Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Aplicação de índices hidrogeomecânicos em minas de água na área urbana do Porto: avaliação do potencial geohidráulico

Ana Filipa Ferreira da Silva

2021

(página propositadamente em branco)

Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Aplicação de índices hidrogeomecânicos em minas de água na área urbana do Porto: avaliação do potencial geohidráulico

Application of hydrogeomechanical indices to water mines in the urban area of Porto: evaluation of the geohydraulic potential

Ana Filipa Ferreira da Silva

1191171

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de ***Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente****, realizada sob a orientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e da Doutora Maria José Afonso, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Jorge Manuel Espinha Marques
Professor Auxiliar, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Doutora Maria José Coxito Afonso
Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Ana Filipa Ferreira da Silva**, em 10 de Novembro de 2021 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezasseis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Agradecimentos

O caminho que levou à concretização desta dissertação de mestrado, de uma forma direta ou indireta, foi construído pelas pessoas que me rodeiam, que inspiram todo o meu trabalho e alegria. É devido um grande agradecimento em especial:

- Aos meus Pais, que permitiram a minha formação superior e são a força que me impulsiona na vida pessoal e profissional;
- Ao Professor Helder I. Chaminé (LABCARGA e DEG|ISEP) pelo desafio e confiança dada no desenvolvimento deste projeto, pela disponibilidade e boa disposição sempre demonstrada, e por todo o apoio e conhecimento concedido e, especialmente, pela pormenorizada revisão crítica do manuscrito;
- À Professora Maria José Afonso (LABCARGA e DEG|ISEP) pela ajuda imensa e apoio, sem os quais este projeto não seria possível, pela paciência e competência, e pelo conhecimento partilhado e pela leitura crítica do manuscrito, especialmente, no caso de estudo derivado do seu vasto conhecimento da hidrogeologia da área urbana do Porto;
- À Doutora Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP) e ao Doutor José Teixeira (FLUP) pela simpatia, disponibilidade, competência e ajuda na construção das figuras, quadros e mapas em SIG;
- A todos os docentes, tanto na FCUP, como no ISEP, que contribuíram para a minha formação básica e avançada em Geologia e Engenharia Geotécnica;
- Aos meus amigos, que me acompanham desde o primeiro ano da FCUP, alguns desses continuaram no ISEP, por todo o apoio e ajuda, por fazerem com que a vida seja mais alegre e cheia de riso, devendo mencionar em especial o Ivo, o Rui, e a Inês, um muito obrigada pela vossa amizade;
- Ao Ivo, por todo o amor, apoio e companhia, por me desafiar e encorajar a ser melhor;
- Por fim, à minha família, especialmente aos meus Avós Domingos e Carminda, à minha Tia Raquel, à minha Irmã e a meus Pais, um muito obrigada pelo apoio, paciência, por todas as alegrias e tristezas que fazem parte de mim, do meu passado e do meu futuro, sem vocês nada faria sentido.

Obrigada.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Maciços rochosos, cartografia SIG, índices hidrogeomecânicos, hidrogeologia, geomecânica.

Resumo

O presente trabalho pretende aprofundar e desenvolver o estudo hidrogeomecânico de maciços rochosos fraturados nas antigas minas de água dos mananciais de Paranhos-Salgueiros (Área Urbana do Porto, NW de Portugal). Além de contribuir para um melhor conhecimento hidrogeomecânico do local e da influência da infiltração das águas subterrâneas nestes maciços. Uma abordagem multitécnica permitiu uma análise hidrogeomecânica abrangente de todo o maciço rochoso. A aplicação dos índices hidrogeomecânicos 'Hydro-Potential Value' (HP-Value) e 'Hydraulic Conductivity System' (HC-System) assistiu à avaliação da qualidade e circulação geohidráulica do maciço rochoso, envolvendo uma análise geológico-geotécnica, geomecânica e hidrogeomecânica de toda a extensão do túnel através de dados obtidos por campanhas de campo, e diferentes propriedades das águas subterrâneas como o caudal (Q), a condutividade hidráulica (K), a transmissividade (T) e a capacidade específica (Q/s). O zonamento hidrogeomecânico permitiu dividir o maciço em duas zonas, a ZHGM1 e a ZHGM2, ambas com valores variáveis de RQD, sendo a primeira a que obteve os valores mais elevados na generalidade dos parâmetros considerados. No final, verificou-se que a aplicação dos índices tem a vantagem de ser um método expedito e simples utilização, embora a sua eficácia poderá ser mais compreensivamente avaliada através de estudos de campo.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Rock masses, GIS mapping, Hydrogeomechanical indices, hydrogeology, geomechanics.

Abstract

The present work intends to deepen and develop the hydrogeomechanical study of fractured rock masses in the former water mines of the Paranhos-Salgueiros springs (Porto Urban area, NW Portugal). Besides contributing to a better hydrogeomechanical knowledge of the site and the influence of groundwater infiltration on these rock masses. A multi-technical approach allowed a comprehensive hydrogeomechanical analysis of the entire rock mass. The application of the Hydro-Potential Value (HP-Value) and Hydraulic Conductivity System (HC-System) hydrogeomechanical indices assisted the evaluation of the rock mass quality and geohydraulic circulation, involving a geological-geotechnical, geomechanical and hydrogeomechanical analysis of the entire tunnel length through data obtained by previous field campaigns, and different groundwater properties such as: flow rate (Q), hydraulic conductivity (K), transmissivity (T) and specific capacity (Q/s). Furthermore, the hydrogeomechanical zoning allowed dividing the massif into two zones, ZHGM1 and ZHGM2, both with variable RQD values, the former being the one that obtained the highest values in most of the parameters considered. In the end, it was verified that the application of the indices has the advantage of being a practical and straightforward method to use. However, its effectiveness could be more comprehensively evaluated through field studies.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução 3
1.1. Generalidades 3
1.2. Objetivos 5
1.3. Organização da dissertação 6
1.4. Metodologia e técnicas: breve síntese 8
2. Índices hidrogeomecânicos em maciços rochosos fraturados: breve estado da arte 15
2.1. Considerações iniciais 15
2.2. Águas subterrâneas e as suas propriedades 19
2.3. Índices geotécnicos e classificações geomecânicas: uma síntese 27
2.4. Índices hidrogeomecânicos: HP-Value e HC-system 32
2.4.1. Hydro-Potential value (HP-Value) – Índice de Potencial Geohidráulico 32
3. Avaliação do potencial hidrogeomecânico do maciço rochoso: mananciais de Paranhos-Salgueiros (área urbana do Porto) 45
3.1. Generalidades 45
3.2. Enquadramento regional e local 47
3.3. Enquadramento hidro-histórico 51
3.4. Síntese do zonamento hidrogeotécnico 52
3.5. Avaliação hidrogeomecânica: os índices HP-Value e HC-System 61
3.5.1. Considerações iniciais 61
3.5.2. HP-value: Resultados e discussão 62
3.5.3. HC-System: Resultados e discussão 67
3.5.4. Apresentação e discussão de alguns parâmetros hidrodinâmicos segundo o HP-value e o HC-system 71
3.6. Zonamento hidrogeomecânico 87
4. O modelo hidrogeológico conceptual: o papel da hidrogeomecânica em estudos de pormenor 95
5. Conclusões 101
6. Referências bibliográficas 105

(página propositadamente em branco)

Índice de figuras

Figura 1. Esquema das propriedades essenciais à determinação dos índices hidrogeomecânicos HP-Value e HC-System. 5
Figura 2. Esquema dos passos para o estudo hidrogeomecânico de maciços rochosos fraturados. .7
Figura 3. Esquema representativo da técnica de amostragem linear ("scanline") para levantamento dos parâmetros geológico-geotécnicos, com D- distância à origem da fita, e L - comprimento da descontinuidade até intercetar a fita graduada (adaptado de Brady & Brown, 2004). Segundo Moreira (2009). 10
Figura 4. O ciclo hidrológico global (adaptado de Lencastre & Franco, 2003). 19
Figura 5. Ciclo hidrológico (adaptado de Singhal & Gupta, 2010). 20
Figura 6. Representação esquemática de fluxo vs infiltração ("seepage"), (Tang et al., 2017). 23
Figura 7. Representação do comportamento da água quando atravessa uma coluna (Gustafson, 2012). 25
Figura 8. Esquema dos procedimentos para a obtenção do RQD (segundo Deere, 1963; Deere et al., 1967; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). Retirado de Pinheiro (2013). 28
Figura 9. Gráfico comparativo entre os valores de HP e os valores da capacidade especifica e caudal —"Ábaco de Gates" (adaptado de Gates, 1997, 2003). 38
Figura 10. Imagem de satélite da área de estudo (adaptado de Google Earth Pro), (atualizado de Martins, 2011). 46
Figura 11. Esboço geológico regional da área urbana do Porto e sua envolvente (adaptado de Chaminé et al., 2003 e Afonso, 2011). 48
Figura 12. Esboço geológico da cidade do Porto (adaptado de COBA, 2003 e Chaminé et al., 2010). In: Afonso (2011). 49
Figura 13. Correlação entre os valores de HP e o Q (L/min). 81
Figura 14. Correlação entre os valores de HP e o Q (L/s). 81
Figura 15. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 1 com os obtidos por Gates (2003). 82
Figura 16. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 2/Setor 1 com os obtidos por Gates (2003). 82
Figura 17. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 2/Setor 2 com os obtidos por Gates (2003). 83
Figura 18. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 2/Setor 3 com os obtidos por Gates (2003). 83
Figura 19. Correlação entre os valores de HP e a Q/s (m^2/dia). 84
Figura 20. Correlação entre os valores de HP e os valores de K (m/dia) para o Cenário 1. 84
Figura 21. Correlação entre os valores de HP e os valores de K (m/dia) para o Cenário 2. 85
Figura 22. Correlação entre os valores de HC-system e os valores de K (m/dia). 85
Figura 23. Correlação linear entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2) e os valores de RQD. 86
Figura 24. Correlação polinomial entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2) e os valores de RQD. 86
Figura 25. Correlação entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2) e os valores de DI. 87
Figura 26. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 1. 88
Figura 27. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 2/Setor 1. 89

Figura 28. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 2/Setor 2. 90
Figura 29. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 2/Setor 3. 91
Figura 30. Modelo hidrogeológico conceptual da área envolvente às galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros (segundo Afonso, 2011). 96

Índice de quadros

Quadro 1. Organização da dissertação. 6
Quadro 2. Pormenor sobre informação compilada das investigações prévias ou relacionadas com a temática utilizadas para o estudo hidrogeomecânico dos mananciais de Paranhos-Salgueiros. .9
Quadro 3. Principais parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1980, 2007, 2015; Priest, 1993; GSE, 1995; Brady & Brown, 2004; Scesi & Gattinoni, 2009; Palmström, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011). Segundo: Madureira (2012). 17
Quadro 4. Valores para o coeficiente K da expressão de Huntley et al. (1992). 27
Quadro 5. Índice RQD (%), (segundo Deere et al., 1967). 29
Quadro 6. Síntese dos índices e classificações RQD, RMR e Q-System (sintetizado a partir de Deere et al., 1967; Barton et al. 1974; Bieniawski, 1989; Barton & Bieniawski, 2008; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; NGI, 2015; Celada & Bieniawski, 2020). 31
Quadro 7. Índice qualidade do maciço (RQD) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Deere et al., 1967 e González de Vallejo & Ferrer, 2011). 33
Quadro 8. Índice de descontinuidades (Jn) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Barton et al., 1974, 1980). 34
Quadro 9. Índice de rugosidade (Jr) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Barton et al., 1974, 1980). 34
Quadro 10. Índice abertura e forma (Jaf) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Barton et al., 1974, 1980). 35
Quadro 11. Fator de condutividade hidráulica (Jk) e classificação. (segundo Freeze e Cherry, 1979, retirado de Gates, 1997, 2003). 36
Quadro 12. Fator de circulação de água (Jw) e classificações (segundo Barton et al., 1974, Hencher, 1987, retirado de Gates (1997, 2003). 36
Quadro 13. Avaliação e valores para LPI (adaptado de Hsu et al., 2008, 2011). Retirado de Meirinhos, 2015). 41
Quadro 14. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 1 (T1), (adaptado de Moreira, 2009, 2012). 54
Quadro 15. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 2, Setor 1 (T2/S1), (adaptado de Madureira, 2012). 56
Quadro 16. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 2, Setor 2 (T2/S2), (adaptado de Madureira, 2012). 58
Quadro 17. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 2, Setor 3 (T2/S3) (adaptado de Madureira, 2012). 60
Quadro 18. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 1. 63
Quadro 19. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 2, Setor 1 (T2/S1). 64
Quadro 20. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 2, Setor 2 (T2/S2). 66
Quadro 21. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 2, Setor 3 (T2/S3). 67
Quadro 22. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 1 (T1). 68
Quadro 23. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 2, setor 1 (T2/S1). 69
Quadro 24. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 2, setor 2 (T2/S2). 70
Quadro 25. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 2, setor 3 (T2/S3). 70

Quadro 26. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 1 (T1), Cenário 1. 73
Quadro 27. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 1 (T1), Cenário 2. 74
Quadro 28. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 1 (T2/S1), Cenário 1. 75
Quadro 29. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 1 (T2/S1), Cenário 2. 76
Quadro 30. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 2 (T2/S2), Cenário 1. 77
Quadro 31. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 2 (T2/S2), Cenário 2. 78
Quadro 32. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 3 (T2/S3), Cenário 1 79
Quadro 33. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 3 (T2/S3), Cenário 2. 80

Capítulo I

Introdução

(página propositadamente em branco)

"Appearances are often misleading. Nowhere is this more so than in the natural water environment"

(Younger, 2007)

1. Introdução

1.1. Generalidades

A dissertação foi realizada no âmbito da unidade curricular 'Dissertação/Estágio/Projeto' do 2º ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto.

