à questão em estudo, a capacidade de fluxo nas descontinuidades vai ser considerável, pois os valores obtidos para este parâmetro são médios.

Preenchimento

O preenchimento é provavelmente o parâmetro que distingue mais as fraturas subhorizontais deste ponto com as encontradas no ponto 3. Os resultados obtidos relativos a este parâmetro encontram-se ilustrados na Figura 4.35, e como se pode verificar, todas as fraturas subhorizontais intersectadas pela *scanline* possuem enchimento.

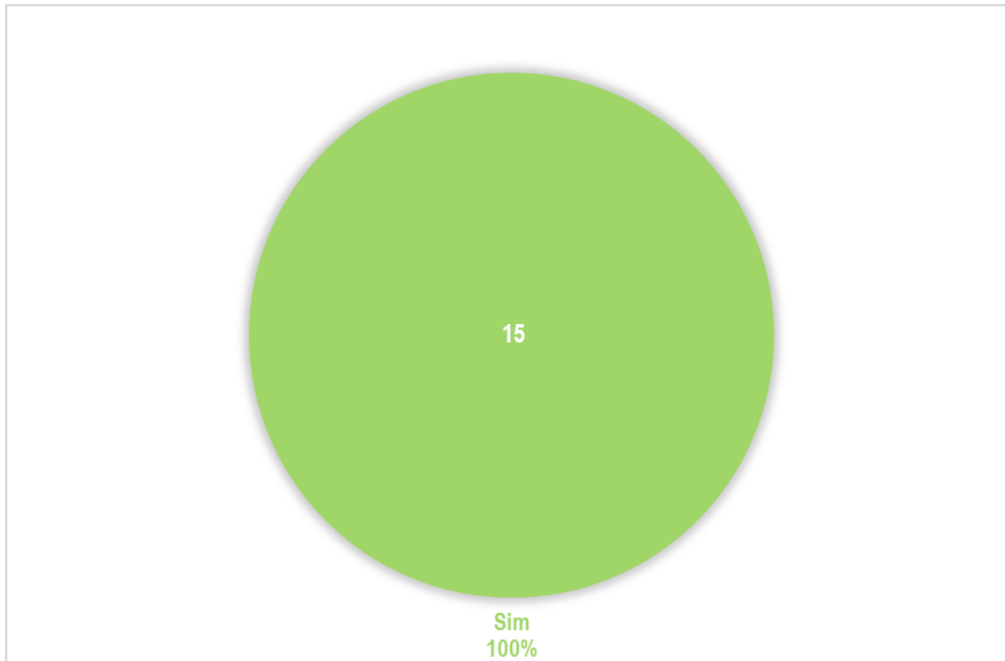


Figura 4.35 - Gráfico relativo ao preenchimento das descontinuidades da zona de piroclastos do ponto 6, com referência ao número de descontinuidades por classe e a sua respectiva percentagem

Ora, na zona dos basaltos, as fraturas encontram-se todas preenchidas pelo mesmo cimento carbonatado encontrado na zona dos piroclastos, com a diferença de este se apresentar menos alterado e mais resistente, estando ilustrado na Figura 4.36. Note-se que apesar de todas as fraturas amostradas se encontrarem preenchidas, não significa que não possam existir fraturas sem preenchimento, até porque as *scanlines* efetuadas tinham apenas 2 m devido a não existir acesso ao maciço a cotas mais altas.



Figura 4.36 - Fraturas subhorizontais preenchidas com cimento carbonatado na zona do basalto

Como as discontinuidades se encontram preenchidas e com o mesmo cimento de origem carbonatada que a zona dos piroclastos, do ponto de vista da evolução da contaminação, as conclusões retiradas serão as mesmas, ou seja, dependendo se por entre as fraturas circular algum líquido com capacidade de fazer com que o cimento seja dissolvido com base no seu pH, as fraturas serão um meio preferencial para a movimentação de contaminantes, dispersando-se pela área de estudo. Para além disto, havendo a possibilidade de existirem fraturas sem preenchimento devem-se ter em consideração mesmo que em número reduzido, o contaminante, irá circular anisotropicamente por entre as paredes das discontinuidades do basalto.

4.2.2.3. Resultados - Porosidade aberta

Nesta zona foi possível fazer a recolha de amostras para ensaiar em laboratório, nomeadamente quanto à porosidade aberta. Da mesma forma que na zona anterior, este ensaio foi realizado no laboratório de mecânica das rochas do departamento de engenharia civil da FCT - UNL. A metodologia adotada para efetuar este ensaio está descrita no subcapítulo 2.2.2.1, juntamente com os cálculos que se vão efetuar para determinar outros parâmetros que serão relevantes para outros ensaios para além de tornar mais completa a análise à rocha.

Após a serragem e secagem da amostra, obtiveram-se seis provetes que estão representados na Figura 4.37. Numa primeira análise, a cor dos provetes é relativamente uniforme, sendo um cinzento que pode por vezes ter alguns tons avermelhados (principalmente nos provetes A1 e A4). Note-se que existem algumas faces que não foram serradas, isto deve-se ao facto de que podia haver o risco dos provetes se partirem ou criarem fraturas. Devido a este fator os valores de porosidade podem ser um pouco mais altos pois como se pode verificar, as faces serradas não apresentam poros visíveis a olho nu e apenas os provetes A2 e A3 têm fraturas visíveis. Este facto pode ser um indicativo de que os provetes mencionados poderão apresentar valores mais elevados de porosidade aberta, contrariamente a outros provetes com superfícies lisas e sem poros.



Figura 4.37 - Provetes A1, A2, A3, A4, A5 e A6 provenientes de amostras recolhidas no ponto 6 na zona do basalto

Após as etapas do ensaio e respectivas pesagens dos seis provetes encontram-se expressos na Tabela 4-5 os resultados obtidos, que dizem respeito à massa do provete seco (m_d), massa do provete imerso (m_h) e massa do provete saturado (m_s). Como se pode observar, existe uma diferença entre a massa do provete seco e massa do provete saturado, ainda que seja pouco mais de 1 g.

Tabela 4-5 - Resultados das medições das massas dos provetes secos, imersos e saturados do ponto 6

	m_d (g)	m_h (g)	m_s (g)
A1	122,81	81,32	123,57
A2	60,6	40,24	61,32
A3	120,7	80,04	121,85
A4	81,12	53,77	81,72
A5	186,42	123,56	187,29
A6	197,28	130,71	198,08

Adquiridos os valores das massas seca, imersa e saturada de cada provete, procedeu-se ao cálculo do volume dos poros (V_o), volume aparente (V_b), massa volúmica aparente (ρ_b) e porosidade aberta (p_o) e posteriormente o cálculo da média dos resultados de todos os provetes de forma a determinar os valores característicos de cada parâmetro no ponto 6. Os resultados encontram-se expressos na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 - Resultados dos cálculos do volume dos poros, volume aparente, massa volúmica aparente e porosidade aberta de cada amostra do ponto 6 e respetiva média

	V_o (ml)	V_b (ml)	ρ_b (Kg/m ³)	p_o (%)
A1	0,76	42,33	2901	1,8
A2	0,72	21,12	2869	3,4
A3	1,15	41,89	2881	2,8
A4	0,60	28,01	2897	2,1
A5	0,87	63,86	2919	1,4
A6	0,80	67,51	2922	1,2
Média	0,82	44,12	2898	2,1

De forma geral, os valores para cada provete foram relativamente semelhantes em praticamente todos os parâmetros. Como se pode observar, o provete A3, apresenta o volume de poros mais elevados de todos, o que se poderá dever às fraturas visíveis que apresentava. No espectro oposto, o provete A4 possui o volume de poros mais baixo, o que poderá estar relacionado com a existência de um maior número de faces serradas ou ser proveniente de uma amostra menos alterada. Note-se que a maioria dos provetes apresentam volumes inferiores ao recomendado, podendo explicar um pouco a razão dos únicos provetes acima das dimensões recomendadas apresentarem os valores mais baixos de porosidade aberta.

Relativamente à massa volúmica aparente que pode ser considerada a massa volúmica real da rocha, como já foi explicado previamente, os valores obtidos e a média encontram-se dentro dos limites dos valores tabelados na bibliografia. Segundo VALLEJO L. & FERRER M.

(2010), em basaltos, os valores de massa volúmica oscilam entre 2700 Kg/m³ e 2900 Kg/m³, e olhando de novo para os resultados, apenas os provetes A5 e A6 se encontram fora deste limite por excesso. A média calculada para este parâmetro será o valor utilizado para determinar a resistência à compressão uniaxial no subcapítulo seguinte.

Por fim, comparando os valores de porosidade aberta obtidos com as classes da Tabela 2-4, a porosidade do basalto neste ponto do campo é considerada "Baixa". Não obstante, apesar da rocha apresentar valores baixos, de acordo com a bibliografia, nomeadamente L. VALLEJO & M. FERRER (2010), os valores típicos de porosidade para o basalto variam entre 0,1% e 2%. Ora, tem de se considerar o facto das amostras terem sido recolhidas a partir da superfície do afloramento que é o local onde a porosidade da rocha será mais alta devido à sua exposição ao meio ambiente. Para além disto, os valores da porosidade podem ter sido influenciados nalgumas amostras pelo facto de terem dimensões mais pequenas do que o recomendado.

Desta forma, apesar de ser considerado um valor alto para a porosidade do basalto, em termos gerais é considerada uma porosidade baixa, e em termos hidrogeológicos, é extremamente improvável que haja circulação ou retenção de contaminante na rocha nesta zona do ponto 6.

4.2.2.4. Resultados - Resistência *in situ*

Para este local também se efetuaram ensaios de resistência à compressão uniaxial *in situ*, com recurso ao martelo de Schmidt. Nesta situação, fizeram-se dois ensaios, um em cada zona do ponto 6 de acordo com a metodologia explicada no subcapítulo 2.2.2.2, perpendicularmente ao afloramento e a uma altura constante de cerca de 1,50 m. Como valor de massa volúmica característica da zona dos piroclastos, recorreu-se a fontes bibliográficas (GILLIES et al., 2020) e escolheu-se o valor 13 kN/m³ como representativo, visto que não foi possível calcular a massa volúmica dos piroclastos por meio do ensaio da determinação da porosidade aberta. Já na zona dos basaltos, utilizou-se o valor 28,9 kN/m³ por ser a média das massas volúmicas obtidas nas amostras deste local no laboratório.

Os valores obtidos dos dois ensaios encontram-se na Tabela 4-7, e de acordo com a Tabela 2-5, a zona de piroclastos tem uma resistência "Baixa" e a zona de basalto, uma resistência "Moderada". Tais classificações estão em concordância com a observação geral no campo, ou seja, a zona de piroclastos tem uma resistência à compressão uniaxial pobre e a zona de basalto neste ponto do campo é superior a todos os locais ensaiados no ponto 3 com a exceção de um.

Tabela 4-7 - Resultados do ensaio de resistência *in situ* através do martelo de Schmidt no afloramento do ponto 6 com respetiva conversão para MPa

Ensaio	Média de resultados obtidos no ensaio retirando o valor mais alto e mais baixo da resistência do martelo (r)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
Zona Piroclastos	18	18
Zona Basalto	29	54

4.2.3. Ponto 7 - Afloramento do Farol da Mama Sul

A última paragem localiza-se na Serra de Carnaxide, e o talude em estudo faz parte do Farol da Mama Sul. Este afloramento tem algumas diferenças dos anteriores, sendo que em primeiro lugar não possui qualquer medida de contenção, tornando o seu estudo bastante acessível, para além disto, a vegetação apenas existe na base e no topo do afloramento, não havendo impedimentos na vista para o maciço, como se pode observar na Figura 4.38.



Figura 4.38 - Vista geral do afloramento do Farol da Mama Sul

O afloramento tem cerca de 125 m de comprimento e 6 m de altura e dispõe-se em forma de “L”, portanto uma frente tem orientação NNE-SSW nos primeiros 95 m, e passa para uma orientação E-W e nos últimos 30 m (no sentido oeste-este).

Da mesma forma que o afloramento da rua da Q.ta do Salrego, para uma melhor compreensão das propriedades de cada formação aflorante, dividiu-se o maciço em 2 partes, visto que as suas características são bastante distintas. Neste ponto evidencia-se a presença dos dois tipos de rocha provenientes do período efusivo do episódio magmático que gerou o CVL. Assim considerou-se a zona do basalto, constituído por basalto fraturado proveniente de escoadas lávicas, e a zona da brecha vulcânica, constituída pelos blocos de basalto unidos por um cimento de calcite, como se verifica na Figura 4.39.