O presente estudo hidrogeomecânico desenvolve-se no maciço rochoso granítico da área urbana do Porto (NW de Portugal), mais especificamente nas galerias que atravessam o maciço na forma dos antigos aquedutos subterrâneos de abastecimento de água à cidade do Porto, denominados Mananciais de Paranhos–Salgueiros (e.g., Bourbon e Noronha, 1885; D'Andrade Junior, 1895; Fontes, 1908; Carteado Mena, 1908; Bahia Junior, 1909; Afonso et al., 2018). Na cidade estão reconhecidas à volta de 64 galerias subterrâneas na área urbana do Porto (COBA, 2003). Talvez a mais emblemática e conhecida seja a rede de galerias ou túneis dos mananciais de Arca d'Água (estas nascentes são conhecidas, pelo menos, desde o século XI; pormenores em Fontes, 1908 ou Afonso et al., 2018). Estas galerias subterrâneas foram concluídas por volta do ano 1669, e mais tarde aumentada a rede de abastecimento em 1838. Os aquedutos subterrâneos e condutas transportam a água subterrânea de três nascentes históricas desde Arca de d'Água até à Arca de Sá Noronha (na Praça Coronel Pacheco), alcançando uma extensão de 3300 m e uma profundidade -21m (Chaminé et al., 2010, 2014; Afonso et al., 2018).

A circulação da água em maciços fraturados é um fator com grande influência para diferentes problemas em estruturas subterrâneas, desde a sua instabilidade à alteração do estado de tensão, tal como a sua impermeabilização contra agentes potencialmente contaminantes (e.g., Louis, 1969; Barton et al., 1985; Evans et al., 1997; Younger, 2007; Singhal & Gupta, 2010; Gustafson, 2012; Bense et al., 2013). Assim, dependendo das características das descontinuidades, do tipo de maciço presente no local em estudo e das propriedades da água subterrânea, a circulação preferencial da água poderá ser estabelecida, bem como o seu nível de

influência no maciço em questão. É, portanto, evidente a importância do estudo e controlo da percolação de água no dimensionamento de obras de engenharia subterrânea, seja mineira, civil ou ambiental, de forma a minimizar os impactos ambientais e os riscos de instabilidade das estruturas (e.g., Hoek, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Gustafson, 2012; Palmström & Stille, 2014). Na atualidade, registam-se inúmeros estudos e documentos que combinam técnicas de engenharia prática com os conhecimentos adquiridos após décadas de estudos hidrogeológicos, que tentam prevenir ou mitigar problemas de engenharia ou ambiental relacionados com água subterrânea, constituindo um grupo de grande significado no quadro geral de projetos e obras subterrâneas (pormenores, por exemplo, em Gustafson, 2012).

Assim, relacionar as condições hidrogeológicas e as condições geotécnicas de maciços rochosos fraturados, especialmente dos domínios da engenharia das rochas ("rock engineering"), torna-se cada vez mais importante, sendo a infiltração de água subterrânea em escavações de túneis ou minas um dos problemas mais desafiador para este tipo de projetos (e.g., Serafim & Pereira, 1983; Barton et al., 1985; Bieniawski, 1989; CFCFF, 1996; Evans et al., 1997; Barton & Quadros, 2002; Hoek, 2007; Hamm et al., 2007; Scesi & Gattinoni, 2009; Chen & Zhou, 2011; Gustafson, 2012; Palmström & Stille, 2014; Celada & Bieniawski, 2020).

Os autores Gates (1995, 1997, 2003) e Hsu et al. (2008, 2011) desenvolveram interessantes índices hidrogeomecânicos para avaliar o potencial geo-hidráulico de maciços rochosos fraturados. Estes índices são baseados em sistemas de classificação de maciços rochosos e elementos hidrogeológicos e geomecânicos, como ferramentas para facilitar a avaliação de maciços rochosos fraturados. Assim, Gates (1995, 1997, 2003) estabeleceu o índice designado por "Hydro-Potential Value" (HP-Value) e Hsu et al. (2008, 2011) desenvolveram o índice "Rock Mass Hydraulic Conductivity" (HC-System), que não são mais do que aproximações para apoiar a previsão do potencial de infiltração de água nos maciços rochosos. A Figura 1 esquematiza a relação entre a circulação da água subterrânea e os índices hidrogeomecânicos apresentados.

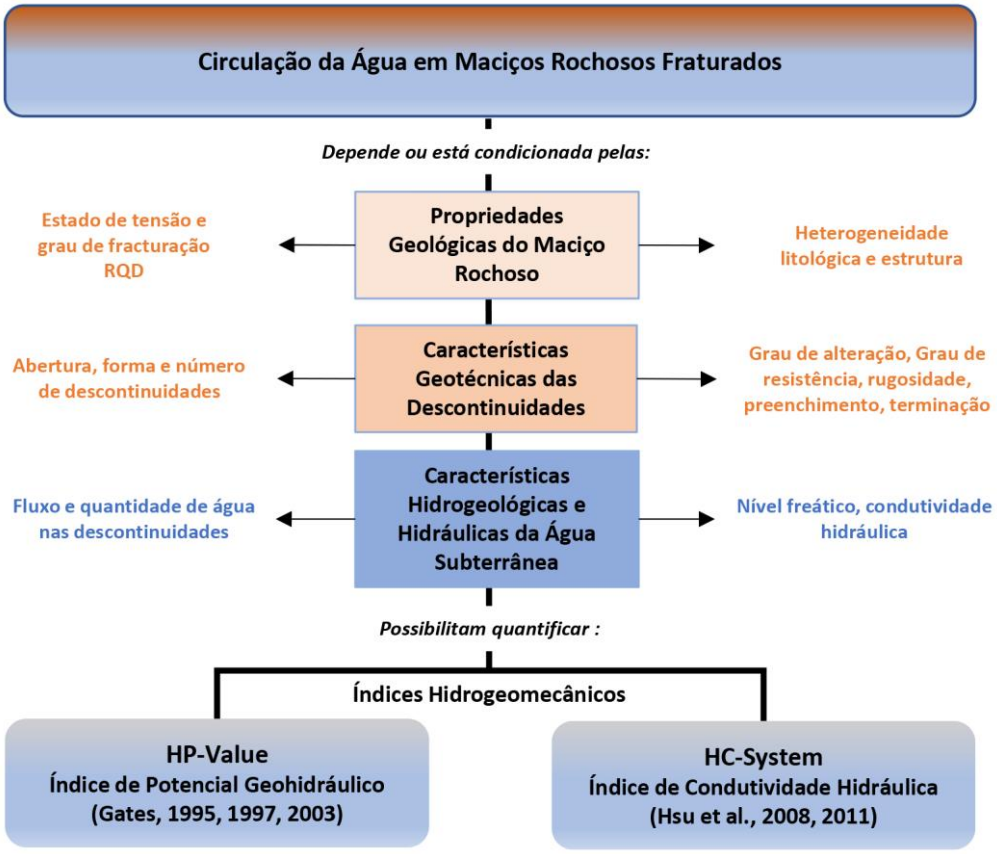


Figura 1. Esquema das propriedades essenciais à determinação dos índices hidrogeomecânicos HP-Value e HC-System.

1.2. Objetivos

Como mencionado anteriormente, os estudos hidrogeomecânicos nas últimas décadas têm vindo a ganhar uma grande relevância na engenharia geotécnica devido ao aumento da preocupação com os efeitos da água em estruturas subterrâneas, resultando em várias soluções levantadas em todo o mundo.

Os índices "Hydro-Potential Value" de Gates (1995, 1997, 2003) e "Rock Mass Hydraulic Condutivity" de Hsu et al. (2008, 2011) destacam-se pela sua simplicidade e flexibilidade e, ainda, por serem métodos não-destrutivos e cuidadosos na seleção dos parâmetros geológicos, geotécnicos e hidrogeomecânicos que consideram, e por se adequarem a ambientes subterrâneos ou (sub)superficiais.

Desta forma, a presente dissertação tem como objetivos gerais os enumerados abaixo:

- Aplicação dos índices hidrogeomecânicos "Hydro-Potential Value" (HP-Value) e "Rock Mass Hydraulic Conductivity" (HC-System) nas secções das galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros.
- Comparação, análise e discussão na aplicação dos índices HP-Value e HC-System, estabelecendo as vantagens e desvantagens da aplicação de cada índice;
- Elaboração preliminar de um modelo hidrogeomecânico das galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros e implicações no modelo hidrogeológico conceptual.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em três fases principais onde se elabora o tema de acordo com os objetivos esboçados anteriormente.

Primeiramente, é definido o problema a tratar e a sua importância em estudos hidrogeomecânicos, incluindo a reunião da informação necessária como estudos geomecânicos e hídricos da zona em questão, estudos hidrogeológicos em meios cristalinos fraturados, incluindo um estudo da bibliografia que existe para os dois índices, sendo assim definido uma metodologia a seguir.

De seguida, procedeu-se à aplicação dos índices hidromecânicos e a comparação dos resultados obtidos. O que permite a elaboração de um modelo conceptual hidrogeomecânico preliminar de todas as secções das galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros.

Esta organização encontra-se resumida no Quadro 1.

Quadro 1. Organização da dissertação.

Fase	Capítulo	Breve Descrição
I	1	Apresentação do problema. Objetivos
	2	Reunião de informação necessária. Estado crítico da arte
II	3	Aplicação dos índices hidrogeomecânicos
		Comparação e discussão dos resultados
III	4,5	Construção de um modelo hidrogeomecânico e suas implicações para o modelo hidrogeológico conceptual regional. Conclusões

Embora esteja definida uma organização principal, este estudo segue o trajeto típico de um trabalho técnico-científico. Isto é, baseia-se em dados e conhecimentos adquiridos através de estudos bibliográficos e trata a informação diversa aplicando-as às galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros, como se apresenta no fluxograma seguinte (Figura 2).

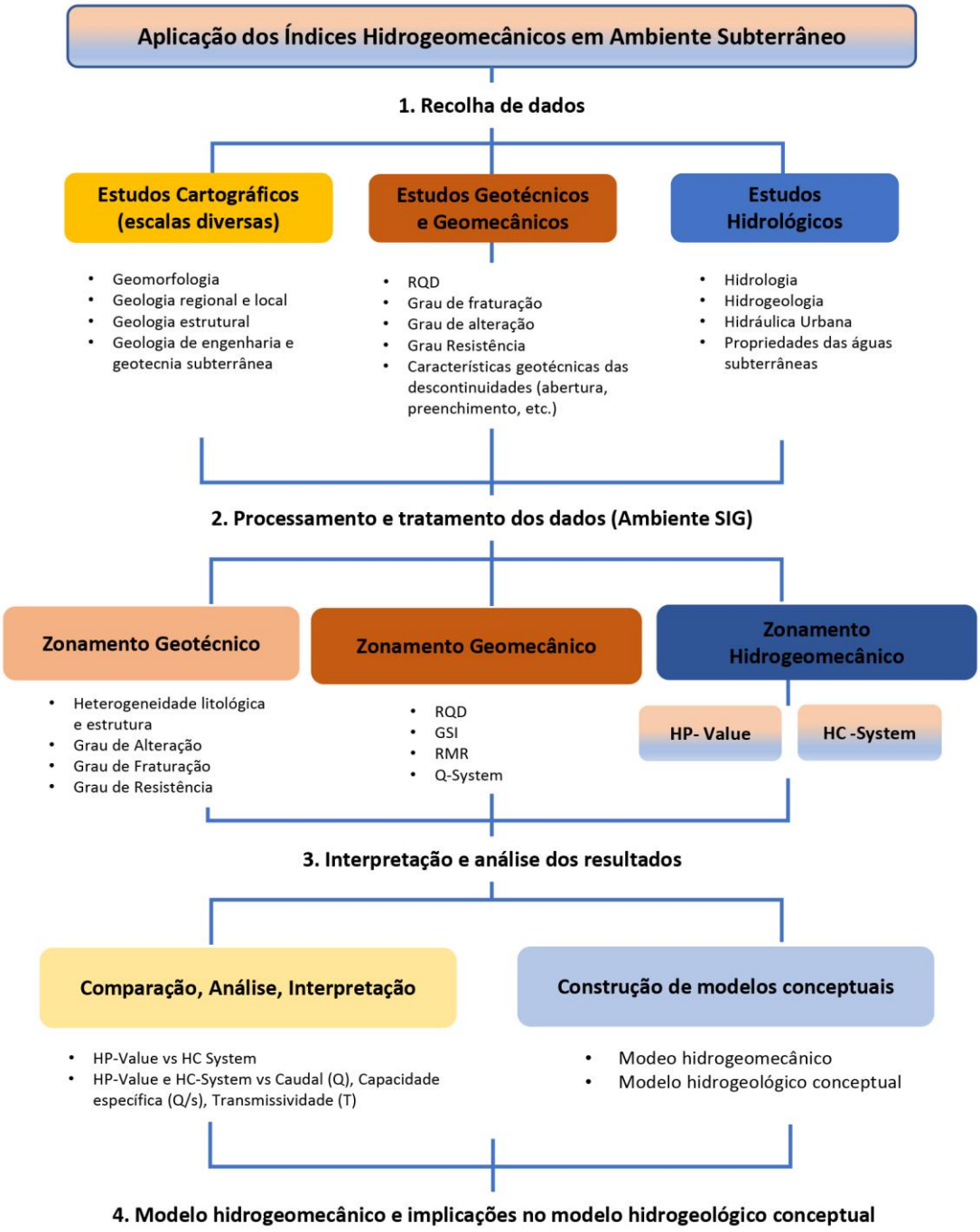


Figura 2. Esquema dos passos para o estudo hidrogeomecânico de maciços rochosos fraturados.

1.4. Metodologia e técnicas: breve síntese

Atualmente, são inúmeras e variadas as técnicas utilizadas em meios geotécnicos, adaptando-se a fatores como o nível de aprofundamento desejado, o tema e o local em estudo, os equipamentos disponíveis, o orçamento, o tempo disponível, entre outros. O tratamento dos dados recolhidos pode ser dispendioso e moroso pelas características dos equipamentos utilizados ou pela quantidade de ensaios a realizar. Por regra, e para tornar robusta a investigação "in situ", realiza-se primeiramente um estudo geológico-geotécnico em maciços rochosos, a várias escalas, com o objetivo de o mapear, caracterizar e avaliar o seu comportamento geomecânico à construção de uma dada obra (seja, subterrânea ou (sub)superficial). Geralmente, em estudos hidrogeomecânicos de meios fissurados dever-se-á ter em atenção dois elementos principais, o maciço rochoso e a água (Scesi & Gattinoni, 2009). É a partir destes dois elementos que se irá planear todo o processo de aplicação das técnicas adequadas.