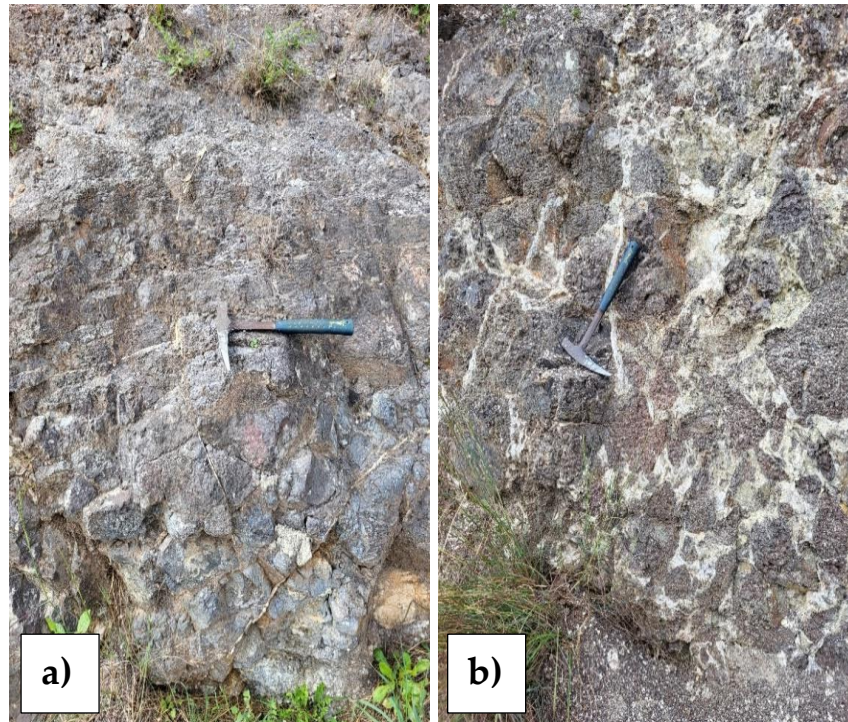


Figura 4.39 - Distinção das 2 zonas do afloramento do ponto 7: Zona do Basalto (a) e Zona da Brecha Vulcânica (b)

No caso da zona do basalto, como está representado na Figura 4.40, com o auxílio do martelo de geólogo, averiguou-se que entre as zonas de basalto proveniente de escoadas lávicas visitadas, esta correspondia à com a rocha mais alterada e com menos resistência. Para além disto, a diferença principal entre este afloramento e os anteriores, é que não existem famílias de fraturas bem definidas. Portanto não foi encontrado nenhuma atitude dominante de fraturação, para além de que a sua densidade era francamente grande.

De notar que tal como no ponto 6, as discontinuidades encontram-se ou fechadas e, no caso de estarem abertas, contêm preenchimento de natureza carbonatada. Sendo assim, nesta zona não se caracterizaram as fraturas da mesma forma que nos locais anteriores.



Figura 4.40 - Zona de Basalto francamente alterado e com veios carbonatados com espessura considerável

Na Figura 4.41 observa-se que as duas zonas alternam ao longo do afloramento com alguma irregularidade relativamente ao espaçamento entre cada uma das formações.



Figura 4.41 - Alternância entre a Zona da Brecha Vulcânica e a Zona do Basalto

Na zona da brecha vulcânica, o comportamento geológico-geotécnico da rocha é visivelmente diferente desta última zona. Uma característica de bastante relevância é o seu estado

de alteração à superfície em que, apenas ao toque, a rocha desfazia-se em grãos de granulometria grosseira. Devido a este facto não foi possível realizar ensaios relativos à resistência *in situ* de forma correta e rigorosa.

Note-se que neste local os veios encontravam-se sobre a forma de cristais de calcite, podendo representar uma fase mais avançada do desenvolvimento da rocha, comparativamente ao cimento encontrado noutros locais, como se pode observar na Figura 4.42. Estes veios possuem uma espessura que pode alcançar a dezena de cm, mas na sua grande maioria mantêm-se entre 1 cm e 2 cm. O tamanho dos blocos de rocha varia desde pequenos grãos de 1 cm ou 2 cm, até blocos maiores com 50 cm. Tal como na zona anterior, como não existiam descontinuidades neste local, não se efetuou o seu levantamento.



Figura 4.42 - Zona da Brecha Vulcânica do afloramento do ponto 7, com representação de um veio de calcite e blocos de basalto francamente alterado

Contrariamente às sondagens efetuadas no local de estudo, o cimento da brecha é de cor esbranquiçada enquanto na área de estudo é avermelhada. Tal pode significar a presença de uma menor oxidação no ponto 7, o que leva a que na área de estudo exista uma maior presença de minerais de ferro e menos carbonato.

INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Concluídos os trabalhos de campo, considerou-se que estavam reunidas as condições necessárias para a elaboração de um modelo conceptual da situação em estudo. Como foi descrito anteriormente, nos diversos locais onde houve levantamento das características do maciço, nomeadamente do seu estado de alteração e fraturação, foram encontrados diferentes níveis pertencentes ao CVL. A primeira etapa desta interpretação foi comparar e agrupar os níveis aflorantes nos pontos do campo, com os níveis encontrados na área de estudo mediante sondagens. Desta forma, conseguiu-se associar as propriedades de cada zona do CVL caracterizada no campo e prever o comportamento da contaminação quando esta interseccionar essa mesma zona.

5.1. Correlação entre os dados no local de estudo e os dos trabalhos de campo

Segundo os dados das sondagens realizados no local em estudo, foram identificados três níveis do Complexo Vulcânico de Lisboa, do mais recente para o mais antigo, respetivamente: piroclastos consolidados, brecha vulcânica e basalto fraturado. Como se pode observar na Figura 5.1, correlacionou-se todas os locais visitados com os troços de cada tarolo de sondagem recolhidos na área de estudo.

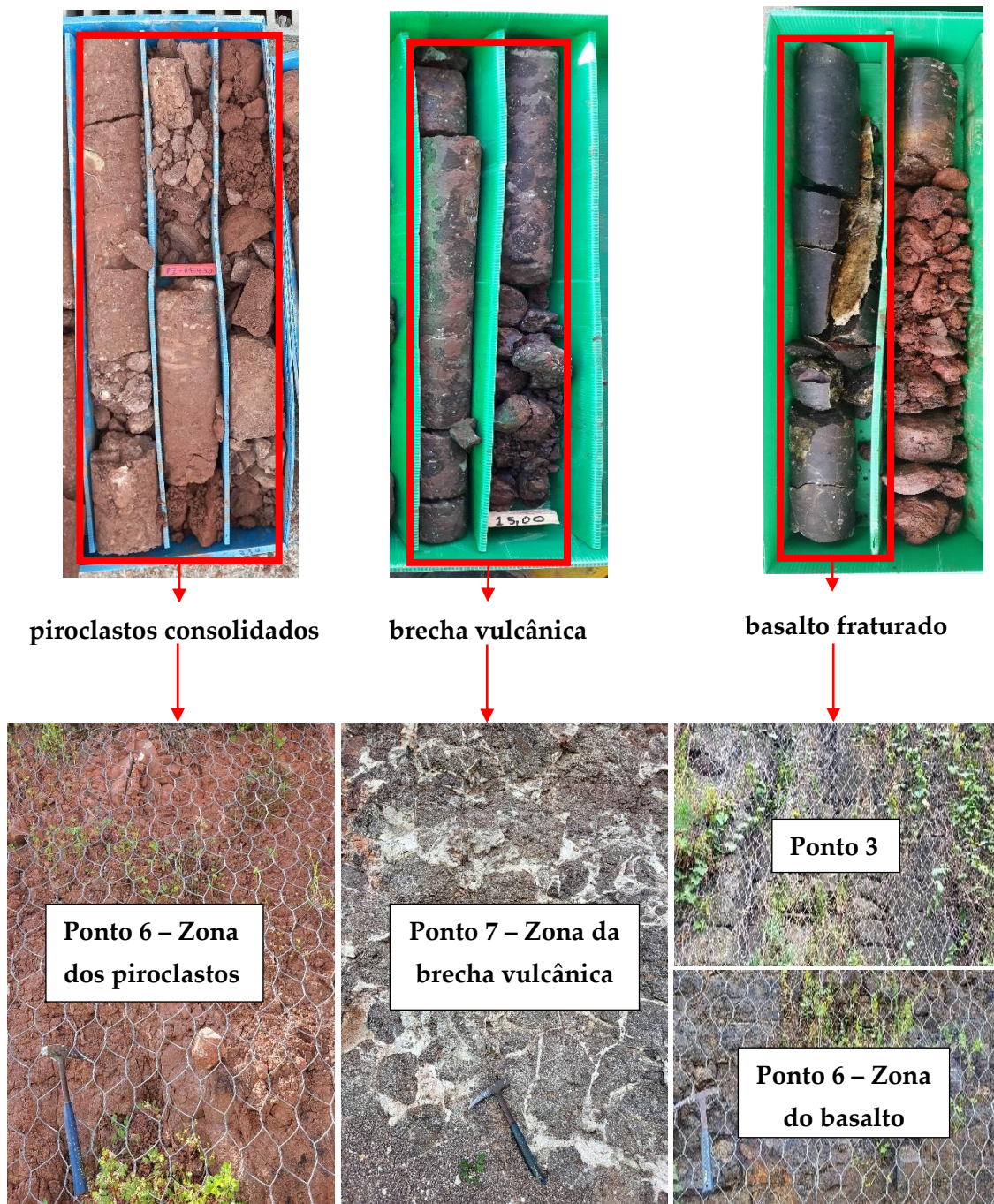


Figura 5.1 - Correlação entre as diferentes zonas encontrados no campo e os níveis recolhidos nas sondagens efetuadas na área de estudo

No caso dos piroclastos consolidados, apenas foram localizados no afloramento pertencente ao ponto 6, na previamente definida zona dos piroclastos. Aqui, a associação com o nível correspondente, foi relativamente fácil pois a cor, textura e resistência eram idênticos, para além da existência de veios carbonatados em ambos os casos.

Já na zona da brecha vulcânica no ponto 7 havia algumas diferenças relativamente à brecha vulcânica encontrada na área de estudo. A primeira e a mais evidente é que, no tarolo de sondagem, a brecha era consistente apesar de possuir uma resistência média a baixa, enquanto a brecha do ponto 7 praticamente se desfazia ao toque. Tal justificação pode se dever

ao facto de, no caso do ponto de campo, esta aflorar, estando sujeita à ação dos agentes de erosão e meteorização, o que fará com que a resistência da rocha diminua comparativamente à brecha em profundidade. Outra dissemelhança é a cor da brecha vulcânica que, em alguns locais onde aflora no ponto 7, é diferente relativamente à rocha encontrada no local de estudo, apresentando esta última, tons mais avermelhados principalmente no cimento (aparentando oxidação). Na zona mais central do ponto 7 foi possível observar as mesmas tonalidades vermelhas, podendo esta característica ser apenas um fator que está relacionado com a maior sensibilidade da rocha à oxidação em certos locais.

Por fim, o nível correspondente ao basalto fraturado é sem dúvida o que tem maior representação nos diversos locais, podendo ser encontrado em 2 dos pontos visitados. Não obstante, em todos os locais, há diferenças visíveis e não há uma correspondência tão clara como os níveis anteriores. Em todos os pontos de campo o material rocha era semelhante ao recolhido no local em estudo, correspondendo a um basalto cinzento com resistência média e, em alguns locais, elevada. Do ponto de vista da fraturação é onde se encontram as maiores diferenças de ponto para ponto e na área de estudo. Ora, no ponto 3, existem predominantemente fraturas subverticais preenchidas e com espaçamento da ordem dos 60 cm a 2 m, formando autênticas colunas de basalto de elevadas dimensões. Neste local também se encontram fraturas subhorizontais, mas com espaçamento mais regular e da ordem dos cm, ficando cortadas pelas fraturas subverticais. No ponto 6, a família predominante neste local é a subhorizontal, possuindo um espaçamento superior e menor persistência, e a existência de fraturas subverticais é escassa. Nesta subárea do ponto 6 a família subvertical tem menos expressão e não forma grandes colunas como no ponto 3.

5.2. Associação entre meios de fluxo subterrâneo e as unidades definidas

Com base nas associações feitas entre os níveis encontrados nas sondagens e os locais no campo visitados, foi possível relacionar um tipo de comportamento do maciço fraturado descrito no subcapítulo 2.2.3.4 com cada um dos níveis das sondagens. Com o conhecimento adquirido no campo das propriedades de cada formação encontrada, para além dos ensaios *in situ* e em laboratório, consegue-se aferir o seu comportamento do meio em termos de fluxo subterrâneo. Desta forma, considerou-se a seguinte associação:

- **Piroclastos consolidados - Meio de porosidade dupla:** como foi observado no campo, este nível do CVL consiste num nível argiloso de cor avermelhada que cobre o basalto fraturado. Para além disso, esta possui veios carbonatados semelhantes em termos de parâmetros das descontinuidades, principalmente em espaçamento e orientação. De acordo com a *Contaminated Site Clean-Up Information* (2023), os depósitos piroclásticos consolidados classificam-se como um meio fraturado com porosidade baixa na matriz (NASEM, 2015), sendo que, no transporte de contaminantes nesta configuração, existem apenas efeitos de difusão

limitados na matriz, e o principal meio de transmissividade é a porosidade secundária causada pela fraturação (embora as fraturas possam, ou não, estar conectadas ou preenchidas). Assim, como a matriz tem uma permeabilidade muito baixa, adicionando à possível dificuldade na dissolução dos veios de carbonato de cálcio, dada o baixo grau de pureza observado (contém outras substâncias para além do carbonato de cálcio) confirma-se que este nível do CVL terá um comportamento semelhante ao de um meio de porosidade dupla, em que, tal como a matriz, as fraturas terão uma permeabilidade baixa.