No presente caso em investigação, como já existem estudos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos sobre os Túneis de Arca d'Água (e.g., Afonso, 2011; Afonso et al., 2010), as informações sobre as características do maciço, das suas descontinuidades e da circulação de água subterrânea foram retiradas e sintetizadas, nomeadamente de estudos técnicos, teses e dissertações, entre outros, de: i) Begonha & Sequeira Braga (2002); COBA (2003); Chaminé et al. (2010), Afonso (2011); ii) Moreira (2009, 2012); iii) Martins (2011); iv) Madureira (2012). Além disso, a investigação de mestrado desenvolvida por Meirinhos (2015) serviu como importante fonte de informação metodológica sobre a aplicação do HP-Value e do HC-System em meios rochosos fraturados, mas noutro contexto geológico, hidrogeológico e geográfico.

O Quadro 2 apresenta quais os elementos, dados e informações que foram retiradas de cada relatório supracitado.

Quadro 2. Pormenor sobre informação compilada das investigações prévias ou relacionadas com a temática utilizadas para o estudo hidrogeomecânico dos mananciais de Paranhos-Salgueiros.

Autor	Ano de publicação	Título do Estudo	Informação retirada	Estudos e ensaios realizados
Patrícia Francisca de Sousa **Moreira**	2009	Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos): implicações hidrogeomecânica exploratória para o modelo geomecânico comportamental	Zonamento geomecânico (Túnel 1)	Scanline Recolha de amostras para ensaios geotécnicos Resistência uniaxial (UCS) e carga pontual (PLT) Tratamento estatistico dos dados geotécnicos. Zonamento geotécnico Classificações geomecânicas: RMR, Q-system, GSI
	2012	Estudo geotécnico e geomecânico de uma galeria subterrânea em meio urbano		
André Pereira **Martins**	2011	Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (setor de Carvalhido-Burgães): implicações para o modelo geomecânico comportamental	Zonamento geomecânico (Túnel 2)	Scanline Resistência uniaxial (UCS) e carga pontual (PLT) Tratamento estatístico dos dados geotécnicos Zonamento geotécnico
Marlene Marisa Batista **Madureira**	2012	Geotecnia dos túneis do maciço de Paranhos: avaliação hidrogeomecânica exploratória	Zonamento geomecânico (Túnel 2) Índice hidrogeomecânico - HP-value Circulação geo-hidráulica (caudal, Q)	Scanline Resistência uniaxial (UCS) e carga pontual Tratamento estatístico dos dados Classificações geomecânicas: RMR, Q-system, GSI
João Miguel de Freitas **Meirinhos**	2015	Hydrogeomechanics for rock engineering: coupling subsurface hydrogeomechanical assessement and hydrogeotechnical mapping on fracturated rock masses	Zonamento hidrogeomecânico Índices hidrogeomecânicos (HP-value e HC-system)	Scanline Tratamento estatistico dos dados geotécnicos. Zonamento geotécnico Classificações geomecânicas: RMR, Q-system, GSI e índices hidrogeomecânicos HP-value e HC-system

As técnicas *in situ* utilizadas pelos estudos desenvolvidos do quadro 2 incluem:

- Técnica de Amostragem Linear ('Scanline Sampling Technique' ou, simplesmente, 'Scanline') para levantamento de parâmetros geológico-geotécnicos das superfícies expostas do maciço rochoso, seguindo as recomendações da ISRM (1978, 1981), da GSE (1995) e da CFCFF (1996);
- Ensaio esclerométrico usando o Martelo de Schmidt (tipo L) para avaliação da resistência do material-rocha, segundo as recomendações da ISRM (1985).

Por seu turno, os ensaios laboratoriais foram conseguidos:

- Ensaio de carga pontual (PLT – Point Load Test) para a medição da resistência;

- Tratamento estatístico e análise dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos recorrendo aos aplicativos ScanGeoData|BGD, SchmidtData|UCS e MGC–ROCDESIGN|CALC (pormenores em Chaminé et al., 2016).

A técnica de amostragem linear, ou "scanline" (Figura 3), permite a recolha expedita de dados para a caracterização geotécnica de maciços heterogéneos. Consiste essencialmente na colocação de uma fita graduada na superfície do afloramento (ou maciço) a estudar e no registo das características das descontinuidades desejadas que intersetam a fita graduada, segundo as seguintes grandezas (e.g., ISRM, 1978, 1981; Priest, 1993; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004; Chaminé et al., 2015; Chaminé, 2016):

- distância à origem da fita graduada;
- semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a fita graduada, mas apenas para cima ou para baixo da fita;
- tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R – em rocha; D – outra descontinuidade; O – obscura, quando não é percetível a sua terminação);
- a atitude geológica (direção e inclinação) da descontinuidade medida junto ao ponto de interceção entre a descontinuidade e a fita graduada;
- curvatura (C), numa escala de C_1 a C_5, em que C_1 representando superfícies planas e C_5 representando superfícies muito curvas;
- rugosidade (R), numa escala de R_1 a R_5, representando R_1 uma superfície lisa e R_5 representando uma superfície muito rugosa.

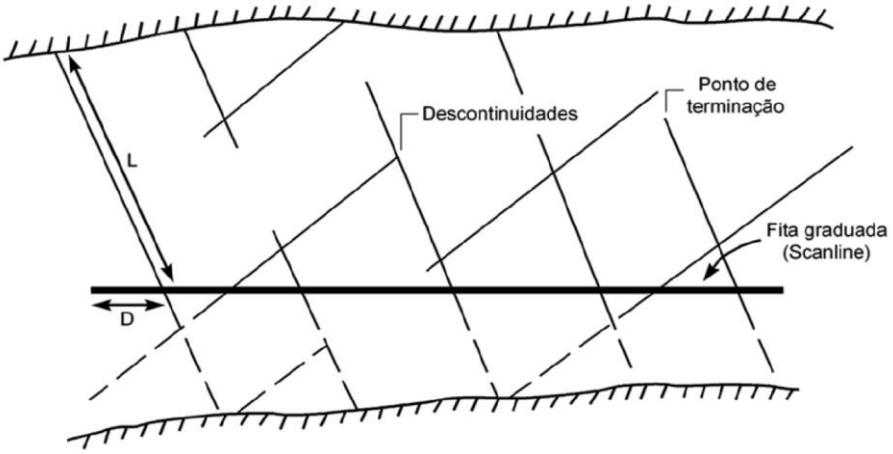


Figura 3. Esquema representativo da técnica de amostragem linear ("scanline") para levantamento dos parâmetros geológico-geotécnicos, com D- distância à origem da fita, e L - comprimento da descontinuidade até intercetar a fita graduada (adaptado de Brady & Brown, 2004). Segundo Moreira (2009).

Devem ser adicionadas em conjunto com as características das descontinuidades, também as características do maciço, tais como a heterogeneidade litológica, o grau de alteração, o espaçamento, presença de preenchimento e o seu tipo, e a presença de água (ISRM, 1978, 1981). A técnica da "scanline" é especialmente útil em ambientes subterrâneos ou de taludes onde a zona em estudo se encontra exposta e permite a visualização do estado do maciço sem recurso a ensaios mais dispendiosos e morosos.

(página propositadamente em branco)

Capítulo II

Índices hidrogeomecânicos em maciços rochosos fraturados: breve estado da arte

(página propositadamente em branco)

2. Índices hidrogeomecânicos em maciços rochosos fraturados: breve estado da arte

2.1. Considerações iniciais

A água, antes de se tornar um elemento de estudo em projetos de engenharia e de proteção ambiental, era vista como um componente dos solos e das rochas na geologia, em particular na hidrogeologia, normalmente restrita aos sistemas aquíferos. Com o aumento da construção (sub)superfícial e subterrânea das sociedades modernas e as solicitações que este tipo de obra exige, o tema foi revisto numa nova perspetiva por parte de engenheiros.

Segundo Gustafson (2012), "para um hidrogeólogo de meios fracturados, não é a rocha em si que é interessante, mas sim as fraturas e as zonas por onde circula a água subterrânea". As descontinuidades e as suas propriedades são, portanto, a chave para entender a hidrogeologia de meios fissurados ou fracturados.

Numa perspetiva de engenharia, Tang et al. (2017) define água subterrânea como "a água que circula nos vazios dos poros em solos ou em fraturas nas formações rochosas." Adiantando que "desempenha um papel importante no comportamento mecânico dos materiais geológicos (solos e rochas), e sendo uma parte essencial do ambiente, em engenharia. (…) Portanto, qualquer avaliação do solo ou rochas em engenharia, que não considera a água subterrânea não é abrangente ou correta."

Ao se relacionar a percolação da água com as propriedades geológicas, petrofísicas e geo-estruturais dos maciços rochosos fraturados, foi possível a criação de índices hidrogeomecânicos como o "Hydro-Potential Value" (HP-Value) por Gates (1995, 1997, 2003) e o "Rock Mass Hydraulic Conductivity" (HC-System) por Hsu et al. (2008, 2011).

Mundialmente, é aceite pela comunidade científica as recomendações para a qualificação e quantificação das diversas propriedades dos maciços apresentada pela Sociedade Internacional para a Mecânica das Rochas (ISRM), que, desde 1974, oferece uma descrição dos parâmetros usados para a caracterização global de um maciço rochoso, criando uma relação entre a sua estrutura e a litologia do maciço e a natureza e comportamento mecânico das suas descontinuidades. Corolário destes estudos estão as obras de referência com as recomendações,

sugestões e terminologias promovidos pela ISRM, nomeadamente o “Yellow Book” (ISRM, 1980), seguidos pelo “Blue Book” de 2007 e pelo “Orange Book” de 2015, os contributos mais recentes da organização (ISRM, 2007, 2015). Ainda, o EC7 (Eurocode 7) estabelece que a escolha dos valores característicos das propriedades dos materiais geológicos que deverão basear-se nos resultados de ensaios de laboratório e de campo (Orr & Farrell, 1999; Butscher, 2012).

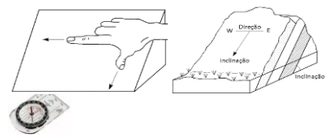
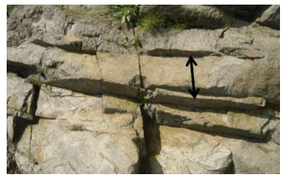
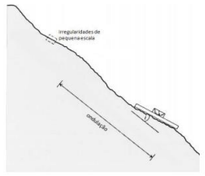
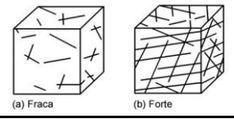
Para o propósito deste trabalho, entende-se como descontinuidade todas as superfícies estruturais (foliação, falhas, fissuras, diaclases, etc.) que o maciço rochoso apresente e que possibilitem a circulação da água.

O Quadro 3 apresenta, em síntese, os diferentes parâmetros mencionados anteriormente com descrições básicas, os métodos e técnicas para caracterizar e avaliar os maciços rochosos do ponto de vista geotécnico.

Estes parâmetros proporcionam uma caracterização do comportamento mecânico dos maciços através da reunião de dados referentes tanto às descontinuidades, como ao estado do maciço, podendo, por fim, ser correlacionados, resultando numa avaliação geotécnica e geológica do afloramento em estudo. Por fim, através deste estudo do afloramento, as conclusões são abrangentes a todo o maciço.

Dada à complexidade e heterogeneidade dos maciços rochosos, as classificações hidrogeomecânicas comprovam ser um utensilio importante por facilitarem o acesso a informações detalhadas sobre o estado do maciço, a sua qualidade como suporte e a sua estabilidade, entre outras características relevantes para os projetos de engenharia.

Quadro 3. Principais parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1980, 2007, 2015; Priest, 1993; GSE, 1995; Brady & Brown, 2004; Scesi & Gattinoni, 2009; Palmström, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011). Segundo: Madureira (2012).