- **Brecha vulcânica - Meio de porosidade dupla:** a brecha vulcânica, como foi previamente referido, é constituída essencialmente por uma matriz argilo-siltosa que une blocos de basalto vesicular. No campo, esta apresentava-se muito alterada (com grau W_4), ao ponto de não ter sido possível recolher uma amostra, aspeto já constatado em outros trabalhos (PEREIRA, 2018). Ora, quer o cimento quer a matriz, em condições de alteração baixa, possuem ambos uma permeabilidade baixa, mas na presente situação, como a alteração é elevada, a rocha apresenta uma porosidade considerável, adquirindo a capacidade de se deixar penetrar pelo contaminante. Apesar da porosidade ser alta neste meio, a transmissividade é baixa, ou seja, o contaminante, quando passar pela rocha fixa-se, mas não irá dispersar-se por entre a rocha, salvo a existência de algum caminho preferencial. Desta forma, e à semelhança dos piroclastos consolidados, a associação do comportamento hidrogeológico deste nível do CVL com o de um meio de porosidade dupla, será o mais adequado.
- **Basalto fraturado - Meio puramente fraturado:** contrariamente aos níveis anteriormente descritos, o basalto fraturado consiste numa rocha compacta com fraturas que se encontram ou não preenchidas. Abordando, em primeiro lugar, o comportamento do material rocha, comprovou-se nos ensaios de laboratório e *in situ* que este possui uma resistência relativamente elevada e uma porosidade baixa. Logo, para além da rocha não ter a capacidade de permitir a passagem de contaminante, igualmente não conseguirá captar esse contaminante, sendo considerado um meio impermeável e não transmissível de qualquer tipo de fluido. Passando agora para as descontinuidades que se encontram impregnadas no material rocha, como foi mencionado, as fraturas, quando abertas, proporcionam um caminho preferencial e uma transmissividade favorável para a circulação de contaminante, sendo a principal forma de circulação deste ao longo de toda a área de estudo. Apesar disto, quando as fraturas possuem enchimento, esse facto dificulta ou, por vezes, bloqueia por completo a sua migração. No presente caso, possui-se um preenchimento de origem carbonatada cuja reação de dissolução não é conclusiva quanto ao facto de o preenchimento conseguir reagir por completo com os fluidos que irão circular no maciço. Como em caso de dúvida, deve-se sempre estar do lado da segurança, a pior das situações seria se o cimento ficasse dissolvido e deixasse percolar o contaminante, tornando assim,

as fraturas com preenchimento mais uma rede de vias preferenciais para a movimentação de contaminante. Posto isto, e analisando os tipos de meios de fluxo subterrâneo apresentados, é evidente que se considera um meio puramente fraturado.

Em termos do que são as propriedades hidrogeológicas de cada nível, pode-se caracterizar cada um consoante o seu meio hidrogeológico já associado. No caso dos piroclastos consolidados que foram considerados como apresentando um comportamento hidrogeológico comparável com o meio de porosidade dupla, o fluxo de contaminação irá ser semelhante ao encontrado em meios porosos. Desta forma, o contaminante migra em profundidade até atingir o nível freático, o trajeto por onde este vai circular será preferencialmente para os espaços vazios, sendo eles os poros do material piroclástico ou até possíveis espaços vazios provocados pela alteração dos veios carbonatados. Nesta unidade em particular, o material constituinte dos piroclastos é argilo-siltoso, portanto, apesar da porosidade ser elevada, a permeabilidade é muito reduzida. Assim, o principal mecanismo de transporte será a difusão, já que a advecção/convecção será insignificante devido à baixa permeabilidade do meio e a dispersão ocorrerá de forma pouco expressiva devido à falta de caminhos preferenciais abertos (fraturas). A difusão vai ser, portanto, um processo relevante para caracterizar o transporte do contaminante neste meio, isto porque, devido ao tipo de material deste nível, o LNAPL vai se fixar nos pequenos poros e perde concentração à medida que este avança em profundidade. Sendo assim, vai haver uma atenuação natural neste nível em particular, que vai, em última instância, contribuir para a remediação da área de estudo. É de realçar o facto de este ser o primeiro nível do CVL, o que significa que a contaminação vai migrar de forma relativamente isotrópica e atenuar-se à medida que vai atingindo maiores profundidades, dificultando a sua propagação.

Passando para um nível com características semelhantes ao descrito anteriormente, a brecha vulcânica com o seu estado de alteração elevado, vai apresentar uma porosidade igualmente alta. De igual modo, com os veios carbonatados presentes nos piroclastos consolidados, o cimento desta unidade é principalmente carbonatado, apesar de, em estados mais avançados do seu desenvolvimento, apresentar, em muitas situações, calcite na forma cristalina. Devido a este facto, a contaminação vai-se infiltrar neste nível e evoluir de forma semelhante ao nível dos piroclastos, com uma diferença que pode ser significativa. Ora, o elevado estado de alteração que este nível apresenta, leva a que a porosidade aumente e conseqüentemente a permeabilidade, fazendo com que seja possível existir algum transporte por advecção/convecção, podendo a contaminação movimentar-se até pontos mais distantes na área de estudo. Quanto à dispersão e difusão, a sua importância e comportamento serão parecidos com o que foi descrito sobre o nível dos piroclastos consolidados, ou seja, a dispersão poderá também ser superior devido a uma maior permeabilidade que o meio apresenta e a difusão será igualmente significativa, pois a alteração vai atenuar a contaminação devido ao aumento da porosidade.

No que se refere ao nível do basalto fraturado associou-se este a um meio puramente fraturado, ou seja, só existe circulação de fluidos por entre as fraturas existentes na rocha. Aqui, em termos de migração do contaminante, vai ser francamente anisotrópica e os parâmetros das fraturas vão ditar qual o sentido, velocidade e profundidade que este vai percolar. Como foi afirmado anteriormente, o transporte por advecção/convecção é o principal processo de transporte em maciços fraturados e, neste meio em particular, é onde isso é mais evidente. O contaminante vai movimentar-se apenas pelas fraturas longitudinal e transversalmente e não vai existir praticamente difusão devido ao facto de a rocha ser compacta e impermeável. Quanto à dispersão, esta vai existir se parte do LNAPL existente no maciço intersetar uma descontinuidade que o desvie da sua trajetória preferencial, podendo esta ramificação de contaminante percorrer grandes distâncias se continuar a intersetar outras fraturas. Este meio é sem dúvida aquele que representa um maior risco de contaminação da área, porque não há atenuação natural dada a impermeabilidade da rocha e porosidade praticamente inexistente, e ao facto de existirem redes de fraturas que se podem interligar e criar caminhos de fluxo de contaminação que podem atingir vários pontos da área de estudo ou até para fora dos limites da área de estudo.

No que toca à determinação de propriedades hidrogeológicas como a condutividade hidráulica, de acordo com as equações 5, 6, 7 e 8 é necessário determinar parâmetros relacionados com o meio e com o fluído circulante. Quanto aos parâmetros do fluído, quer em meio com porosidade dupla, quer em meio puramente fraturado, é necessário conhecer-se a sua viscosidade dinâmica (μ) e a sua densidade (ρ). Para averiguar tais valores deve-se recorrer a análises químicas ao contaminante. No que toca à determinação de parâmetros extrínsecos, ou seja, relacionados com o maciço, podem-se dividir entre os dois meios descritos. Relativamente ao meio de porosidade dupla, tem de se averiguar a permeabilidade intrínseca, e para o meio puramente fraturado basta conhecer a abertura das fraturas e espaçamento médio por família (que se determinou previamente no levantamento de descontinuidades).

Definidos os tipos de meios de fluxo subterrâneo a associar a cada nível do CVL, resta criar o modelo conceptual da contaminação em análise que vai ser a ferramenta mais útil para visualizar de forma simplificada a evolução do contaminante na área de estudo. Posteriormente, com o modelo e a informação do comportamento de cada nível em termos de fluxo hidrogeológico, a caracterização do maciço fraturado ficará completa.

MODELO CONCEPTUAL DA CONTAMINAÇÃO

O objetivo principal desta dissertação é a construção de um modelo geológico conceptual que ilustre esquematicamente e de forma simples o sistema de fluxo subterrâneo da contaminação num maciço rochoso fraturado. Desta forma, cria-se uma ferramenta visual que facilite a compreensão do comportamento que a contaminação assume, dependendo do nível do CVL em que esta se encontrar. A construção deste modelo tem como base dois elementos importantes: a hipsometria da região em estudo, e o material geológico encontrado nas sondagens efetuadas no local. Para este efeito, a hipsometria foi adquirida com base num modelo digital de terreno (MDT) de Portugal Continental com uma resolução de 2 m.

6.1. Construção do Modelo Conceptual de base

Primeiramente deve-se construir o modelo com os limites da área de estudo e suas respectivas cotas ao longo de toda a extensão do mesmo. Para tal foi necessário um MDT para que se conseguisse aferir a hipsometria da região, e uma *shapefile* que delimitasse a área de estudo. Com o recurso a *software* de modelação 3D, nomeadamente, o Leapfrog® Geo, obteve-se um modelo geológico com a forma da área de estudo e respectivas cotas, que se encontra ilustrado na Figura 6.1.

Para conceber este modelo, fez-se em primeiro lugar o *input* da topografia da área de estudo, que neste caso é o MDT. Posteriormente, utilizou-se a *shapefile* dos limites geográficos da área de estudo para recortar o MDT e, assim, obteve-se os limites superiores do modelo geológico. Para terminar, apenas resta definir os limites do modelo que correspondem aos da superfície topográfica delimitada pela área de estudo. O *output* será um modelo geológico 3D de base onde apenas estão representadas as características altimétricas e a forma da área em estudo.

Como se pode observar, a forma da área de estudo é a de um prisma irregular cujo declive diminui de oeste para este. A cota máxima da superfície da área de estudo é de 68 m, encontrando-se, no extremo oeste, e a mínima é de 51 m e localiza-se no extremo este do modelo. Note-se que o modelo varia entre 38 m e 68 m de cota, isto porque corresponde ao limite

inferior da sondagem localizada à cota mais baixa, neste caso à dos 38 m. A superfície da área de estudo possui cerca de 35 766 m² e todo o modelo tem 735 104 m³.

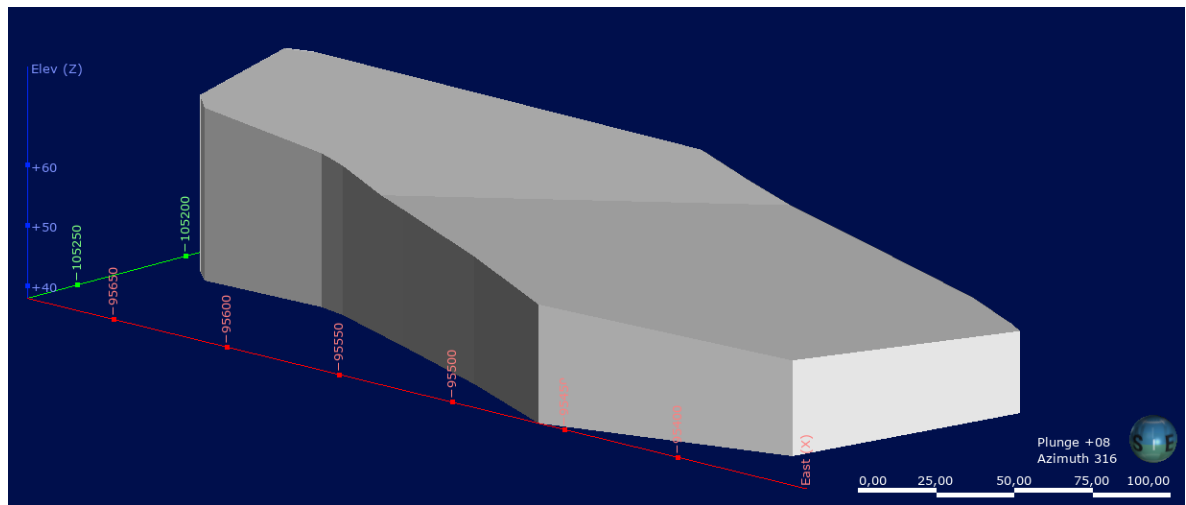


Figura 6.1 - Modelo Geológico 3D da área de estudo (construído com Leapfrog Geo)

Numa fase inicial de elaboração do modelo geológico de contaminação, a criação de um bom modelo de base com os seus limites laterais, superiores e inferiores é essencial, porque, com um modelo defeituoso ou que não corresponda à realidade, o *software* irá consequentemente produzir resultados errados para os limites dos níveis na próxima fase. Nas etapas seguintes, o objetivo é definir os limites dos níveis através da extrapolação dos dados das sondagens efetuadas no local.

6.2. Limitação dos níveis definidos do CVL

De forma a tornar simples a extrapolação dos limites superiores e inferiores de cada nível do CVL definido previamente, consoante a descrição de cada troço da sondagem, categorizou-se cada um deles com uma das unidades definidas: piroclastos consolidados, brecha vulcânica e basalto fraturado. A partir da delimitação destas unidades obtiveram-se os seguintes *logs* de sondagem da Tabela 6-1, com os respetivos limites inferiores e superiores em m.

As sondagens foram efetuadas ao longo da área de estudo e em diferentes cotas, tornando possível a determinação dos limites dos níveis na área de estudo com recurso ao *software* Leapfrog Geo. O que este *software* vai fazer é extrapolar a continuidade lateral de cada nível na área de estudo com base nos resultados obtidos pelas sondagens. É evidente que se deve ter em conta de que se trata de uma extrapolação e o resultado final pode não refletir, na sua totalidade, os limites reais dos níveis do CVL, apenas é uma aproximação da realidade com base em dados obtidos.