Parâmetro	Breve descrição	Equipamento e/ou processo de avaliação	Representação e/ou classificação	Esquema
Atitude geológica	Engloba a direção e a inclinação de uma descontinuidade. O ângulo que uma linha horizaontal do plano define com o Norte magnético é designado de direção e o ângulo que a reta de maior declive (perpendicular à direção) define com o plano horizontal designa-se por inclinação.	Bússola de Geólogo com clinómetro.	N65°E; 44°NW, assim a direção será N65°E e a inclinação 44°NW.	
Grau de fracturação (*fracture intercept*) e espaçamento	O grau de faturação (*fracture intercept*) corresponde à distância média entre as descontinuidades, independente da família de descontinuidades, que intersetam a linha de amostragem. O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes à mesma família. O espaçamento está associado ao grau de fraturação do maciço, quando maior for o grau de fraturação, menor será o espaçamento.	Fita graduada ao longo de um comprimento suficiente para ter uma indicação da frequência das descontinuidades.	**Intervalo (cm)** / **Nomenclatura** / **Designação** >200 / F1 / Muito afastadas / F1-2 / Afastadas 60-200 / F2 / Afastadas 20-60 / F3 / F3 / Medianamente afastadas / Medianamente afastadas 6-20 / F4 / Próximas / F4-5 / Próximas <6 / F5 / Muito próximas	
Abertura	Designa-se por abertura de uma descontinuidade a medida perpendicular entre as paredes próxima dessa descontinuidade. A abertura tende em diminuir com a profundidade até se tornar fechada.	Régua graduada em milímetros, colocada perpendicularmente às paredes contíguas das descontinuidades.	**Abertura (mm)** / **Descrição** <0,1 / Muito fechadas 0,10-0,25 / Fechadas / Fechadas 0,25-0,50 / Parcialmente abertas 0,50-2,50 / Abertas 2,50-10 / Medianamente amplas / Entreabertas >10 / Amplas 10-100 / Muito amplas 100-1000 / Extremamente amplas / Abertas >1000 / Cavernosas	
Preenchimento	O preenchimento ou enchimento refere-se ao material que se encontra entre as paredes de uma descontinuidade. Esse preenchimento pode ser constituído por materiais ou minerais (argila, quartzo, rocha esmagada, etc.).	Inspeção visual. A mediação da espessura do enchimento é retirada diretamente com uma régua graduada em milímetros.	A classificação é feita de acordo com a tipologia do material constituinte do enchimento, por exemplo, argila mole, quartzo esmagado, etc.	
Rugosidade	A rugosidade está associada às irregularidades das paredes das descontinuidades. Este parâmetro influencia diretamente a resistência ao corte do maciço. Uma maior irregularidade das superfícies implica um maior atrito (aderência) entre as paredes, possibiliatando assim uma menor ocorrência de rotura do maciço.	Inspeção visual, recorrendo à sensibilidade do tato e em comparação com a superfície padrão.	**Classe** / **Descrição** / **Designação** / **Forma de perfil** **I** / Rugosa **II** / Lisa / R_{1-2} Pouco rugosa / Plana **III** / Estriada **IV** / Rugosa **V** / Lisa / R_3 Medianamente rugosa / Ondulada **VI** / Estriada **VII** / Rugosa **VIII** / Lisa / R_{4-5} Muito rugosa / Denteada **IX** / Estriada	
Continuidade ou persistência	É designado pelo comprimento superficial de uma descontinuidade. Este parâmetro torna-se difícil de quantificar em afloramentos, pois geralmente observam-se apenas dimensões aparentes. É aconselhável examinar sempre a extermindade da superfície, i. e., onde termina o comprimento da descontinuidade (rocha ou noutra descontinuidade). As características mecânicas que potenciam as superfícies de rotura, são influenciadas por este parâmetro.	Mede-se com uma fita graduada a extensão do traço da superfície da descontinuidade.	**Continuidade** / **Comprimento, L (m)** Muito pouco contínuas / <1 Pouco contínuas / 1-3 Medianamente contínuas / 3-10 Muito contínuas / 10-20 Extremamente contínuas / >20	
Resistência das paredes das descontinuidades	Corresponde à resistência de compressão uniaxial nas paredes das descontinuidades. A deformabilidade e a resistência ao corte de um maciço rochoso são influenciadas pelo grau de resistência das paredes que as descontinuidades apresentam.	Esclerómetro portátil ou "Martelo de Schmidt".	**Classificação** / **Resistência à Compressão Simples (MPa)** / **Designação** S_1 / >200 / Muito elevada / S_{1-2} S_2 / 60-200 / Elevada / Elevada S_3 / 20-60 / Média S_4 / 6-20 / Baixa / S_{4-5} Baixa S_5 / <6 / Muito baixa	
Percolação de água	A percolação de água é dada pelo fluxo de água livre que percorre as descontinuidades do maciço rochoso ou no próprio maciço como um todo. Esta percolação de água, mediante o seu fluxo, proporciona muitas vezes indicações de existência de possíveis problemas de instabilidade do maciço rochoso.	Inspeção visual e sensibilidade ao toque.	**Nomenclatura** / **Designação** S / Seco H / Húmido* G / Gotejante F / Fluxo ** por vezes esta desiganção pode ser sub-dividida em ligeiramente húmido e húmido*	

2.2. Águas subterrâneas e as suas propriedades

Não só obras de abastecimento a populações beneficiam dos estudos hidrológicos ou hidrogeológicos. Obras que necessitam de estruturas resistentes e seguras como barragens para produção de energia, de rega, do controlo de cheias, entre outros que utilizam grandes aproveitamentos hidráulicos em prol da sociedade, devem passar por estudos hidrogeológicos.

O estudo hidrogeológico é composto por parâmetros que permitem a avaliação das formações geológicas e da definição das suas capacidades e limitações, isto é, como é que a água é armazenada ou transmitida e como isso pode influenciar um projeto de obra subterrânea. Sendo uma preocupação, neste tipo de obras de engenharia, o controlo da infiltração de água de precipitação que influi à rede hidrográfica e onde esta água é armazenada, ou seja, o movimento da água no ciclo hidrológico e a sua interação com o meio.

Como as estruturas de abastecimento de água a populações ocorrem muitas vezes com o aproveitamento de águas subterrâneas — não apenas de águas superficiais — também os estudos dos escoamentos superficiais devem ser adaptados às redes urbanas de esgotos pluviais (Lencastre & Franco, 2003).

O ciclo hidrológico (Figuras 4 e 5) engloba o percurso da água no meio ambiente, ou seja, entre a atmosfera, a litosfera e o oceano, sem um início ou fim definidos, mas pode ser dividido em 3 fases (meteorologia, hidrologia e oceanografia) e 7 componentes fundamentais que descrevem a circulação da água, sendo eles: i) evaporação (E); ii) precipitação (P); iii) transpiração (T); iv) infiltração (I); v) armazenamento de água (S); vi) escoamento superficial (R); vii) escoamento subterrâneo (G).

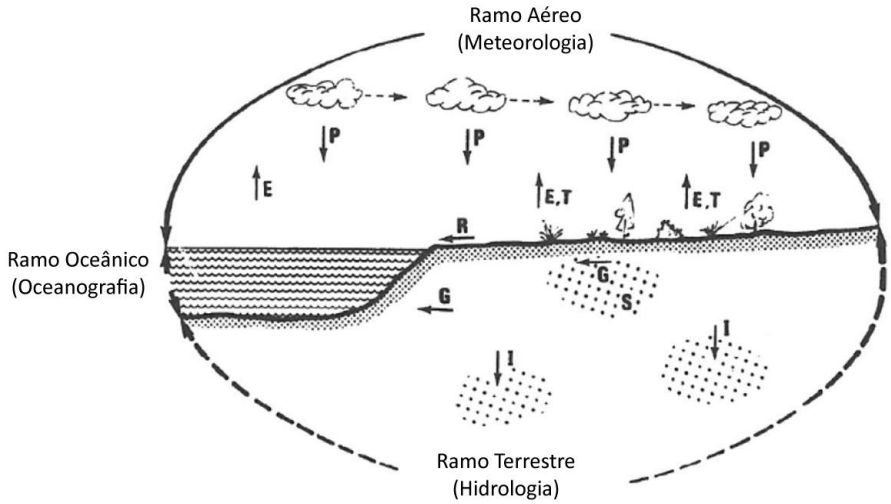


Figura 4. O ciclo hidrológico global (adaptado de Lencastre & Franco, 2003).

Resumindo, a água na superfície dos oceanos, mares, rios e lagos, evapora na forma de vapor de água movimentando-se na atmosfera em função do vento e da temperatura. Quando as condições atmosféricas reúnem as condições certas, ocorre a condensação do vapor de água resultando na precipitação sobre a forma de chuva ou neve. A água ao atingir a superfície da terra é drenada pelo solo podendo ocorrer o seu escoamento ou infiltração, juntando aos reservatórios subterrâneos que alimentam os cursos de água, ou alimentando-os diretamente. Parte desta humidade em baixas profundidades regressa à atmosfera por processo de evapotranspiração.

A Figura 5 exemplifica os processos mencionados e a sua participação no ciclo hidrológico.

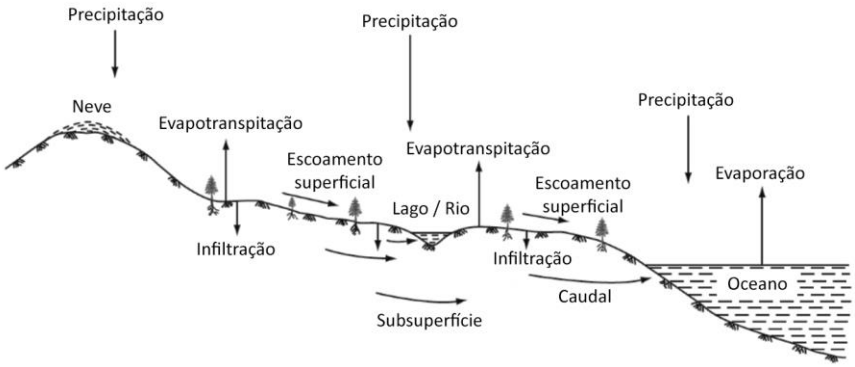


Figura 5. Ciclo hidrológico (adaptado de Singhal & Gupta, 2010).

O armazenamento de água subterrânea ocorre de várias formas e a sua circulação ou transmissividade, vai depender do tipo de aquífero presente e das próprias propriedades da água, que podem ser calculadas matematicamente, permitindo uma melhor compreensão do sistema de águas presente num determinado maciço em estudo, seja ele um meio poroso ou fraturado.

Neste capítulo serão apresentadas as propriedades principais e parâmetros das águas subterrâneas em meios rochosos que descrevem como a água é armazenada ou transmitida em meios geológicos, essenciais ao estudo hidrogeomecânico (Lencastre & Franco, 2003).

- **Capacidade específica μ_s**

A capacidade especifica de um meio saturado pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\mu_s = \rho g \times (\alpha + n\beta)$$

Sendo,

α - a compressibilidade do aquífero; ρ - a densidade do fluido; n - a porosidade; g - a aceleração gravítica; β - a compressibilidade da água.

Este parâmetro pode ser definido como a medida do armazenamento de água nos poros/vazios do meio. Este fenómeno combina a compressibilidade da água e a expansão do aquífero. Isto é, quando ocorre a infiltração de água num meio confinado entre duas camadas de rocha ou argila, com uma frequência maior do que é extraída, ocorre a compressibilidade de água nos poros, obrigando a que o meio se adapte às novas solicitações e expanda. Normalmente, menor ou igual a 0.0001 (Freeze & Cherry 1979; Fetter, 2014).

- **Porosidade, η**

A porosidade é definida como a proporção, em percentagem, entre o volume dos poros/vazios e o volume total da rocha. A porosidade pode ser de dois tipos, primária e secundária. A porosidade primária é o carácter inerente de uma rocha que se desenvolve durante a sua formação. A porosidade secundária é desenvolvida subsequentemente devido aos processos geológicos. O volume entre os poros vai depender da composição da formação geológica (Freeze & Cherry 1979; Singhal & Gupta, 2010).

É definida por:

$$\eta = \frac{100 \times V_v}{V}$$

Sendo,

V_v – os espaços vazios entre os grãos; V - o volume total da rocha.

- **Retenção específica W_m**

Em formações porosas não confinadas, a drenagem é realizada por gravidade até que as tensões de superfície e atração molecular da água igualem a força gravítica. Sob a influência da gravidade, a retenção de água nos poros/vazios, inclui quer a água adsorvida, quer a água capilar. Isto significa que é possível medir a capacidade de retenção conhecendo o volume retido nos poros sob drenagem gravítica (V_m), de acordo com a seguinte equação:

$$W_m = \frac{V_m}{V} \times 100\%$$

A capacidade de retenção máxima nos poros/vazios vai depender do tamanho destas partículas. Geralmente, quanto menor o seu tamanho, maior será a superfície de contacto entre as partículas e a água e maior será a quantidade de água absorvida, resultando numa retenção específica maior (Freeze & Cherry 1979; Fetter, 2014).

- **Cedência específica ou porosidade efectiva, μ ("specific yield")**

A cedência específica é a capacidade de drenagem de água num meio não confinado saturado sob gravidade, ou seja, é a razão entre o volume de água que drena de uma rocha saturada, devido à ação da gravidade, e o volume total da rocha (Meinzer, 1923). As moléculas de água agarram-se à superfície devido à tensão superficial da água, portanto o termo restringe-se ao armazenamento de água na parte superior do meio não confinado (Fetter, 2014).

A cedência específica é normalmente muito superior ao armazenamento específico, já que a água é libertada do armazenamento deixando os poros ainda saturados. A cedência específica costuma estar na faixa de 0,2–0,3, ou três a quatro ordens de magnitude acima do armazenamento elástico. Pode ser calculado segundo a seguinte equação:

$$\mu = \frac{V_g}{V} \times 100\%$$

sendo,

V_g - o volume de água que sai do meio poroso saturado, pela descida unitária do nível freático.

- **Fluxo e infiltração**

A água subterrânea não tem características estáticas, encontrando-se em constante movimento, seja em meios fissurados ou meios porosos, podendo este ser considerado como fluxo. O fluxo de água é definido como o movimento da água através dos vazios de solos ou rochas. Na variedade de tamanho, forma e conectividade de vazios em materiais geológicos. Mesmo que sejam os mesmos vazios, mas em locais diferentes, as direções de fluxo e as velocidades da água subterrânea devem ser diferentes, fluindo a água subterrânea mais rápido no centro do vazio e nos locais em contato com as partículas, movendo-se mais lentamente (Tang et al., 2017).

A água por infiltração ("seepage") é o fluxo de água preferencial (direção de fluxo principal) sem considerar os desvios pelas partículas. A diferença entre fluxo e infiltração está representada na Figura 6.

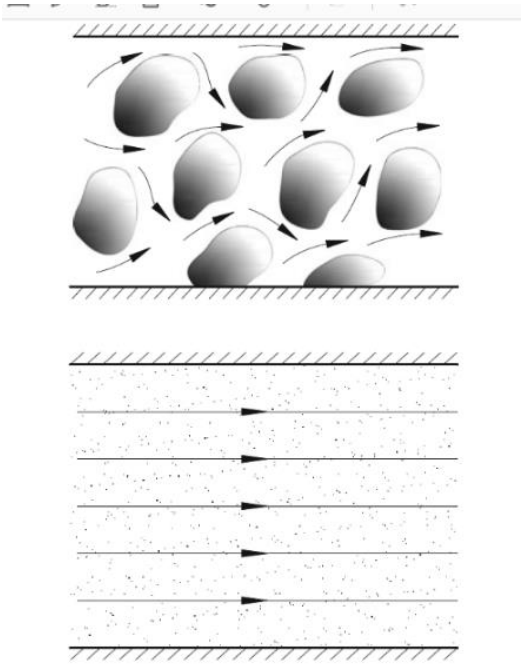


Figura 6. Representação esquemática de fluxo vs infiltração (“seepage”), (Tang et al., 2017).