Tabela 6-1 - Logs das Sondagens no local com associação às unidades definidas, com a respectiva legenda de cores

PZ01		PZ02	
Descrição	Prof (m)	Descrição	Prof (m)
Aterro	0,0 - 2,0	Aterro	0,0 - 2,0
Piroclastos	2,0 - 4,5	Piroclastos	2,0 - 5,5
Basalto fraturado	4,5 - 7,6	Basalto com veios	5,5 - 7,0
Rocha vulcânica arenisada	7,6 - 11,0	Brecha	7,0 - 9,0
Brecha	11,0 - 12,0	Basalto menos fraturado	9,0 - 12,0
PZ03		PZ04	
Descrição	Prof (m)	Descrição	Prof (m)
Aterro	0,0 - 1,0	Aterro	0,0 - 4,0
Piroclastos	1,0 - 4,5	Basalto cinzento	4,0 - 8,0
Basalto fraturado + Brecha	4,5 - 6,0	Brecha	8,0 - 9,0
Brecha	6,0 - 7,5	Basalto fraturado	9,0 - 12,0
Basalto menos fraturado	7,5 - 12,0		
PZ04-2		PZ05	
Descrição	Prof (m)	Descrição	Prof (m)
Aterro	0,0 - 1,0	Aterro	0,0 - 9,0
Piroclastos	1,0 - 4,5	Silte vermelhado com basalto	9,0 - 12,0
Basalto fraturado + Brecha	4,5 - 6,0	Brecha	12,0 - 15,6
Brecha	6,0 - 7,5	Basalto com veios	15,6 - 18,0
Basalto menos fraturado	7,5 - 12,0		
PZ06		PZ07	
Descrição	Prof (m)	Descrição	Prof (m)
Aterro	0,0 - 1,5	Aterro	0,0 - 1,5
Piroclastos	1,5 - 5,0	Piroclastos	1,5 - 7,5
Basalto com veios	5,0 - 10,4	Brecha	7,7 - 11,0
Brecha Vulcânica	10,4 - 15,4	Basalto com veios brancos	11,0 - 12,0
Basalto fraturado	15,4 - 18,8		
PZ08		PZ09	
Descrição	Prof (m)	Descrição	Prof (m)
Aterro	0,0 - 1,5	Aterro	0,0 - 1,5
Piroclastos	1,5 - 6,7	Piroclastos	1,5 - 9,0
Brecha	6,7 - 7,5	Brecha	9,0 - 10,0
Basalto com veios brancos	7,5 - 10,7	Basalto fraturado	10,0 - 12,0
Brecha	10,7 - 12,0		

Aterro
Piroclastos Consolidados
Brecha Vulcânica
Basalto fraturado ou com veios

De modo a representar os limites dos níveis no modelo geológico de base, deve-se fazer o *input* das sondagens com a informação necessária para a sua representação no modelo (coordenadas x, y e z, profundidade e orientação das sondagens, limites de cada nível e respetiva catalogação). O *output* será a representação gráfica das sondagens dentro do modelo geológico, como se encontra ilustrado na Figura 6.2.

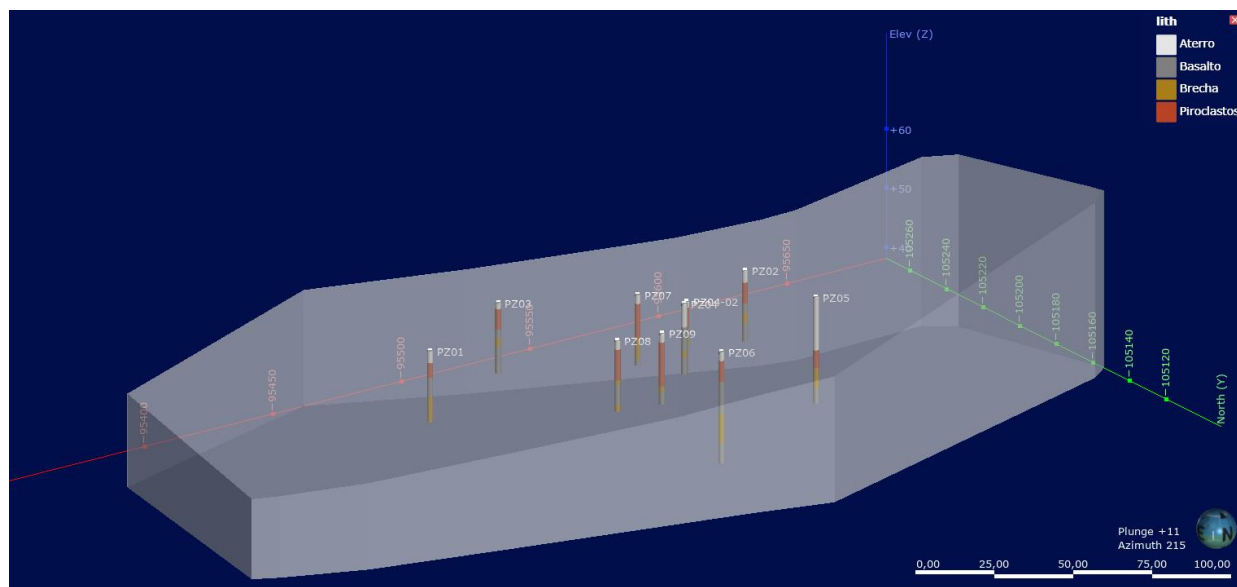


Figura 6.2 - Representação gráfica das sondagens efetuadas no local em estudo sobre o modelo geológico 3D de base

Com as sondagens já colocadas sobre o modelo 3D de base, apenas resta associar os limites dos níveis de cada sondagem a cada zona do modelo. O próprio *software*, com a inserção dos dados das sondagens, vai extrapolar a variação lateral e em profundidade dos diferentes níveis definidos, dentro dos limites espaciais do modelo de base. Para além disto é apenas necessário definir manualmente quais os níveis mais antigos e mais recentes do CVL, sendo a ordem, respetivamente, do mais antigo para o mais recente: Basalto, Brecha, Piroclastos, Aterro.

O resultado final será um modelo geológico com as dimensões da área de estudo nas direções x, y e z, com a definição dos limites de cada nível do CVL, estando representado em várias perspetivas nas Figura 6.3, Figura 6.4, Figura 6.5 e Figura 6.6. De notar, que as características relativas às discontinuidades em cada nível apenas serão representadas numa fase posterior

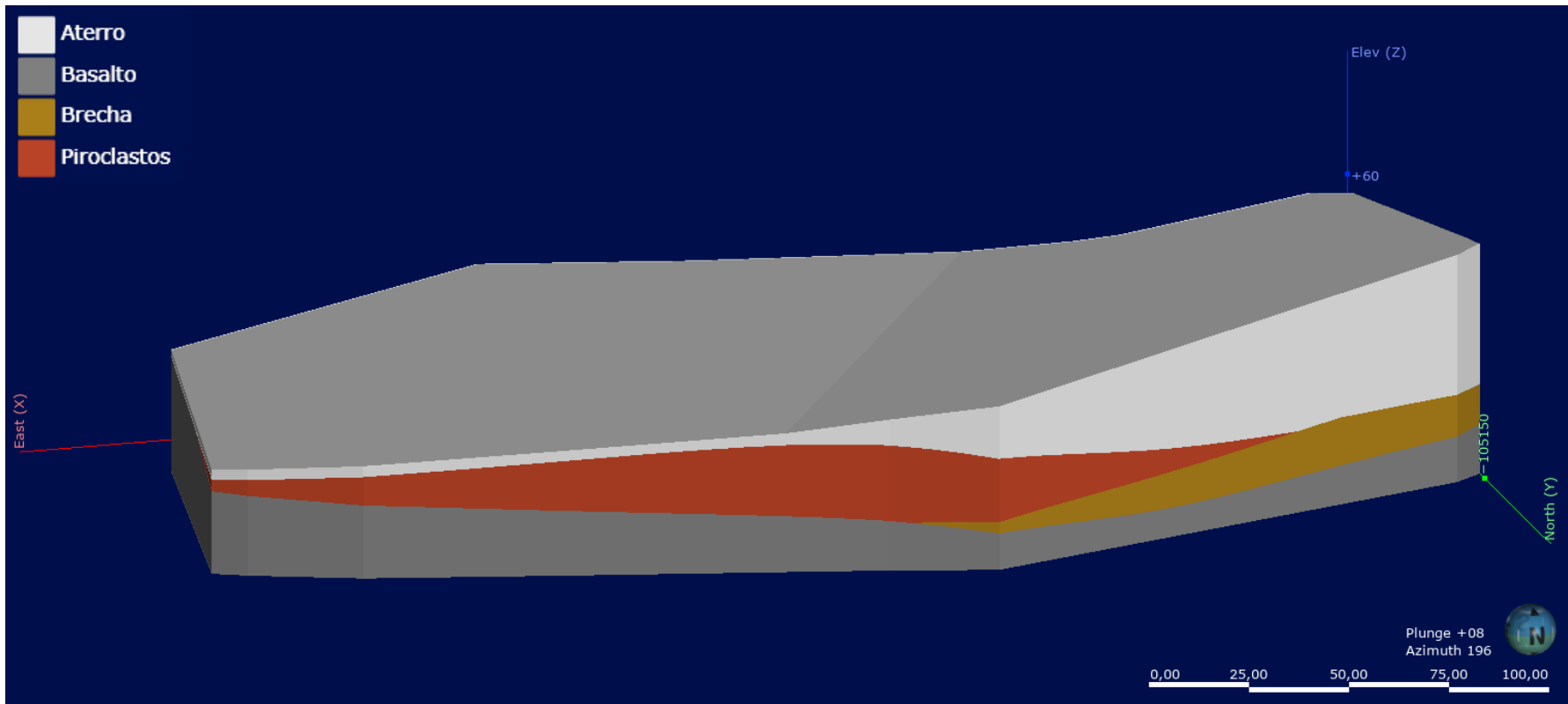


Figura 6.3 - Modelo geológico 3D da área de estudo com vista de norte

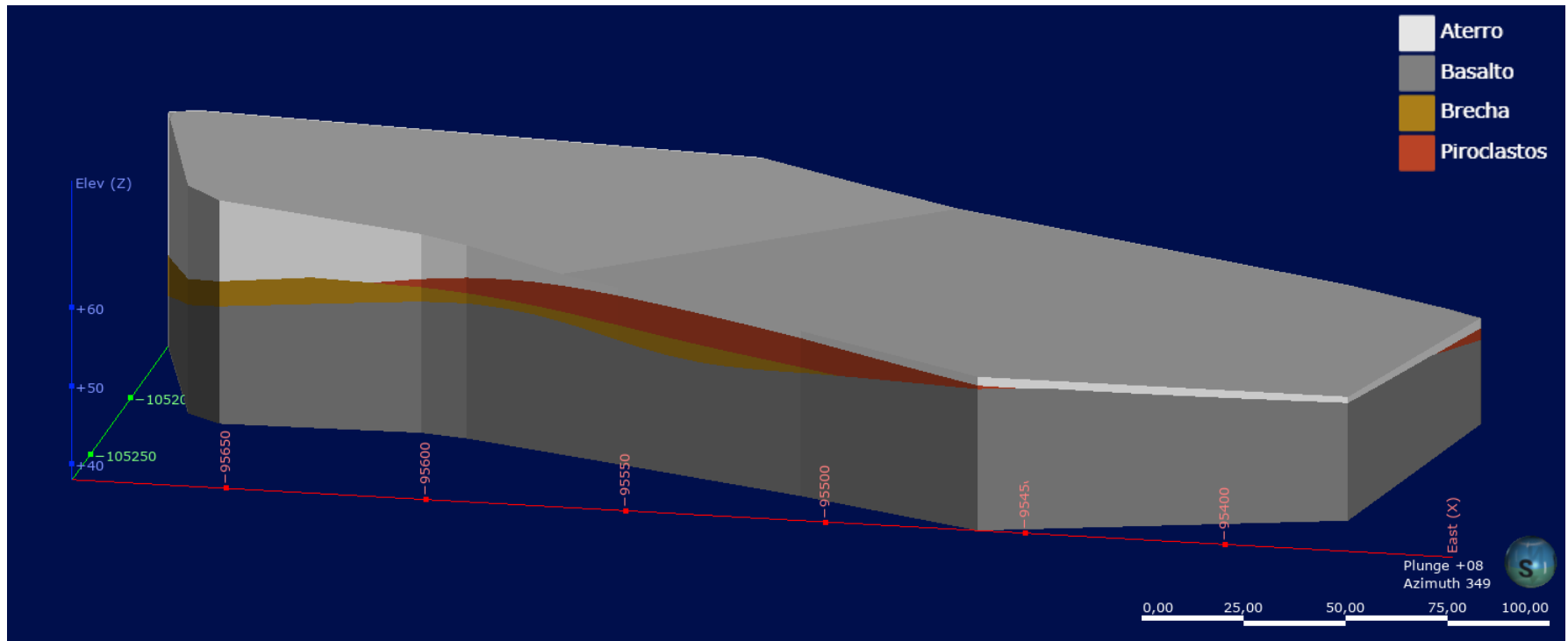


Figura 6.4 - Modelo geológico 3D da área de estudo com vista de sul

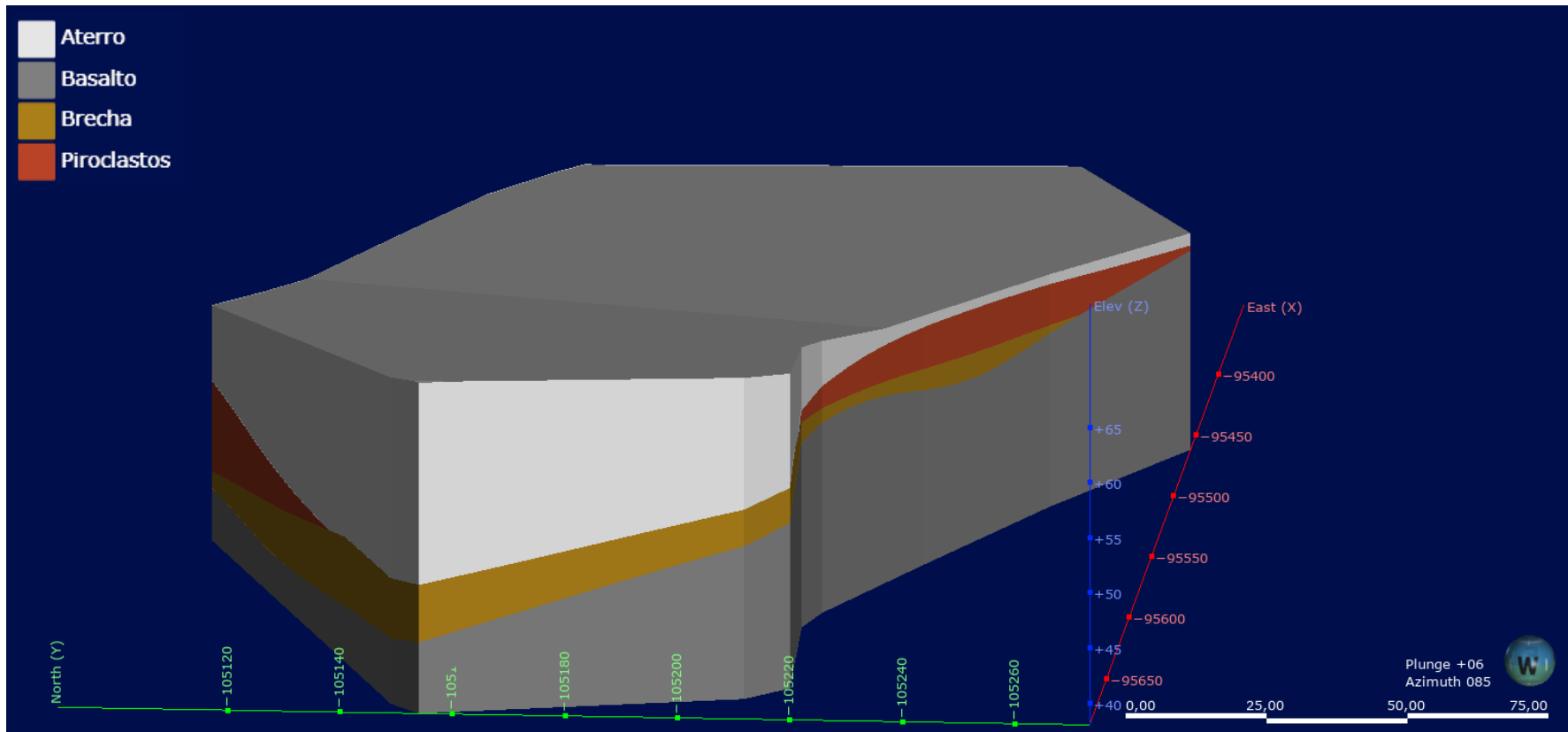


Figura 6.5 - Modelo geológico 3D da área de estudo com vista de oeste

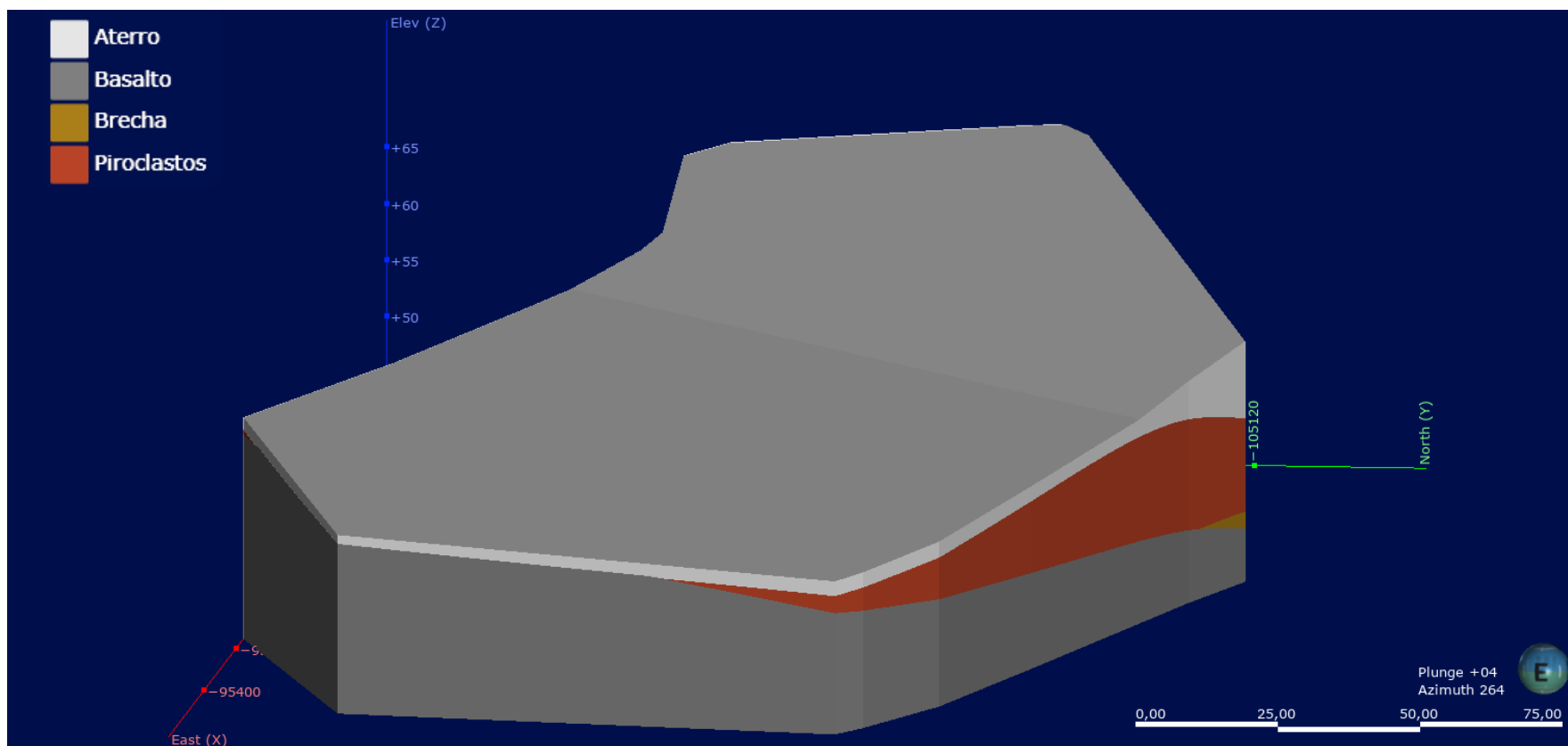


Figura 6.6 - Modelo geológico 3D da área de estudo com vista de este

À primeira vista, o nível do basalto é o predominante em termos de volume no local em estudo. Note-se também que os restantes níveis do CVL (piroclastos e brecha) não afloram na totalidade da área de estudo, e que predominam na zona oeste, diminuindo progressivamente com a cota até ao extremo este. Apesar de não constituir um nível do CVL, está também representado a camada mais superficial correspondente ao aterro, que cobre toda a área de estudo.

Observando a Figura 6.7, verifica-se que o basalto fraturado é sem dúvida a unidade com maior expressão, representando mais de metade do volume total do local em estudo. Para além disto, a espessura do basalto diminui de sul para norte, não estando concordante com a diminuição do declive do local de estudo. Com 20% do volume do local em estudo, o aterro tem a sua maior espessura no extremo oeste, e diminui suavemente até chegar ao limite este. Já os piroclastos consolidados representam uma pequena porção do volume total, sendo mesmo assim o segundo nível com maior expressão. Este nível encontra-se em toda a área de estudo com exceção do extremo oeste e sudeste, e apresenta-se como uma camada fina que aumenta de espessura de sul para norte. Por fim, o nível que apresenta volume mais reduzido é a brecha vulcânica que apenas representa 6% de todo o local de estudo. Este nível apenas aflora na metade oeste da área de estudo e a sua espessura é relativamente uniforme em todas as direções.

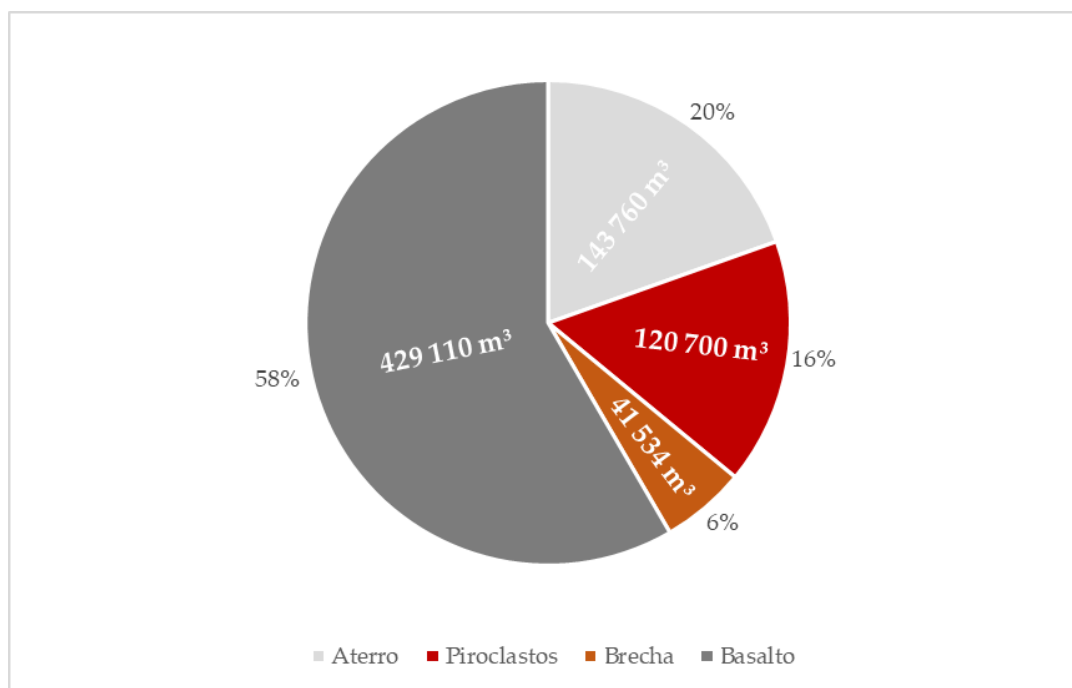


Figura 6.7 - Gráfico ilustrativo da distribuição dos diferentes níveis do CVL e do aterro na área de estudo em m³

Se se analisar as percentagens dos diversos níveis do local em estudo em termos do seu comportamento hidrogeológico, ou seja, agrupar os piroclastos consolidados e a brecha vulcânica como um meio de porosidade dupla e o basalto como um meio puramente fraturado (ignorando a presença do aterro pois não constitui um meio hidrogeológico evidente) as proporções de cada um vão sofrer alterações. Posto isto, e assumindo que todo o volume consiste

apenas nos dois meios mencionados anteriormente, a percentagem de basalto, ou seja, de rocha considerada um meio puramente fraturado, corresponde a cerca de 72,5% do local de estudo (considerando que o volume total corresponde apenas aos níveis do CVL, sem o aterro) e o material considerado um meio de porosidade dupla, ou seja os piroclastos consolidados e a brecha vulcânica, corresponde a cerca de 27,5% do local de estudo. Assim, o meio puramente fraturado tem uma expressão bastante superior ao meio de porosidade dupla, havendo uma maior probabilidade do contaminante circular por entre este meio.

6.3. Caracterização das descontinuidades por nível do CVL

Como foi referido previamente, o modelo geológico 3D gerado não tem em consideração as descontinuidades de cada nível, mas apenas a localização dos mesmos e os seus limites em todo o volume do local de estudo. Ora, de modo a tornar o modelo conceptual o mais realista possível, deve ter-se em consideração as descontinuidades que constituem cada nível que foram caracterizadas e estudadas nos trabalhos de campo (como está descrito no capítulo 4).

Nesta fase, terão de se acrescentar as descontinuidades com base nos resultados obtidos em capítulos anteriores, ou seja, as características aferidas relativamente aos parâmetros das descontinuidades, serão adotadas no modelo. Como não existem dados sobre a localização das fraturas na área de estudo, o *software* Leapfrog Geo não tem a capacidade de reproduzir as mesmas no modelo, isto porque, como foi explicado, só é possível produzir elementos geológicos no programa se estes tiverem coordenadas x, y e z. Como tal, a melhor solução encontrada para que haja simplicidade e rigor, é através do desenho manual sobre o modelo, através de programas de desenho digitais.