A circulação de água subterrânea comporta-se de forma diferente dependendo do seu tipo de movimento. Pode encontrar-se das seguintes três formas: i) movimento laminar; ii) movimento turbulento; iii) movimento combinado. O movimento laminar pode ocorrer em meios fissurados ou porosos, sendo o movimento mais comum em fluxos subterrâneos. O movimento turbulento apenas ocorre em meios subterrâneos cavernosos ou em grandes fracturas rochosas.

- **Permeabilidade**

Todos os solos e rochas, mais ou menos porosos, que permitem o fluxo da água, dizem-se permeáveis. Portanto, a permeabilidade é definida como a propriedade de um material poroso que permite a passagem ou infiltração de água (Tang et al., 2017). Em geral, quanto menores forem as partículas e os vazios, menor será a permeabilidade. No entanto, uma alta porosidade não significa uma alta permeabilidade, como é o caso da argila, uma camada impermeável pois apresenta uma retenção específica muito elevada, visto que os poros são ocupados por “absorbed water” — o que dificulta o movimento e também devido às características tanto dos poros como da água, como o tipo de solo (arenoso, silto-argiloso, …), o tamanho e forma das partículas, a densidade do solo, tamanho e geometria dos vazios, a temperatura da água, entre outros (Tang et al., 2017).

- **Lei de Darcy e condutividade hidráulica (K)**

O fluxo de água subterrânea pode ser calculado através da equação que exprime a Lei de Darcy, a saber (Fetter, 2014; Tang et al., 2017).

$$Q = -K\ x\ A\ \mathrm{x}\ \mathrm{i} = -\mathrm{K}\ \mathrm{x}\ \mathrm{A}\ \mathrm{x}\frac{dh}{dl}$$

Sendo,

Q - o caudal de fluxo que atravessa uma determinada secção (m^3/dia); K - é a condutividade hidráulica, uma constante que serve como medida da permeabilidade do meio poroso (m/dia); A - é a área da secção (m^2); i ou dh/dl - o gradiente hidráulico, sendo representativo da perda de carga por unidade de comprimento do trajeto do fluxo.

O sinal negativo indica que o fluxo de água está a diminuir em carga. Pode ainda ser expresso em termos de velocidade do fluxo, velocidade de Darcy, ou fluxo específico (Fetter, 2014; Tang et al., 2017).

$$V = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}} = -K\ x\ \frac{dh}{dl}$$

Verifica-se que a velocidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico (Fetter, 2014; Tang et al., 2017). Se a equação for rearranjada em função da condutividade hidráulica K, ficaria (Fetter, 2014; Tang et al., 2017):

$$K = \frac{-\mathrm{Q}}{\mathrm{A}\ \mathrm{x}\ (\frac{\mathrm{dh}}{\mathrm{dl}})}$$

A condutividade hidráulica (K) mede a capacidade de uma formação para transmitir água. Tem as dimensões de L/T e é normalmente expressa em m/s. A condutividade hidráulica depende tanto das propriedades do meio (material rochoso), bem como do fluido. Em meios rochosos fraturados, K depende, essencialmente, da densidade, tamanho e interligação das fraturas (Fetter, 2014).

- **Permeabilidade (k)**

A permeabilidade (k), geralmente expressa em unidades *darcy*[1], difere da condutividade hidráulica por ser independente das propriedades do fluido, dependendo apenas das propriedades do meio. No entanto, os duas estão intrinsecamente relacionadas, isto é, para um determinado material geológico, um valor de condutividade hidráulica elevado vai corresponder um valor de permeabilidade elevado, igualmente para valores baixos de condutividade hidráulica correspondem valores baixos de permeabilidade (Singhal & Gupta, 2010).

- **Gradiente hidráulico (i)**

O gradiente i "é a diferença no nível de água entre dois níveis de colunas de água Δh, dividido pelo comprimento de fluxo Δl. O nível de água subterrânea, h, é uma medida do potencial de energia no momento de medição" (Gustafson, 2012). O nível h pode ser calculado através da equação a seguir apresentada que relaciona o nível e a pressão da água subterrânea p_w, com ρ_w sendo a densidade da água, g a força gravitacional e z o nível de referência (Figura 7):

$$h = \frac{p_w}{\rho_w g} + z$$

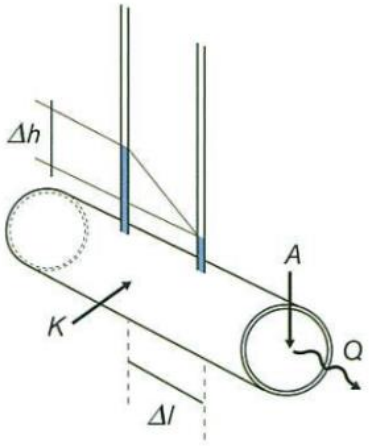


Figura 7. Representação do comportamento da água quando atravessa uma coluna (Gustafson, 2012).

A água comporta-se como se fluísse por uma coluna. O caudal Q flui pela coluna. O fluxo específico é o valor significativo em toda a área A. A constante K tem as dimensões $m^3/s(m^2)$ =m/s.

[1] Nota: 1 *darcy* = 10^{-5} m/s; 1 *millidarcy* (md) = 10^{-8} m/s.

Mas também pode ser calculada, dependendo do meio geológico, segundo a seguinte equação:

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu_w} \times k$$

Sendo:

µw - a viscosidade da água; k - a permeabilidade (específica) do meio, reunindo os efeitos do tamanho dos poros, forma, orientação e continuidade. A permeabilidade é independente do tipo de líquido que passa pelo meio.

O pressuposto usado na Lei de Darcy pode ser aplicado no estudo do fluxo de água nas fraturas pois, na realidade, a água flui nos planos das fraturas de forma laminar. Assim é possível relacionar a equação de Darcy com as propriedades dos planos, a abertura (a) e o seu comprimento (l), e calcular o caudal nas fraturas (qf), (Gustafson, 2012).

- **Transmissividade (T)**

A transmissividade (T) é definida como "a capacidade a que a água de uma dada densidade e viscosidade prevalente é transmitida através de uma unidade de largura de um aquífero (…) sob uma unidade de gradiente hidráulico" (Fetter, 2014), ou seja, é a capacidade de um aquífero de transmitir água subterrânea por toda a sua extensão saturada. Geralmente, é expressa em m^2/dia. Pode ser calculada através da seguinte expressão (adaptada de Fetter, 2014):

$$T = \mathrm{K\,x\,e}$$

Sendo,

K - a condutividade hidráulica (m/dia); e - a espessura da zona saturada (m).

Logan (1964), Huntley et al. (1992) e Batu (1998) propuseram as seguintes simplificações para o cálculo da transmissividade (T) a partir da capacidade específica (Q/s), a saber:

- Transmissividade segundo Logan (1964):

$$T = 1{,}22 \text{ x } \left(\frac{Q}{s}\right)$$

- Transmissividade segundo Huntley et al. (1992):

$$T = K \times \left(\frac{Q}{s}\right)^{1{,}18}$$

- Transmissividade segundo Batu (1998):

$$T = 1{,}385 \text{ x } (\frac{Q}{s})$$

O valor do coeficiente K para a equação de Huntley et al. (1992) obtém-se a partir do Quadro 4, em função das unidades que pretendam para T e Q/s.

Quadro 4. Valores para o coeficiente K da expressão de Huntley et al. (1992).

T	Q/s						
	m^2/s	m^2/min	m^2/dia	ft^2/s	ft^2/min	ft^2/dia	gpm/ft
m^2/s	0,93	0,0074	1,40E-08	0,056	4,50E-04	8,04E-05	4,20E-05
m^2/min	55,8	0,445	8,30E-05	3,38	0,027	5,10E-06	0,0025
m^2/dia	80300	640	0,12	4870	38,8	0,0073	3,61E+00
m^3/ano	2,90E+07	2,30E+03	43,9	1,78E+06	1,42E+04	2,66E+00	1,32E+03
ft^2/s	10	0,078	1,50E-05	0,61	0,0048	9,10E-07	4,50E-04
ft^2/min	600	4,78	9,00E-04	36,4	0,29	5,40E-05	2,70E-02
ft^2/dia	8,64E+05	6890	1,29	52400	418	7,80E-02	3,89E+01
ft^2/ano	3,16E+08	2,52E+06	4,72E+02	1,91E+07	1,53E+01	2,86E+01	1,42E+04

2.3. Índices geotécnicos e classificações geomecânicas: uma síntese

O maciço rochoso é caracterizado como um meio heterogéneo, descontínuo e complexo (CFCFF, 1996; Barton & Quadros, 2015). Por isso, a avaliação do seu comportamento é de extrema importância. O comportamento geomecânico é estudado em função das suas aplicações, mediante a observação direta e a realização de simples ensaios, através dos índices de qualidade de um dado maciço. Estes índices relacionados com os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos do maciço, obtêm-se as classificações multi-paramétricas dos maciços rochosos. O comportamento do maciço rochoso está sujeito às condições de tensão in situ e à circulação das águas subterrâneas. A qualidade do maciço rochoso pode então ser quantificada numa base multi-paramétrica (e.g., Kirkaldie, 1988; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Neste trabalho serão apenas apresentados o índice “Rock Quality Designation” (RQD) e as classificações “Rock Mass Rating” (RMR) e “Rock Tunneling System” (Q-System), destacando-se dos demais por serem mais relevantes nos estudos hidrogeomecânicos para além de serem a base para os índices hidrogeomecânicos HP-Value e HC-System.

RQD

O RQD ('Rock Quality designation') avalia a densidade de descontinuidades (fracturas, diaclases, falhas) em termos do seu grau de fracturação, sendo estimado a partir dos dados de recuperação de testemunhos de sondagem. O RQD é definido como o rácio entre o comprimento do testemunho recuperado maior que 10 cm, e de boa qualidade, e o comprimento total perfurado, devendo ser expresso em percentagem. Embora o RQD (%) seja utilizado, principalmente, na avaliação das propriedades geomecânicas das rochas, também é considerado ser um parâmetro importante na avaliação da permeabilidade (Singhal & Gupta, 2010).

O RQD (%) pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$RQD = \frac{\sum comprimento\ dos\ fragmentos\ maiores\ que\ 10cm}{comprimento\ total\ da\ amostra} \times 100$$

A Figura 8 esquematiza a medição dos fragmentos para o cálculo do RQD.

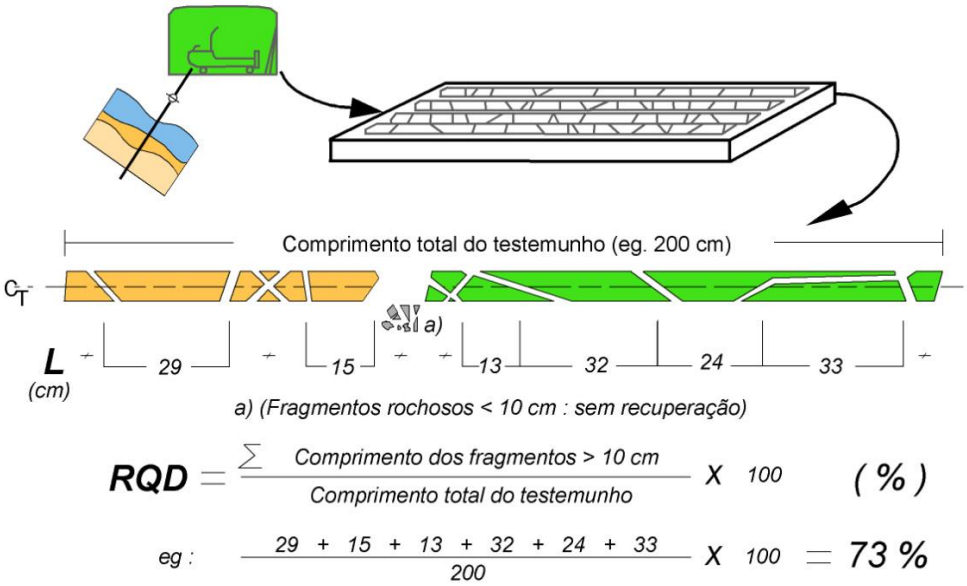


Figura 8. Esquema dos procedimentos para a obtenção do RQD (segundo Deere, 1963; Deere et al., 1967; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). Retirado de Pinheiro (2013).

O Quadro 5 descreve a qualidade da rocha segundo o valor obtido para este índice. Sendo J_v o número de descontinuidades por metro cúbico de maciço rochoso. Para J_v = 4.5; RQD = 100 % (Palmström, 1995, 2005; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). As equações apresentadas podem ser utilizadas quando não é possível o estudo dos testemunhos de sondagem, neste caso o valor de RQD pode ser determinado através dos dados geoestruturais e geotécnicos do maciço rochoso.

Quadro 5. Índice RQD (%), (segundo Deere et al., 1967).

RQD	
Valor (%)	**Classificação**
0-25	Muito Fraco
25-50	Fraco
50-75	Razoável
75-90	Bom
90-100	Muito Bom
RQD=115-(3.3*Jv) Palmström, 1995 **RQD=110-(2,5*Jv) Palmström, 2005**	

RMR

O sistema multi-paramétrico "Rock Mass Rating" (RMR) foi desenvolvido por Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989) e aperfeiçoado por diversos profissionais que adaptaram o método para aplicação na engenharia (e.g., Serafim & Pereira, 1983; Barton & Bieniawski, 2008; Celada & Bieniawski, 2020).

O RMR é uma classificação geomecânica que avalia a qualidade do maciço distribuindo pesos por seis parâmetros geológico-geotécnicos (P1 a P6):

- P1: Índice de qualidade de rocha (RQD);
- P2: Resistência do material-rocha (índices de carga pontual e/ou de compressão uniaxial);
- P3: Espaçamento entre descontinuidades (grau de fracturação);
- P4: Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades;
- P5: Condições de percolação de água;
- P6: Correção da orientação das descontinuidades relativamente ao sentido de escavação.