6.3.1. Caracterização das descontinuidades nos piroclastos consolidados

Este nível, como foi averiguado previamente, é constituído essencialmente por piroclastos consolidados com textura argilo-siltosa onde se encontram impregnados veios de composição carbonatada. Na sua generalidade, estes veios são subverticais e, em menor quantidade, existem também veios subhorizontais. Olhando agora somente para os veios, e com base nas percentagens obtidas para cada parâmetro no subcapítulo 4.2.2.1 (que diz respeito ao ponto 6, o único local onde foi encontrado em afloramento este nível), transpôs-se para as dimensões do modelo geológico 3D as características deste nível relativamente às suas descontinuidades. O modelo obtido com o nível dos piroclastos consolidados caracterizado por completo encontra-se nas Figura 6.8 e Figura 6.9.

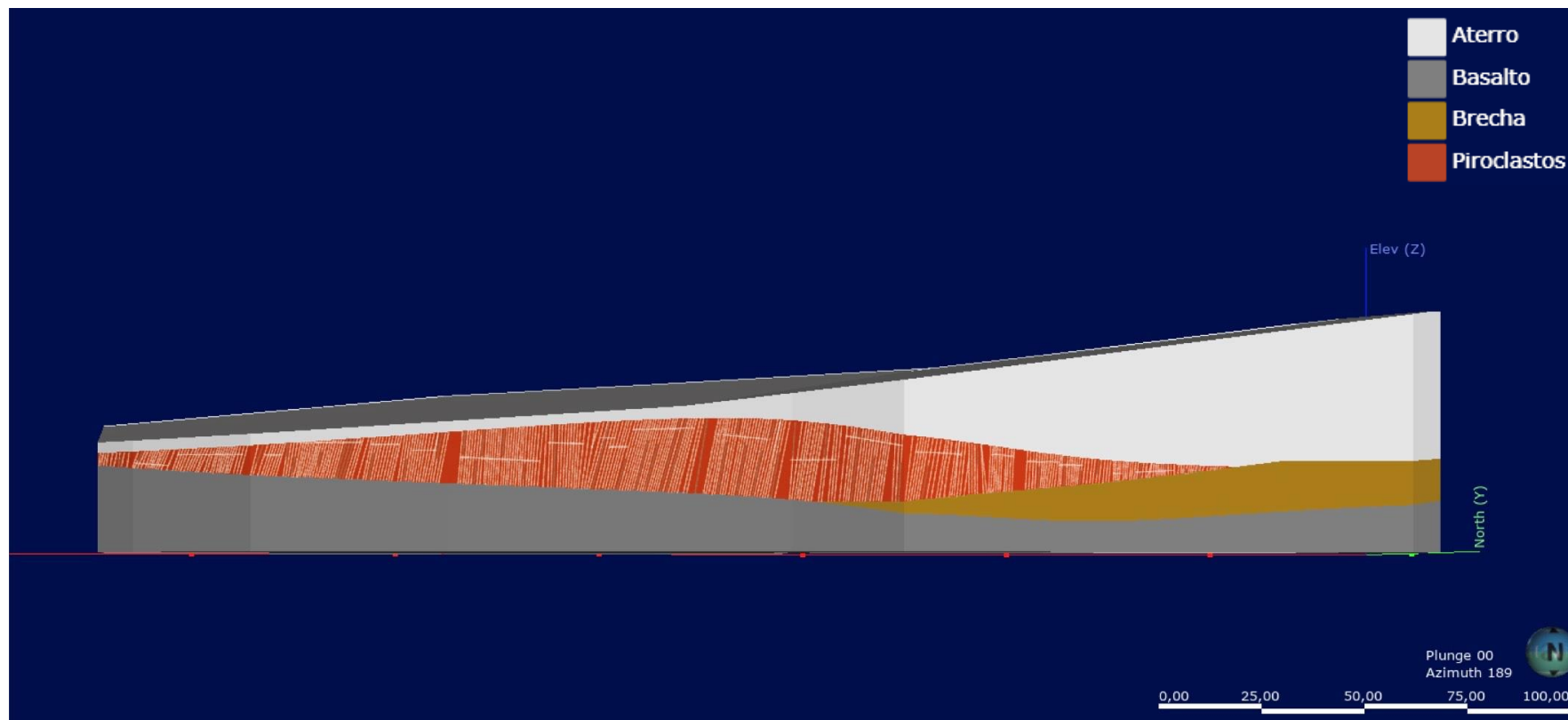


Figura 6.8 - Modelo geológico 3D com o nível dos piroclastos consolidados completamente caracterizado, vista de norte

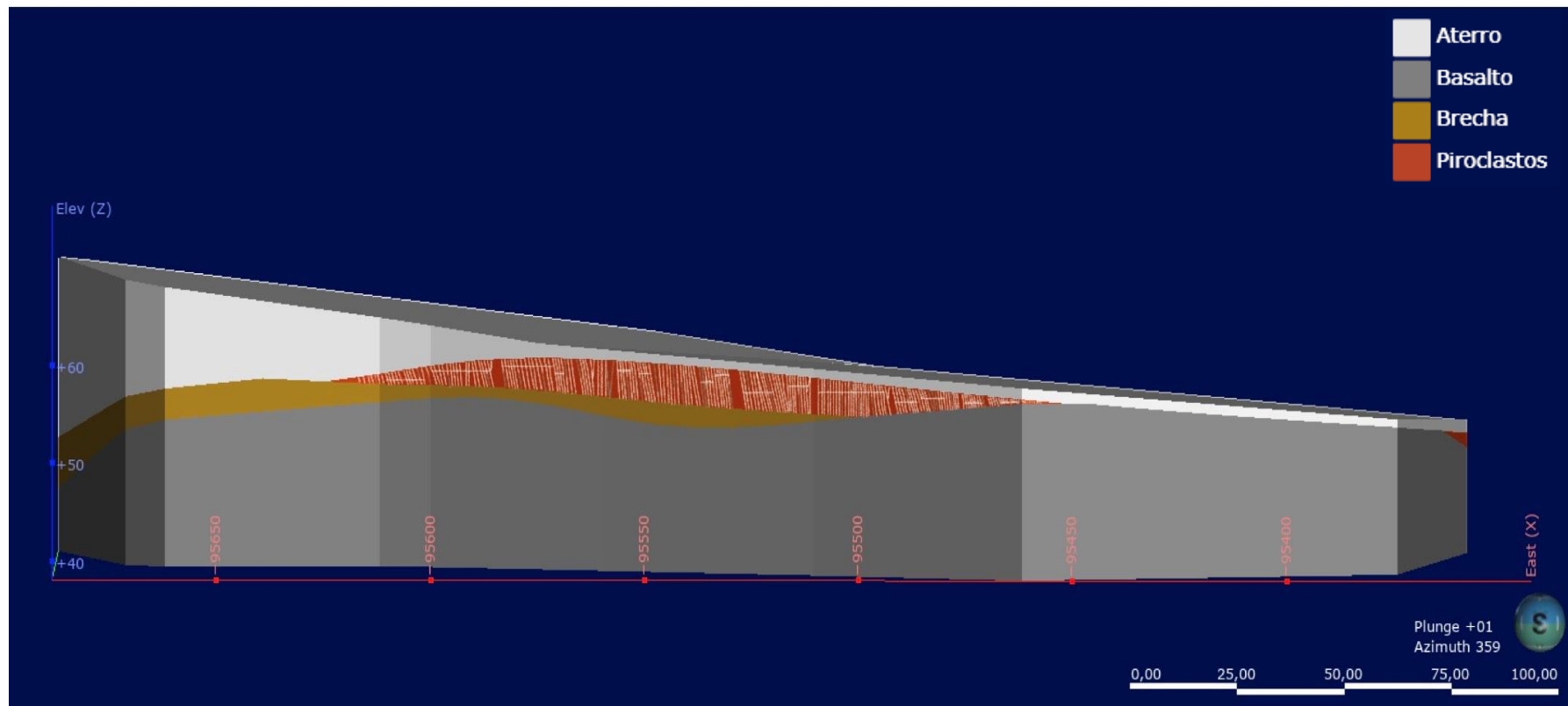


Figura 6.9 - Modelo geológico 3D com o nível dos piroclastos consolidados completamente caracterizado, vista de sul

Como se verificou nos modelos geológicos incompletos, apenas no lado norte e no lado sul é que é visível o nível dos piroclastos consolidados, tendo sido estas as vistas utilizadas para completar com as descontinuidades. Devido a questões de escala, não foi possível representar dois parâmetros das descontinuidades no modelo, neste caso a abertura e a rugosidade. Devido ao facto destes dois assumirem categorias da ordem dos poucos cm, não se conseguiu transpor para o modelo.

Passando para os parâmetros que se representaram no modelo, começando com a atitude, no ponto 6, verificou-se que apenas existia uma família de descontinuidades, sendo esta subvertical, levemente inclinada para sudoeste; daí ter-se colocado todas as fraturas inclinadas para esse quadrante, umas mais que outras, pois foi o que se observou no campo. No caso do espaçamento, é sem dúvida o parâmetro com maior expressão tendo sido necessária uma transposição das percentagens obtidas de cada classe de espaçamento no comprimento da *scanline* utilizada, para a dimensão do modelo. Isto refletiu-se num modelo em que existe uma grande quantidade de descontinuidades espaçadas entre 60 cm e 2 m, mas também entre 20 cm e 60 cm, e 2 m e 6 m. Quanto à persistência, apenas um quarto das descontinuidades possuía uma extensão inferior a 3 metros, sendo que as restantes poderiam rondar os 10 m. Sendo assim, como a altura máxima da porção visível do nível dos piroclastos é pouco mais de 9 m (e apenas na parte central da vista de norte), limitaram-se todas as descontinuidades com o topo do nível. Por fim, mais de 50% das descontinuidades amostradas apresentavam preenchimento de natureza carbonatada e as restantes, ou não tinham, ou em apenas certas partes se encontravam preenchidas.

De notar que tal como foi observado no ponto 3, existem algumas descontinuidades subhorizontais que se encontravam a cotas demasiado altas para serem amostradas, no entanto era prudente estarem representadas no modelo geológico final.

6.3.2. Caracterização das descontinuidades no basalto fraturado

No caso do basalto fraturado, este nível foi encontrado em dois dos pontos de campo. Este consiste num basalto com alguma alteração com fraturas subverticais e subhorizontais, possuindo ou não enchimento de natureza carbonatada. No que diz respeito às características das descontinuidades, estas foram analisadas e interpretadas nos subcapítulos 4.2.1 e 4.2.2.2, respetivamente nos pontos 3 e 6.

Contrariamente à unidade anterior, aqui, as descontinuidades do basalto fraturado vão ser caracterizadas no modelo geológico 3D com base em mais do que um resultado de um ponto de campo. As características alusivas às fraturas subhorizontais vão ter como base os resultados obtidos no ponto 6, onde foi possível averiguar com rigor os valores de cada parâmetro das descontinuidades, para além de que os resultados obtidos na breve abordagem às fraturas subhorizontais no ponto 3, são relativamente semelhantes aos do ponto 6. Como o único local onde foram amostradas fraturas subverticais foi no ponto 3, as percentagens de cada parâmetro das descontinuidades que vão ser transpostas para o modelo geológico 3D

vão dizer respeito exclusivamente às fraturas caracterizadas neste ponto. O modelo obtido com o nível do basalto fraturado caracterizado por completo encontra-se nas Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12 e Figura 6.13.