O resultado do índice RMR para um determinado maciço pode variar entre 0 e 100 e é obtido através da soma algébrica dos pesos relativos de cada parâmetro, apresentada na expressão seguinte (Bieniawski, 1989):

$$RMR = \sum P1, P2, P3, P4, P5 + P6$$

Q-System

O 'Rock Tunneling System', ou simplesmente Q–System, é uma classificação geomecânica de maciços rochosos, desenvolvida por Barton et al. (1974, 1980), aplicada em estruturas subterrâneas como túneis e cavernas com teto em abóboda, com o objetivo de determinar a sua estabilidade e os requisitos para o seu suporte tanto durante ou após a sua construção.

A fim de determinar a qualidade dos maciços, os autores desenvolveram o índice Q-Value (ou, apenas, Q), ou seja, um valor numérico, a partir de uma escala logarítmica entre 0,001 (pior qualidade) e 1000 (melhor qualidade). Esta engloba as diferentes propriedades do material-rocha, o grau de fracturação (RQD), as condições geotécnicas das descontinuidades e geo-hidráulicas do maciço rochoso (Barton & Chouvey, 1977; Barton & Hsieh, 1989, Barton & Quadros, 2002; NGI, 2015).

O índice Q obtém-se a partir da seguinte equação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

sendo,

RQD - o índice de qualidade da Rocha ou "Rock Quality Designation"; J_n - o número de famílias de descontinuidades; J_r - a rugosidade das descontinuidades, J_a - o índice de alteração das descontinuidades; J_w - o índice de redução de água das descontinuidades; SRF - o estado de tensão do maciço *in situ.*

É de notar que a equação acima apresentada é a multiplicação de três frações que representam a compartimentação do maciço (bloco-unitário), a resistência ao corte e o estado de tensão ativa, respetivamente (Barton et al. 1974; NGI, 2015).

O Quadro 6 resume as propriedades do índice RQD e as classificações RMR e Q-system.

Quadro 6. Síntese dos índices e classificações RQD, RMR e Q-System (sintetizado a partir de Deere et al., 1967; Barton et al. 1974; Bieniawski, 1989; Barton & Bieniawski, 2008; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; NGI, 2015; Celada & Bieniawski, 2020).

Índice / Classificação	Aplicação	O que avalia	Parâmetros usados	Método	Expressões para determinação dos índices	Categorias/ Classes		
						Classificação	**RQD (%)**	
RQD	Todos os tipos de estudos geológico-geotécnicos	Densidade das fraturas/ Qualidade do maciço	Comprimento total Comprimento do núcleo de sondagem, maior que 10cm	Valor total, em percentagem	RQD = ∑(comp. dos fragmentos ≥ 10cm)/comp. Total) x 100	Muito Fraco	0-25	
						Fraco	25-50	
						Razoável	50-75	
						Bom	75-90	
						Muito Bom	90-100	
						Classe	**Classificação**	**RMR**
RMR	Escavações de túneis em maciços rochosos fraturados	Comportamento do maciço/ Suporte recomendado	RQD (%) Resistência do maciço Espaçamento entre descontinuidades Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades Presença de água Orientação das descontinuidades	Através de valores ponderais	RMR = ∑P1,P2,P3,P4,P5 + P6	Classe I	Muito Bom	81-100
						Classe II	Bom	61-80
						Classe III	Razoável	41-60
						Classe IV	Fraco	21-40
						Classe V	Muito Fraco	<20
Q-System	Escavações de túneis em maciços rochosos fraturados	Comportamento do maciço/ Suporte recomendado	RQD (%) Número de famílias de descontinuidades (Jn) Índice de rugosidade das descontinuidades (Jr) Índice de alteração das descontinuidades (Ja) Fator de redução de caudal (Jw) Estado de tensão do maciço (SRF)	Através de valores ponderais	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$			

2.4. Índices hidrogeomecânicos: HP-Value e HC-system

2.4.1. Hydro-Potential value (HP-Value) – Índice de Potencial Geohidráulico

O Hydro-Potential Value, ou, como doravante será denominado, HP-Value, é um índice hidrogeomecânico apresentado e desenvolvido por Gates (1995, 1997, 2003), como solução para o problema da avaliação da infiltração de água subterrânea em maciços rochosos fraturados, presente em obras e projetos de engenharia civil ou mineira, como escavações em profundidade de túneis e galerias mineiras. Este índice permite, assim, estimar, de forma semi-quantitativa, rápida e versátil, o potencial hidráulico de um dado maciço rochoso para a circulação de água subterrânea.

Através de parâmetros geomecânicos derivados do Q-System (Barton et al., 1974, 1980) é possível relacionar diferentes características geológico-geotécnicas dos maciços rochosos com as propriedades da água como a condutividade hidráulica de forma a prever o comportamento hidrogeomecânico do maciço em estudo.

O HP-Value combina, assim, os seguintes fatores (Gates, 1997, 2003):

- Estrutura do maciço rochoso - $\frac{RQD}{J_n}$
- Resistência do maciço rochoso à circulação de fluidos - $\frac{J_r}{J_k \cdot J_{af}}$
- Presença de água no maciço rochoso - J_w

Gates (1997, 2003) reúne assim as propriedades essenciais à determinação da percolação da água em quadros de referência (Quadros 7 a 12), que devem ser usados no cálculo do HP-Value, facilitando a caracterização da qualidade do maciço em estudo e o seu potencial geohidráulico.

A equação a seguir define a relação matemática entre os parâmetros mencionados, Gates (1997, 2003):

$$HP_{value} = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_k \cdot J_{af}} \cdot J_w$$

Onde:

RQD - índice de qualidade do maciço, “Rock Quality Designation”; J_n - índice de descontinuidades; J_r - índice de rugosidade das descontinuidades; J_{af} - fator de abertura e forma das descontinuidades; J_k - fator da condutividade hidráulica das descontinuidades; J_w - fator de circulação da água das descontinuidades.

Os valores numéricos para o HP-Value variam de $1.33x10^{-3}$ para maciços excecionalmente fracos a fraca qualidade hidrogeotécnica, até 800 para maciços excecionalmente competentes e de excelente qualidade hidrogeotécnica (Gates, 1997, 2003).

Descrição dos parâmetros

- **Rock Quality Designation, RQD**

No caso do RQD, o quadro de referência foi adaptado de Deere et al. (1967) e Palmström (2005), sendo o aceite e utilizado também para a obtenção do índice Q-system.

Quadro 7. Índice qualidade do maciço (RQD) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Deere et al., 1967 e González de Vallejo & Ferrer, 2011).

RQD	
Valor (%)	**Classificação**
0-25	Muito Fraco
25-50	Fraco
50-75	Razoável
75-90	Bom
90-100	Muito Bom
RQD=115-(3.3*Jv) Palmström, 1995 **RQD=110-(2,5*Jv) Palmström, 2005**	

- **Índice de descontinuidades, J_n**

As descontinuidades podem ser agrupadas em famílias de descontinuidades quando apresentam características semelhantes, relativamente à sua atitude geológica. Num maciço rochoso pode existir a ocorrência de uma ou mais famílias dominantes, com ou sem tendência para se organizarem em famílias, denominadas de aleatórias, ou mesmo praticamente sem descontinuidades, considerando-se maciças (Gates, 2003). Dependendo destas condições foram atribuídas as classificações patentes no Quadro 8.

Quadro 8. Índice de descontinuidades (J_n) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

J_n	
Valor	**Classificação**
0,5 - 1,0	Nenhuma, ou poucas descontinuidades
2	Uma família
3	Uma família com aleatórias
4	Duas famílias
6	Duas famílias com aleatórias
9	Três famílias
12	Três famílias com aleatórias
15	Quatro ou mais famílias com aleatórias muitos próximas; maciço altamente fracturado
20	Rocha esmagada, tipo "solo"

- **Índice de rugosidade, J_r**

A rugosidade das rochas pode ser classificada desde o mais rugoso e ondulado até o mais liso e planar. Esta característica é especialmente importante pois vai influenciar diretamente o percurso da água pelas descontinuidades, tal como vai influenciar a sua abertura. O Quadro 9 apresenta a classificação relativamente à superfície das descontinuidades:

Quadro 9. Índice de rugosidade (Jr) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

J_r	
Valor	**Classificação**
4	Descontínuas
3	Rugosas ou irregulares, onduladas
2	Lisas, onduladas
2	Estriadas, ondulante
1.5	Rugosas ou irregulares, planas
1.5	Estriadas, planas
1	Lisas, planas, polidas

Este parâmetro pode ser avaliado, com algum rigor, usando um medidor de contorno e comparado com perfis padrão desenvolvidos por Barton & Chouvey (1977). Embora é suficiente em ambiente de estudo de campo a estimativa pela inspeção da rugosidade na descontinuidade (Gates, 1997, 2003).

- **Fator de abertura e forma, J_{af}**

Tal como o J_r, o fator de abertura J_{af}, que relaciona a forma e tamanho da abertura das descontinuidades, é muito importante na avaliação da circulação da água num maciço rochoso pois vai influenciar a quantidade de água que passa por cada descontinuidade.

Como foi mencionado acima, a circulação da água, em volume, também é influenciada pela rugosidade dos planos, e esta está dependente da abertura e vice-versa.

A abertura pode ser classificada com base nos valores de 90% do conjunto de descontinuidades estudadas, assim Hencher (1987) e Harp & Noble (1993) desenvolveram o Quadro 10, sendo depois modificada por Gates (1997, 2003). O tamanho médio da abertura mecânica das descontinuidades pode ser, por exemplo, medidas no campo usando um calibrador de folga ou uma fita graduada (Barton & Hsieh, 1989).

Quadro 10. Índice abertura e forma (Jaf) e classificação (retirado de Gates, 1997, 2003; adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

J_{af}	
Valor	**Classificação**
1	Descontinuidades fechadas, < 0,1 mm
1,2	90% das descontinuidades, abertura entre 0,1 ≤ 1,0 mm
1,4	90% das descontinuidades, abertura entre 1,0 ≤ 5,0 mm
1,8	90% das descontinuidades, abertura entre 5,0 ≤ 10,0 mm
2,5	90% das descontinuidades, abertura entre 10,0 ≤ 20,0 mm
5	90% das descontinuidades, abertura entre 20,0 ≤ 50,0 mm
7,5	90% das descontinuidades, abertura entre 50,0 ≤ 100,0 mm
10	90% das descontinuidades, abertura entre 100,0 ≤ 200,0 mm
15	90% das descontinuidades, abertura > 200,0

- **Fator de condutividade hidráulica, J_k**

A presença ou ausência de preenchimento nas descontinuidades vai determinar a sua condutividade hidráulica, definido como a taxa de fluxo de água, expresso em metros por dia (m/dia), pois o tipo e a quantidade de preenchimento vão influenciar a circulação da água pelas descontinuidades. Desta forma, uma descontinuidade limpa e aberta terá uma condutividade maior quando comparada com uma descontinuidade com preenchimento mineral e fechada. Com estas condições em mente, Freeze & Cherry (1979) e mais tarde modificado por Gates (1997, 2003), definiu-se a classificação do Quadro 11.

Quadro 11. Fator de condutividade hidráulica (J_k) e classificação. (segundo Freeze e Cherry, 1979, retirado de Gates, 1997, 2003).

J_k		
Valor	**Condutividade hidráulica (m/dia)**	**Classificação**
1	<10^-5	Todas apertadas ou com preenchimento de calcite/quartzo, sem fluxo de água
2	10^-5 - 10^-2	90% das descontinuidades preenchidas com argila, fluxo de água baixo
3	10^-2 - 10^-1	90% das descontinuidades preenchidas com areia siltosa, fluxo de água moderado
3,5	10^-1 - 10^3	90% das descontinuidades preenchidas com areia limpa ou com cascalho, fluxo de água moderado a elevado
4	10^3 - 10^5	90% das descontinuidades limpas e moderadamente abertas, bom fluxo de água
5	>10^5	90% das descontinuidades abertas, limpas, muito bom fluxo de água

- **Fator de circulação de água, J_w**

O fator de água J_w é uma medida de circulação de água nas descontinuidades e está sujeita à ação da pressão de água nos maciços fissurados e nas descontinuidades, sendo maior quanto menor for J_w, é, portanto, inversamente proporcional à pressão da água, segundo Barton et al. (1974). O Quadro 12 resume as descrições e classificações para J_w, segundo a medição da quantidade de água nas descontinuidades em gotas por minuto (Gotas/min) e em litros por segundo (L/s), sugerido por Barton et al. (1974) e Hencher (1987), e mais tarde modificado por Gates (1997, 2003) que incluiu os itens 2 a 5, valores 0,94 e 0,66, respetivamente na tabela de referência.

Quadro 12. Fator de circulação de água (J_w) e classificações (segundo Barton et al., 1974, Hencher, 1987, retirado de Gates (1997, 2003).

J_w			
Valor	**Gotas/min**	**L/s**	**Classificação**
1	<1	<1*10^-6	Seco
0,94	1≤10	1 x 10^-6 ≤1 x 10^-5	Húmido
0,86	10≤100	1 x 10^-5 ≤1 x 10^-4	Gotas
0,76	>100	1 x 10^-4 ≤1 x 10^-3	Gotejante
0,66		1 x 10^-3≤1 x 10^-2	Escorrência
0,5		1 x 10^-2≤1 x 10^-1	Fluxo ligeiro
0,33		1 x 10^-1≤1	Fluxo moderado
0,2		> 1	Fluxo intenso

Em Gates (2003), o autor explica as suas modificações, mencionando que "normalmente, os afloramentos superficiais ao redor da bacia alvo estão secos. Assim, uma classificação no valor de 1 é mais comum para essas descontinuidades. No entanto, em alguns casos, pode haver infiltrações ou nascentes permanentes fluindo das descontinuidades do maciço rochoso. As

descontinuidades para esta rocha receberiam uma classificação inferior a 1, dependendo do fluxo de descarga".

Potencial da circulação geohidráulica: HP-Value

O HP-Value pode ser usado para estimar o potencial de circulação geohidráulica, ou seja, os caudais (Q, L/min) a partir da equação:

$$Q\ (L/min) = 3{,}785 * (919{,}71e^{-2{,}314HP})$$

Se o valor de HP-Value for inferior a 3, pois indica que o maciço rochoso terá circulação hidráulica subterrânea, não sendo previstos fenómenos relevantes de circulação geohidráulica para valores de HP superiores a 3. Não sendo também possível o cálculo da capacidade específica (Q/s) e do caudal (Q) projetado por Gates (2003), nos casos onde o valor de HP é inferior a 3. Isto acontece quando os maciços rochosos são muito competentes e apresentam descontinuidades muito apertadas, dificultando a circulação da água.

Para maciços fraturados com valores de HP-Value menores, normalmente apresentam valores de caudal maiores, contrariamente ao caso de maciços mais competentes onde os valores de HP-Value são maiores, resultando em caudais menores (Gates, 1997, 2003). O gráfico apresentado na Figura 9 representa a relação entre os valores de HP-Value, obtidos por Gates (2003) no estudo de três taludes e dois túneis, e os valores para a capacidade específica (Q/s) e de caudal (Q), obtidos a partir de poços situados em maciços rochosos locais e semelhantes aos estudados previamente. Os poços mencionados são semelhantes a drenos colocados em maciços rochosos, com taxas elevadas de descarga de águas de infiltração. Verifica-se que 83% dos poços estudados indicam maiores caudais e capacidades específicas do que os valores de HP-Value obtidos em litologias semelhantes na vizinhança dos poços.

As equações na Figura 9 para a capacidade específica (Q/s) e de caudal (Q) foram obtidas a partir da curva de regressão projetada no gráfico pelos valores respetivos obtidos por Gates (2003), sendo a curva no topo referente aos valores de caudal e a inferior aos valores de capacidade específica.

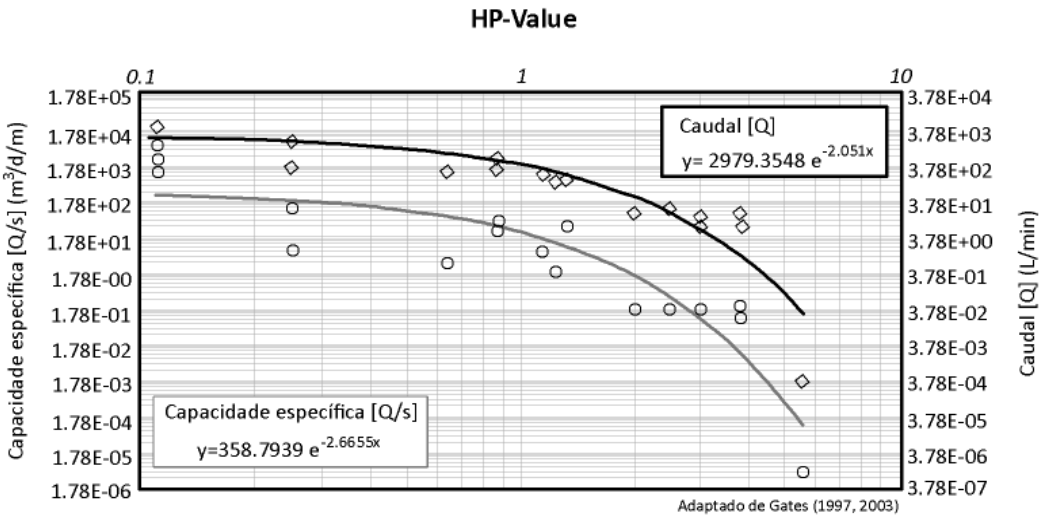


Figura 9. Gráfico comparativo entre os valores de HP e os valores da capacidade especifica e caudal — "Ábaco de Gates" (adaptado de Gates, 1997, 2003).

2.4.2. Rock Mass Hydraulic Conductivity (HC-System) – Índice de Condutividade Hidráulica

O 'Rock Mass Hydraulic Conductivity', ou HC-System, originou da necessidade que existe de compreender as propriedades hidrológicas dos maciços rochosos em projetos geotécnicos como escavações de túneis ou minas, construções de barragens, extração de petróleo, ou na estabilização de taludes. Oferece um método simples e pouco dispendioso para estimar a condutividade hidráulica em maciços rochosos fraturados e, assim, estimar o comportamento do fluxo de fluídos em meios consolidados fraturados, um tema que tem vindo a ganhar cada vez mais atenção desde que o estudo do comportamento da água nestas obras de engenharia se tornou um padrão.

O Conselho Nacional de Investigação nos Estados Unidos da América (NRC), em 1996, definiu que os sistemas "double packer" podem ser utilizados para estimar a condutividade hidráulica de maciços fraturados através de furos de sondagem com mecanismos insufláveis (CFCFF, 1996). O entanto, tal como Gates (1997, 2003), Hsu et al. (2008, 2011) sentiram a necessidade de reduzir os custos económicos dos ensaios hidráulicos e propõe uma nova aplicação das classificações geomecânicas e diferentes equações empíricas, baseadas no conceito de que a permeabilidade do maciço rochoso diminui com a profundidade, na estimação da condutividade hidráulica de rochas fraturadas com o uso de poucos ensaios *in situ*.

O novo modelo desenvolvido, designado como HC-System, foi verificado com dados hidrogeológicos e hidrogeotécnicos, tais como o ângulo e largura das descontinuidades,

velocidade do fluxo e condutividade hidráulica, obtidos *in situ* de dois programas de investigação que contaram com a execução de três sondagens com amostragem não destrutiva de rocha. Após uma análise comparativa dos dados, a relação entre condutividade hidráulica e os restantes dados foi identificada (Hsu et al., 2008, 2011). Há ainda novos desenvolvimentos, em curso, dados à estampa por outros autores que poderão constituir boas pistas de investigação futuras (e.g., Cahyadi et al., 2015, 2017; Widodo et al., 2016; Jembere & Yihdego 2019).

O modelo empírico resultante para a construção do sistema HC-System teve em consideração que as seguintes propriedades influenciam o estudo da permeabilidade ou propriedades hidráulicas em rochas fraturadas (Hsu et al., 2008, 2011): i) tensão geostática; ii) litologia; iii) propriedades das fraturas (abertura, frequência, comprimento, orientação e ângulo, interconectividade entre fraturas, material de preenchimento e características dos planos de fratura); iv) Profundidade.

Os parâmetros estabelecidos para o modelo empírico encontram-se incorporados em classificações já conhecidas, ou foram criados novos índices hidrogeomecânicos. Assim, o HC-System aplica o Índice de qualidade de maciços rochosos ou "Rock Quality Designation" (RQD), o Índice de profundidade ou "Depth Index" (DI), o Índice de Preenchimento da Caixa de Falha ou "Gouge Content Designation" (GCD) e o Índice de Permeabilidade Litológica ou "Lithology Permeability Index" (LPI).

Descrição dos parâmetros

- **Índice de qualidade de maciços rochosos, RQD**

O RQD vai ser utilizado para avaliar a influência que as características das descontinuidades e a qualidade do maciço têm na permeabilidade. (Hsu et al., 2008, 2011).

O seu valor pode ser determinado através da seguinte equação:

$$\mathrm{RQD} = \frac{\sum \text{Comprimento das peças intactas da amostra} < 100\ \text{mm}}{\text{Comprimento Total da amostra,mm}} \times 100\% = \frac{R_S}{R_T} \times 100\%$$

É de notar que o valor de RQD pode diminuir com o aumento da fraturação no tarolo estudado. (Hsu et al., 2008).

- **Índice de profundidade, DI**

Este índice apoia-se na premissa de que a permeabilidade diminui com o aumento da profundidade, principalmente pela diminuição da abertura e espaçamento das descontinuidades. Esta redução pode ser explicada pela ação das tensões geostáticas em rochas fraturadas a maiores profundidades, provocando, consequentemente, a redução da permeabilidade (Lee & Farmer, 1993; Singhal & Gupta, 2010).

A equação a seguir apresentada relaciona a profundidade com a permeabilidade através do comprimento total do furo de sondagem (L_T) e a profundidade de metade do intervalo dado por um ensaio "double packer" (ensaio de Lugeon ou de permeabilidade) no furo (L_c), originando o valor DI (Hsu et al., 2008, 2011).

$$DI = 1 - \frac{L_c}{L_T}$$

Os valores obtidos pela equação encontram-se entre zero e um. Quanto maior for o valor de DI, maior será a permeabilidade.

- **Índice de preenchimento da caixa de falha, GCD**

A GCD é um índice que avalia a influência do preenchimento das descontinuidades com a condutividade hidráulica e permeabilidade. Esse preenchimento vai influenciar a diminuição ou aumento da permeabilidade, dependendo da sua frequência nas descontinuidades e do tipo de material de enchimento, seja mineral, rocha, solo argiloso/arenoso, entre outros. É comum encontrar valores de permeabilidade menor em descontinuidades de preenchimento argiloso em contraste com valores maiores em materiais menos coesivos (Singhal & Gupta, 2010).

A equação seguinte define o GCD, que se deverá encontrar entre zero e 1:

$$GCD = \frac{R_G}{R_T - R_S}$$

Sendo,

RG - o comprimento total do preenchimento (Gouge content).

O valor superior de GCD representa o maior valor de preenchimento na amostra retirada do furo de sondagem, assim reduzindo a permeabilidade total da amostra (Hsu et al., 2008, 2011).

- **Índice de permeabilidade litológica, LPI**

Nos estudos hidrogeomecânicos, o maciço rochoso é um material heterogéneo em composição mineralógica, tamanho do grão, textura, cor, fracturação, alteração, entre outros. Torna-se, portanto, importante a avaliação da litologia de cada maciço no estudo da permeabilidade, visto que esta depende muito do tamanho, distribuição e forma dos poros e partículas na rocha, sendo diferentes para cada tipo de família de rochas (sedimentar, ígnea ou metamórfica).

Hsu et al. (2008, 2011) acrescenta que em "rochas sedimentares o tamanho dos grãos é a característica mais importante, porque uma granulometria grosseira e material bem classificado obterá valores de permeabilidade maiores comparando com sedimentos de granulometria fina como siltes e argilas." Assim, no estudo hidrogeológico, a porosidade e permeabilidade são características individuais de cada maciço rochoso, intacto ou fraturado. Sendo o estudo das fraturas o parâmetro mais importante para formações de rocha, como é o estudo do tamanho do grão para formações sedimentares.

O parâmetro LPI é estimado através de um valor de classificação obtido pela média dos valores de referência e a média dos valores de condutividade hidráulica, fornecidos por Bear (1972), Spitz & Moreno (1996) e Singhal & Gupta (2010), para alguns dos tipos mais comuns de rocha, estando apresentados no Quadro 13.

Quadro 13. Avaliação e valores para LPI (adaptado de Hsu et al., 2008, 2011). Retirado de Meirinhos, 2015).

Litologia	Condutividade hidráulica (m/s)				Intervalo de Pesos	Pesos Sugeridos
	Referência [1]	Referência [2]	Referência [3]	K (média)		
Sandstone	10^{-6}~10^{-9}	10^{-7}~10^{-9}	10^{-7}~10^{-9}	$10^{-7.5}$	0,8-1,0	1
Silty Sandstone	-	-	-	-	0,9-1,0	0.95
Argillaceous Sandstone	-	-	-	-	0,8-0,9	0.85
S.S.interbedded with some Sh.	-	-	-	-	0,7-0,8	0.75
Alternations of S.S: & Sh.	-	-	-	-	0,6-0,7	0.65
Sh. Interbedded wuth some S.S.	-	-	-	-	0,5-0,7	0.6
Alternations of S.S & Mudstone	-	-	-	-	0,5-0,7	0.55
Dolomite	10^{-6}~$10^{-10.5}$	10^{-7}~$10^{-10.5}$	10^{-9}~10^{-10}	10^{-8}	0,6-0,8	0.7
Limestone	10^{-6}~$10^{-10.5}$	10^{-7}~10^{-9}	10^{-9}~10^{-10}	10^{-8}	0,6-0,8	0.7
Shale	10^{-10}~10^{-12}	10^{-10}~10^{-13}	-	$10^{-10.5}$	0,4-0,6	0.5
Sandy Shale	-	-	-	-	0,5-0,6	0.6
Siltstone	10^{-10}~10^{-12}	-	-	10^{-11}	0,2-0,4	0.3
Sandy Siltstone	-	-	-	-	0,3-0,4	0.4
Argillaceous Siltstone	-	-	-	-	0,2-0,3	0.2
Claystone	-	10^{-9}~10^{-13}	-	10^{-11}	0,2-0,4	0.3
Mudstone	-	-	-	-	0,2-0,4	0.2
Sandy Mudstone	-	-	-	-	0,3-0,4	0.4
Silty Mudstone	-	-	-	-	0,2-0,3	0.3
Granite	-	-	10^{-11}~10^{-12}	$10^{-11.5}$	0,1-0,2	0.15
Basalt	10^{-6}~$10^{-10.5}$	10^{-10}~10^{-13}	-	$10^{-11.5}$	0,1-0,2	0.15

[1] *B.B.S. Singhal & Gupta (2010) ; 2 Spitz & Moreno (1996); 3 Bear (1972)*

Sistema de permeabilidade em maciços rochosos – HC-System

Considerando todos os parâmetros descritos, é definida a seguinte equação que representa o novo sistema do índice de condutividade hidráulica, designado de HC-System:

$$HC = \left(1 - \frac{RQD}{100}\right) \times (DI) \times (1 - GCD) \times (LPI)$$

O valor obtido em cada secção entre parênteses deve ser sempre maior que zero (0) e menor que um (1). Quanto maior o valor de cada fração/parâmetro, maior será a permeabilidade, assumindo que cada parâmetro tem o mesmo peso, podendo ser atribuídos diferentes pesos dependendo das condições observadas em campo e dos dados recolhidos.

Por fim, foi determinada a dependência do HC-System em relação à condutividade hidráulica e estabeleceram as seguintes equações (Hsu et al., 2008, 2011):

$$K = 2{,}93 \times 10^{-6} \times HC^{1{,}380}, R^2 = 0{,}866, \text{(m/dia)}$$

$$e$$

$$K = 2{,}31 \times 10^{-6} \times HC^{1{,}342}, R^2 = 0{,}905, \text{(m/dia)}$$

A segunda equação deriva de um furo de sondagem onde o valor de GDC é sempre igual a um, ou seja, a estimativa da condutividade hidráulica através desta equação é mais precisa em casos onde as fraturas não contêm preenchimento.