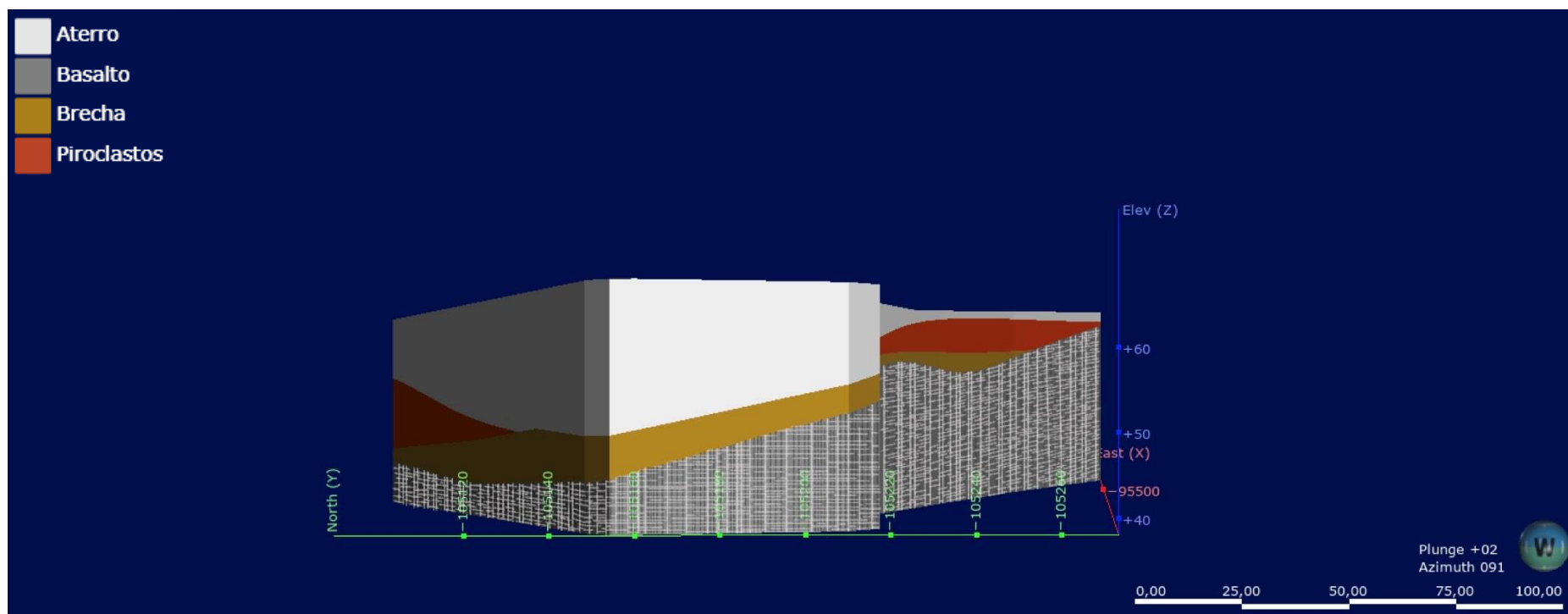


Figura 6.10 - Modelo geológico 3D com o nível do basalto fraturado completamente caracterizado, vista de oeste

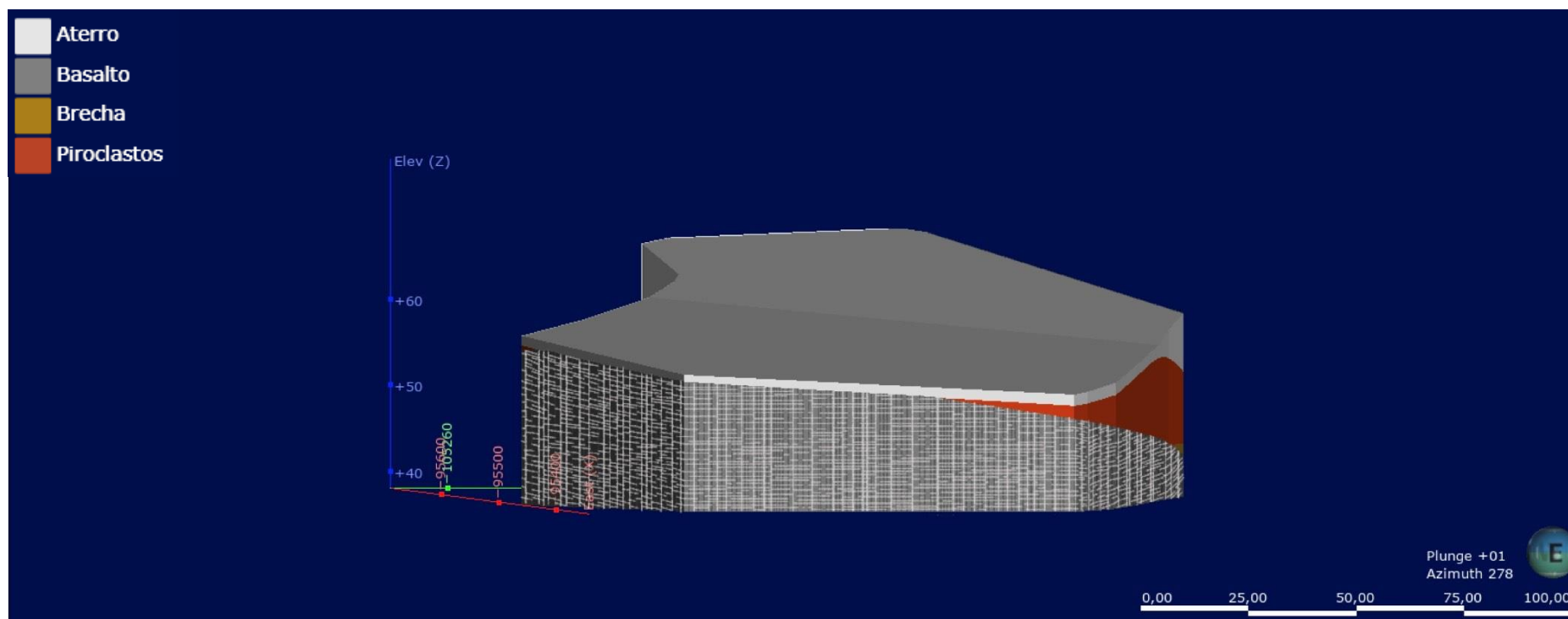


Figura 6.11 - Modelo geológico 3D com o nível do basalto fraturado completamente caracterizado, vista de este

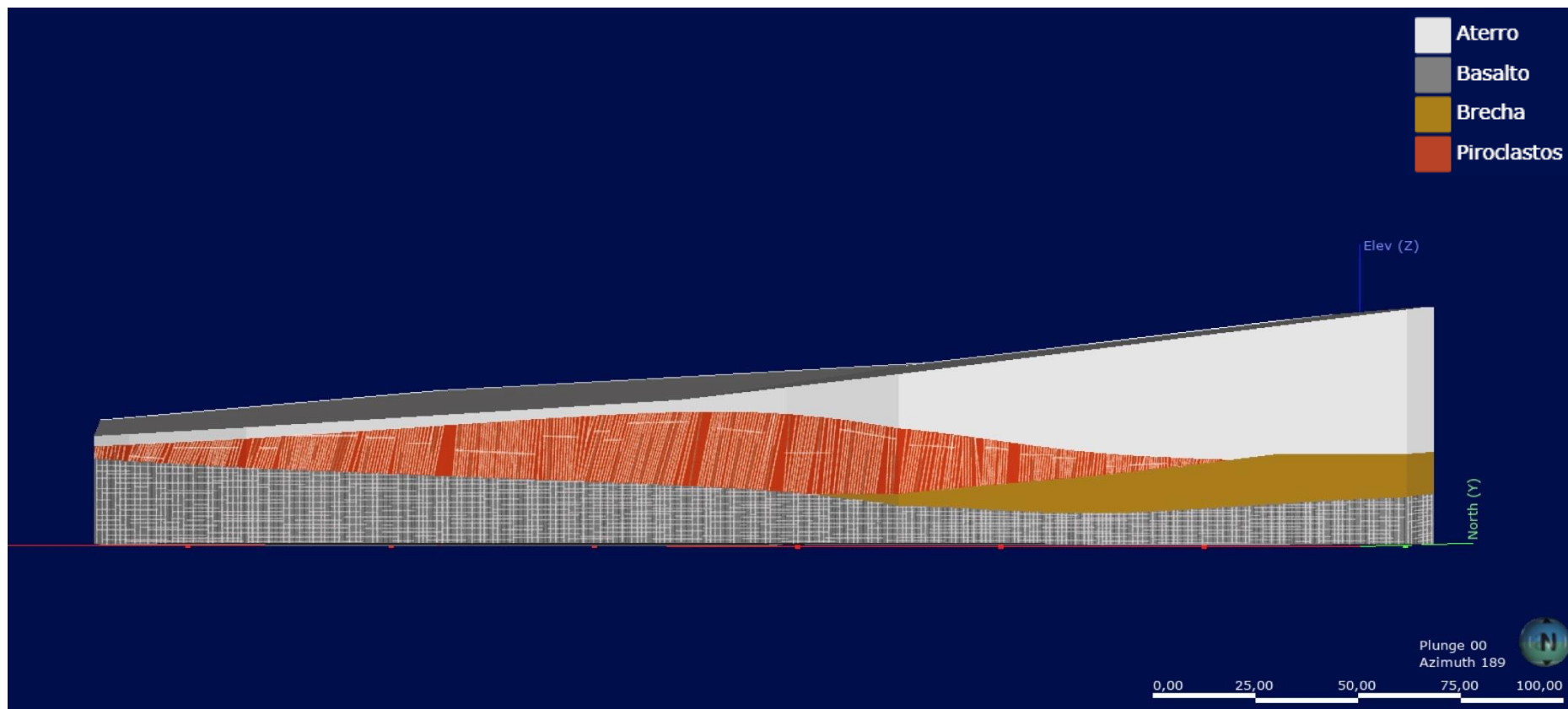


Figura 6.12 - Modelo geológico 3D com o nível do basalto fraturado completamente caracterizado, vista de norte

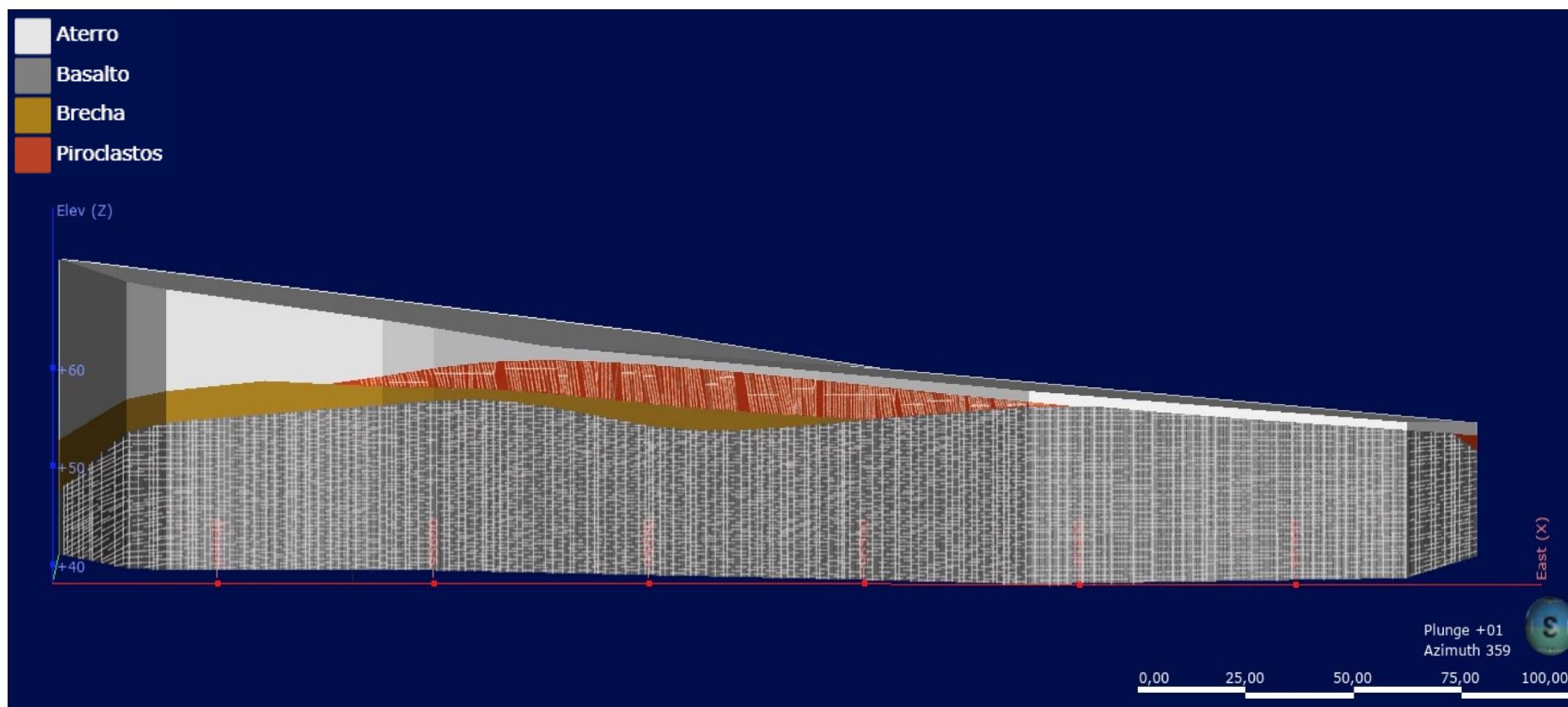


Figura 6.13 - Modelo geológico 3D com o nível do basalto fraturado completamente caracterizado, vista de sul

O basalto fraturado é a unidade do CVL que predomina na área de estudo, e é visível em todas as vistas, independentemente da orientação. Aqui, transpuseram-se os resultados dos parâmetros das descontinuidades do ponto 3 para caracterizar as fraturas subverticais, e as subhorizontais correspondem às descontinuidades amostradas no ponto 6.

Focando agora somente nas fraturas subverticais, tal como no nível dos piroclastos, houve dois parâmetros que, devido à escala do modelo, não foi possível ilustrá-los, sendo eles a abertura e a rugosidade das paredes das fraturas. As fraturas subverticais dividem-se em duas famílias (família 1 e família 2), com características semelhantes, apenas divergindo num parâmetro, sendo ele a rugosidade. Quanto ao espaçamento, na família 1 mais de metade das fraturas encontram-se "Espaçadas", correspondendo a um espaçamento de 60 cm a 2 m, seguidas de 23% destas serem "Extremamente Espaçadas" com valores de espaçamento superiores a 6 m. Já a família 2 tem a maior parte das fraturas com espaçamentos entre os 2 m e 6 m e pouco menos de um terço pertencentes à classe "Extremamente Espaçadas" e à classe "Espaçadas". Assim, os espaçamentos das duas famílias vão ser maiores que no nível dos piroclastos consolidados, notando-se especialmente na Figura 6.10, onde grande parte das fraturas estão espaçadas na ordem dos poucos metros.

Relativamente à persistência das fraturas subverticais, nas duas famílias as classes existentes são as mesmas, e as percentagens são muito semelhantes, ou seja, mais de 80% de todas as descontinuidades subverticais possuem uma extensão entre os 10 m e 20 m, e as restantes entre 1 m e 3 m, correspondendo às classes de persistência "Alta" e "Baixa" respetivamente. Ora, a espessura do nível do basalto fraturado oscila entre os 5 m e os 20 m, portanto é possível assumir que praticamente todas as descontinuidades subverticais têm uma persistência igual à espessura deste nível no modelo. O preenchimento é o parâmetro em que estas duas famílias possuem tendências opostas, em que uma tem enchimento (família 2) e outra não (família 1). Neste caso, como a família 1 tem uma maior densidade de fraturação que a família 2, as fraturas sem preenchimento vão ter uma expressão ligeiramente superior às que apresentam preenchimento de cor esbranquiçada.

Passando para as fraturas subhorizontais, apenas existe uma família cuja inclinação é baixa e todas apresentam preenchimento de natureza carbonatada. No que toca ao espaçamento, estas têm um valor inferior às fraturas subverticais, sendo na sua maioria "Espaçadas", ou seja, com um espaçamento entre 60 cm e 2 m, e 27% encontram-se inseridas na classe "Moderadamente Espaçadas", com 20 cm a 60 cm de espaçamento. As restantes fraturas possuem um espaçamento na ordem dos cm e, devido a isto, a escala do modelo não permite a sua representação rigorosa. Assim, grande parte das fraturas terão alguns cm de espaçamento, chegando até cerca de metro e meio. Por fim, a persistência destas descontinuidades também difere bastante dos valores que caracterizam as fraturas subverticais. Aqui, cerca de 60% possui uma persistência considerada "Baixa", ou seja, entre 1 m e 3 m, um terço tem uma extensão inferior a 1 m, ou seja, uma persistência "Muito Baixa", e apenas 7% das descontinuidades têm uma persistência "Média", com uma extensão entre 3 m e 10 m. Logo, o que vai estar ilustrado

no modelo, vão ser descontinuidades subhorizontais com uma persistência entre 3 m e até pouco mais de meio metro.

Com as descontinuidades de cada nível representadas no modelo geológico 3D, o modelo conceptual fica construído e caracterizado completamente, estando pronto a utilizar para resolver a problemática em estudo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer desta dissertação foram levantadas várias questões relativas à problemática em estudo. É neste capítulo que se avalia o cumprimento dos objetivos e se os resultados estão concordantes com o esperado. Um dos pontos de partida desta dissertação foi a conscientização de a acessibilidade aos documentos científicos, nomeadamente da temática em estudo, ser escassa. Para além disto, foi fundamental a participação numa formação direcionada para este tema para aumentar o conhecimento e melhorar também a acessibilidade a publicações científicas.

Outra ideia a realçar é a relevância de trabalhos desta natureza, ou seja, estudos com caráter de investigação, no meio empresarial, para além da comunidade científica. Por um lado, a comunidade científica tem todo o interesse na produção destes documentos pois aumenta o conhecimento sobre o estudo de maciços fraturados contaminados, em geral, e sobre o Complexo Vulcânico de Lisboa, em particular. No lado empresarial, a vantagem de requisitar estudos desta natureza é a complementação de uma perspetiva técnica com uma perspetiva científica, para além de que vai levar a que exista um elevado rigor e credibilidade no trabalho elaborado.

Inicialmente definiu-se a metodologia que se ia adotar para abordar este caso de estudo. Esta consistia principalmente na junção dos resultados adquiridos pelo levantamento de descontinuidades e pela determinação de propriedades índice das formações encontradas, de forma a conseguir atribuir-se um comportamento típico de um meio hidrogeológico a cada nível definido do CVL.

A partir dos dados de campo e laboratório, definiram-se 3 níveis distintos do CVL, piroclastos consolidados, brecha vulcânica e basalto fraturado. Apenas este último possuía características de meio puramente fraturado, já os dois primeiros podem comparar-se a meios de porosidade dupla. Desta forma, definiu-se que os meios de porosidade dupla terão um comportamento semelhante a um meio de porosidade equivalente, semelhante aos maciços terrosos, e o meio puramente fraturado apenas terá a capacidade de transmitir contaminante pelas suas fraturas. Portanto, no caso dos piroclastos consolidados e da brecha vulcânica, o comportamento do contaminante vai depender das propriedades do material rocha, como a

porosidade e a permeabilidade. No que diz respeito ao comportamento do contaminante no basalto fraturado, vai depender somente das características das fraturas que o constituem, principalmente da sua abertura, preenchimento, persistência e espaçamento. Em termos gerais, a anisotropia no basalto fraturado será superior à dos piroclastos consolidados e brecha vulcânica, devendo ser adotadas formas distintas de caracterizar a contaminação.

Foram reunidas equações que avaliam as propriedades hidrogeológicas do meio de porosidade dupla e do meio puramente fraturado. A partir destas equações definiram-se quais os parâmetros a determinar para obter a condutividade hidráulica e a permeabilidade intrínseca e concluiu-se que é necessário caracterizar as propriedades químicas do contaminante em estudo, para além da determinação de parâmetros das fraturas cujos valores são obtidos através do levantamento de descontinuidades no campo.

Por fim, já com as características dos meios bem definidas, bem como os parâmetros de cada nível, reuniram-se as condições necessárias para a elaboração de um modelo geológico da área de estudo. Através dos dados da área e altimetria do local foi possível criar um modelo de base com a representação do volume a analisar, e com a adição dos dados das sondagens, dividiu-se esse volume total em 4 níveis: Aterro, Piroclastos, Brecha e Basalto. Através da análise dos modelos obtidos, averiguou-se que mesmo só abrangendo um nível do CVL, o meio puramente fraturado é o dominante na área de estudo. Neste meio existem 3 famílias de fraturas principais, duas subverticais que se caracterizam pela sua elevada persistência, e uma subhorizontal que possui um espaçamento médio relativamente reduzido. Esta particularidade vai fazer com que se formem redes de fraturas com vários metros por onde o contaminante vai percolar.

Na eventualidade de se aprofundar este caso num estudo futuro, recomendar-se-ia a elaboração de ensaios e análises laboratoriais para determinar as propriedades intrínsecas dos níveis superficiais do CVL. Para além disto seria interessante efetuarem-se ensaios *in situ* de determinação da permeabilidade da zona do basalto fraturado de forma a completar a caracterização da permeabilidade deste meio (visto que só se sabe apenas a permeabilidade intrínseca da matriz e não das fraturas que o constituem). Assim, o modelo conceptual podia tornar-se num modelo numérico com valores reais de cada parâmetro hidrogeológico para cada nível do Complexo Vulcânico de Lisboa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, I. M. (1991). Características Geotécnicas dos Solos de Lisboa. Dissertação para a Obtenção do Grau de Doutor em Geologia;

ALMEIDA, J. A., et al. (2017, abril). Caracterização Geológica e Geotécnica dos taludes situados no terreno que é propriedade da INTERURBE, Gestão e Investimentos, S.A. na Freguesia de Carnaxide. FCT - Universidade NOVA de Lisboa.

AZARAFZA, M. et al. (2018, agosto). Stochastic geometry model of rock mass fracture network in tunnels. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology

BERRYMAN, J. G., & H.F. WANG. (1995). The Elastic Coefficients of Double-Porosity Models for Fluid Transport in Jointed Rock. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 100(B12): 24611-24627.

CEN prEN 1936. (1937). Methods of test for natural stone units – determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.

Committee on Subsurface Characterization, Modeling, Monitoring, and Remediation of Fractured Rock; Committee on Geological and Geotechnical Engineering; Board on Earth Sciences and Resources; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (2015). Characterization, Modeling, Monitoring, and Remediation of Fractured Rock. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001.

Commonwealth of Massachusetts Executive Office of Energy & Environmental Affairs, Department of Environmental Protection (EOEEA) (2016, fevereiro). Light Nonaqueous Phase Liquid and the MCP: Guidance on Site Assessment and Closure.

Contaminated Site Clean-Up Information (2023). *Fractured Rock*. Acedido em: 23/04/2023, em: https://clu-in.org/issues/default2.focus/sec/Fractured_Rock/cat/Overview/

EVIRGEN B. & TUNCAN A. (2015, janeiro). Determination of the freezing effect on unconfined compression strength and permeability of saturated granular soils. International Journal of GEOMATE.

FAIM, R. (2014, setembro). Caracterização Geotécnica dos Calcários Dolomíticos das Camadas de Coimbra, Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas.

FERREIRA, L. (2015). Modelo Conceitual do Aquífero Fraturado da Área da Jazida de Urânio de Caetité, Bahia: Implicações para o Fluxo Subterrâneo. Brasília.

FLORES G., et al. (2011, outubro). A Simplified Image Analysis Method to Study LNAPL Migration in Porous Media. In Soil and Foundations - Tokyo.

- FREEZE, R.A., & CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, Estados Unidos da América.
- GHASEMIZADEH R. et al. (2015, 30 de setembro). Equivalent Porous Media (EPM) Simulation of Groundwater Hydraulics and Contaminant Transport in Karst Aquifers. China.
- GILLIES, J., et al. (2020, 16 de setembro). Identifying Pyroclastic Density Currents From Partial Outcrop Exposure on Mt. Ruapehu, New Zealand. *Front. Earth Sci.*
- GOLUBEV, V.S. & A.A. GARIBIYANTS. (1971). *Heterogeneous Processes of Geochemical Migration*. New York: Consultants Bureau.
- HARDISTY, P. E., et al. (1998). Behaviour of light immiscible liquid contaminants in fractured aquifers. *Géotechnique* 48, No. 6, 747±760.
- IAEG. (1979). "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping", Part 1 – rock and soils materials. *Bulletin of the International Association Engineering Geology*.
- ITRC. (2017). 3 - Hydrology: Fluid Flow. Characterization and Remediation of Fractured Rock. FracRx-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Characterization and Remediation of Fractured Rock (<http://fracturedRx-1.Itrcweb.org>).
- ITRC. (2017). 5 - Site Characterization. Characterization and Remediation of Fractured Rock. FracRx-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Characterization and Remediation of Fractured Rock (<http://fracturedRx-1.Itrcweb.org>).
- ITRC. (2018). Appendix D - Fractured Rock Appendix. Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Site Management: LCSM Evolution, Decision Roles, and Remedial Technologies LNAPL - 3. Washington, D.C. (<https://lnapl-3.Itrcweb.org>).
- ISRM. (1981). *Rock Characterization Testing & Monitoring. ISRM Suggested Methods*. Ed. E. T. Brown. Published for the Commission on Testing Methods. Pergamon Press, Oxford.
- ISRM. (2007). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007 - 2014*.
- KULLBERG, M. C & KULLBERG, J. C. (2000). Tectónica da região de Sintra. In *Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida*, Mem. Geociências, Museu Nac. Hist. Nat. Univ. Lisboa, nº 2, 1-34.
- MATOS ALVES, C. et al. (1980). O complexo basáltico de Lisboa, *Comun. Serv. Geol. Portugal*, 66, pp. 111–134.
- MINEO, S., et al. (2022). Evolution of LNAPL contamination plume in fractured aquifers.
- MY BRAIN (2019, 10 de outubro). "Colunas de Basalto". mybrainsociety.blogspot.com/2019/10/colunas-de-basalto.html.
- NP EN 1936. (2008). *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*.
- PAIS, J., et al. (2006). *Notícia Explicativa da folha 34 - D Lisboa*. Lisboa.
- PEREIRA, M. L. (2018). *Caracterização Geotécnica de Rochas Vulcânicas de Lisboa - um contributo*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica, FCT - Universidade NOVA de Lisboa.
- RAFEK, A. G., et al. (2017). Peak Friction Angle Estimation from Joint Roughness Coefficient of Discontinuities of Limestone in Peninsular Malaysia.
- RAMALHO, M. M., et al. (2001). *Notícia Explicativa Da Folha 34 - C Cascais*. Lisboa.

RIBEIRO L. F., et al., (2017). Estudo do descritor hidrogeologia para a construção dos tuneis Monsanto/Santa Apolónia e Chelas/Beato, no âmbito do plano geral de drenagem de Lisboa. *Water Ways*.

SERRALHEIRO A. (1978). Contribuição para a actualização do conhecimento do Complexo Vulcânico de Lisboa. Trabalho adicional da Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências de Lisboa.

SINGHAL B. B. S., & GUPTA R. P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, second edition.

SNOW, D. T. (1968). Rock fracture spacings, openings, and porosities. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, volume 94.

SUDICKY, E.A., & E.O. FRIND. (1982). Contaminant transport in fractured porous media - Analytical solutions for a system of parallel fractures. *Water Resources Research* 18(6): 1634-1642.

TANG, D. H., et al. (1981). Contaminant transport in fractured porous-media - analytical solution for a single fracture. *Water Resources Research* 17(3): 555-564.

VALLEJO L. & FERRER M. (2011). *Geological Engineering*.

VANDREKWAAK, J.E. & E.A. SUDICKY. (1996). Dissolution of non-aqueous-phase liquids and aqueous phase contaminant transport in discretely-fractured porous media. *Journal of Contaminant Hydrology* 23(1-2): 45-68.

WOESSNER W. W. & POETER E. P. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project. Guelph, Ontario, Canada.



<2023>

MARGARIDA FALEIRO

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL
DE CONTAMINAÇÃO E DE RISCO EM MACIÇOS ROCHOSOS
FRATURADOS