Os autores também desenvolveram um segundo modelo empírico baseado nos resultados obtidos na exploração de taludes com furos de sondagem e ensaios hidráulicos realizados com três técnicas de prospeção que relacionam a dependência das características hidrogeológicas do maciço como a abertura das fraturas, o ângulo e a velocidade do fluxo, à condutividade hidráulica. Enquanto a análise revelou que a largura da fratura e a velocidade do fluxo mostraram boa correlação com a condutividade hidráulica, o ângulo de fratura e a condutividade hidráulica não estavam relacionadas (Hsu et al., 2008, 2011). Este modelo não será estudado neste trabalho, visto que carece de uma fase exploratória tão extensiva como o modelo exige.

Capítulo III

Avaliação do potencial hidrogeomecânico do maciço rochoso: mananciais de Paranhos-Salgueiros (área urbana do Porto)

(página propositadamente em branco)

3. Avaliação do potencial hidrogeomecânico do maciço rochoso: mananciais de Paranhos-Salgueiros (área urbana do Porto)

3.1. Generalidades

Este estudo apresenta, numa abordagem multidisciplinar, uma caracterização geológica, geotécnica, hidrogeológica e hidrogeomecânica do subsolo granítico da cidade do Porto. Para tal, foi considerado como objeto de investigação, a galeria subterrânea correspondente a uma parte do traçado do antigo Manancial de Paranhos-Salgueiros. Esta galeria tem uma extensão total de, aproximadamente, 3 km, com uma profundidade máxima de -20 m, desenvolvendo-se desde a Praça Nove de Abril à Praça Gomes Teixeira. A galeria objeto deste estudo corresponde ao Manancial de Paranhos, também conhecido como Mina de Arca d'Água, com uma extensão de 2.2 km e que pode ser dividida em duas secções principais (Chaminé et al., 2010, Afonso et al. 2018), a saber (Figura 10):

- o primeiro trecho, designado por Túnel 1, tem um comprimento de 948 m, estendendo-se desde a Rua de Costa e Almeida, junto ao Jardim de Arca d'Água (ou Praça 9 de Abril), até à Rua Nova do Regado, apresentando 3 portas de entrada e 9 poços (localmente conhecidos como óculos) de ventilação. A profundidade desta secção varia entre -1 m, próximo à Rua Nova do Regado e -20 m, sob a Rua Nove de Abril;
- o segundo tramo, designado por Túnel 2, tem uma extensão de 1252 m e desenvolve-se entre a Rua de São Dinis e junto à estação de metro da Lapa, apresentando 2 portas e 12 poços de ventilação. A profundidade deste trecho varia entre -1 m, junto à Rua Nova do Regado e -15 m, sob a Rua Brito Capelo; esta galeria foi dividida em três sectores distintos de estudo, Setor 1, Setor 2 e Setor 3.

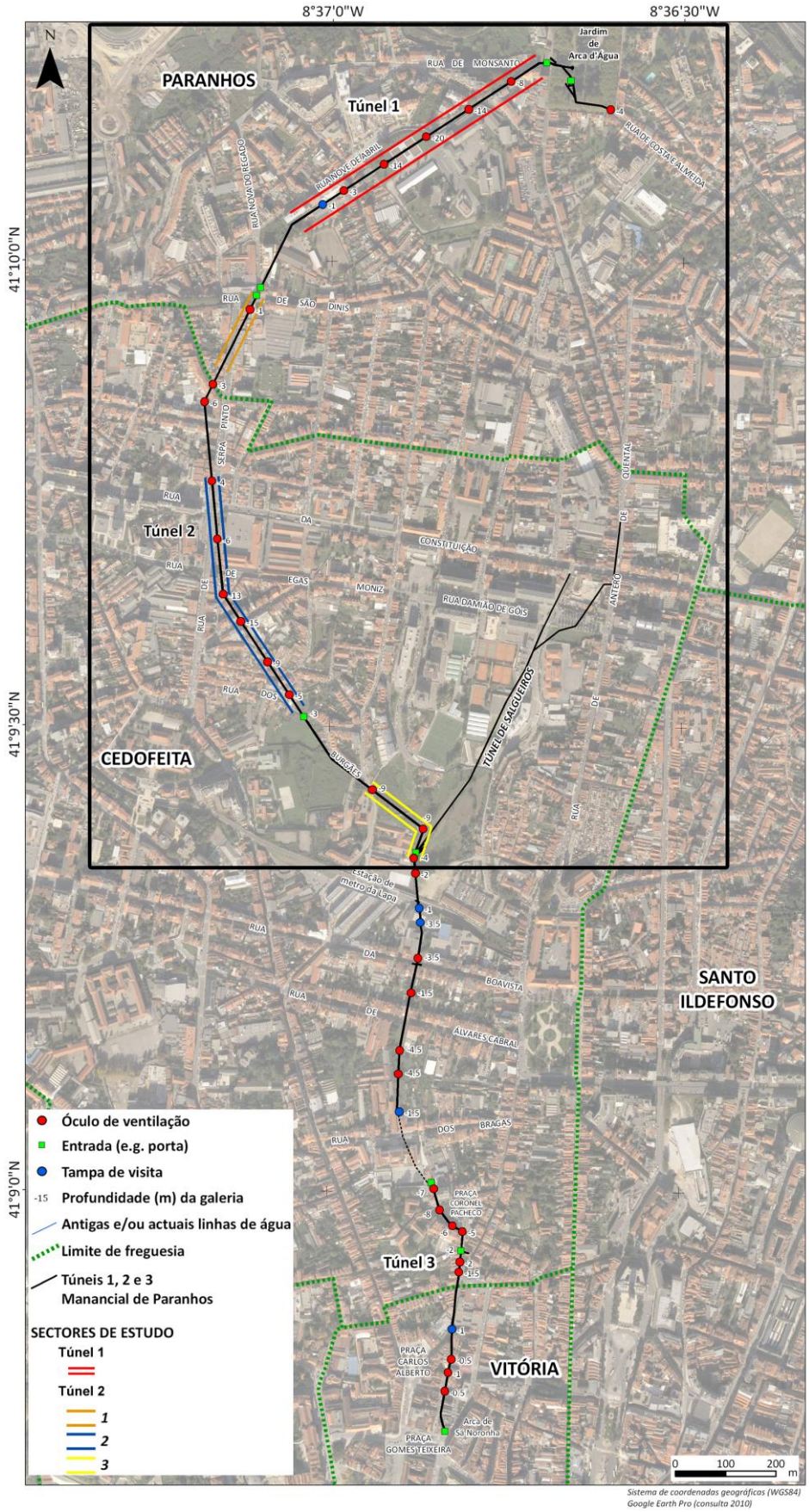


Figura 10. Imagem de satélite da área de estudo (adaptado de Google Earth Pro), (atualizado de Martins, 2011).

Moreira (2009, 2012) apresentou a primeira caracterização preliminar geológico-geotécnica e geomecânica do Túnel 1 e, posteriormente, Martins (2011) e Madureira (2012) apresentaram uma caracterização geológico-geotécnica e hidrogeomecânica do Túnel 2. O trabalho de fôlego de Afonso (2011) apresenta também uma síntese avançada da temática, mas com a componente hidrogeológica aprofundada sobre o sítio em investigação. Desta forma produziu-se, inicialmente, uma compilação, uniformização e tratamento de todos os dados geológico-geotécnicos, geomecânicos e hidrogeológicos levados a cabo pelos autores citados. Todos os dados foram compilados, uniformizados e tratados de forma exaustiva numa base criada em Ms. Excel. Numa fase posterior, foi realizado o estudo que visou o zonamento hidrogeomecânico do maciço rochoso.

3.2. Enquadramento regional e local

A região do Porto situa-se num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (Chaminé et al., 2003), circunscrevendo-se ao longo da faixa de cisalhamento de Porto-Coimbra-Tomar, com direção geral NNW-SSE (Ribeiro et al., 2007), (Figura 11). Esta região é caracterizada, em termos gerais, pela dominância de rochas graníticas de idade varisca e/ou pré-varisca, maioritariamente granitóides de duas micas, de grão médio (fácies do Porto) ou porfiróide (fácies de Ermesinde), (Almeida, 2001; Chaminé et al., 2003). A fácies do granito do Porto ocorre, em grande parte, na cidade do Porto, e ainda nos concelhos de Vila Nova de Gaia, Matosinhos e Maia. Em termos de fracturação regional, são dominantes as direções NW-SE e NE-SW, predominando, em termos de inclinação, as descontinuidades subverticais e verticais. A meteorização das rochas graníticas da região é frequentemente comprovada pela arenização e/ou decomposição do maciço (cf. Begonha & Sequeira Braga, 2002; Begonha, 2001), podendo atingir profundidades na ordem dos 40 m.

Em termos geomorfológicos regionais, esta área corresponde a uma vasta área aplanada, designada por Plataforma Litoral, que se desenvolve a partir de cotas inferiores a 125 m, subindo ligeiramente para Sul do Porto (Araújo et al., 2003). A rede de drenagem, em geral, do tipo retangular e/ou dentítrico, reflecte a tectónica desta área, nomeadamente dos sistemas de fracturação regional NW-SE a NNW-SSE, NE-SW a NNE-SSW e W-E (cf. Araújo et al., 2003; Chaminé et al., 2003), conferindo os traços morfo-estruturais à região. A principal linha de água na região é o rio Douro, que apresenta no seu troço terminal (ca. 7 Km) uma orientação aproximada W-E, rodando para NNW-SSE na zona de confluência deste com o seu afluente da margem direita, o rio Tinto.

As principais unidades hidrogeológicas correspondem às maiores unidades geológicas definidas, a saber (Afonso, 2011):

- Depósitos de cobertura, onde se incluem as aluviões e os depósitos de praias antigas e de terraços fluviais;
- Rochas metassedimentares, das quais fazem parte os xistos, metagrauvaques e quartzitos;
- Rochas graníticas, nas quais se incluem os granitos de duas micas, de grão médio a grosseiro, por vezes porfiróide, os granitos biotíticos porfiróides de grão variável, os gnaisses e os migmatitos.

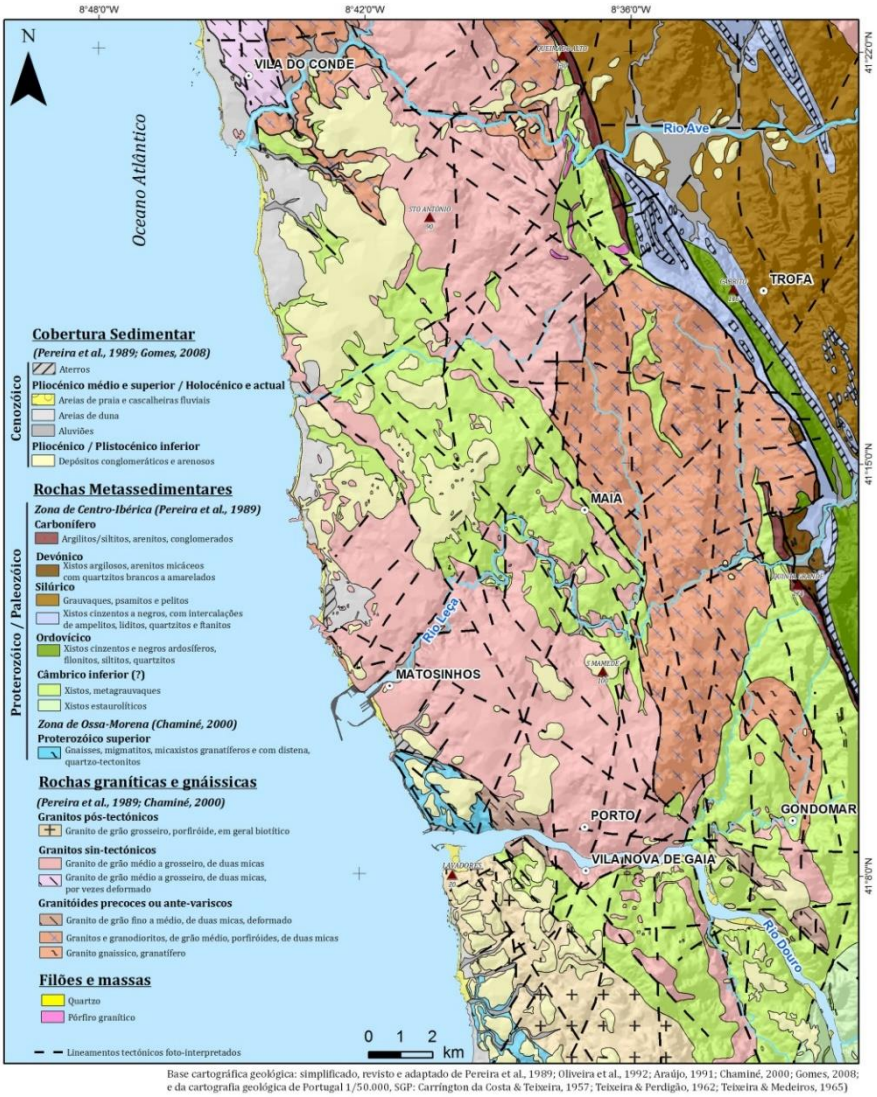


Figura 11. Esboço geológico regional da área urbana do Porto e sua envolvente (adaptado de Chaminé et al., 2003 e Afonso, 2011).

Em termos geológicos locais, a cidade do Porto caracteriza-se pela dominância de rochas graníticas (e.g., Carríngton da Costa & Teixeira, 1957; COBA, 2003; Chaminé et al., 2003, 2010; Afonso et al., 2004, 2018; Almeida, 2006), encontrando-se estas distribuídas por quatro grupos de granitoides (Figura 12):

- de duas micas, de grão médio e textura granular (fácies granítica do Porto);
- de duas micas, de grão médio a grosseiro com megacristais de feldspato potássico (fácies granítica de Contumil);
- predominantemente biotítico, de grão fino e deformado (fácies granítica da Arrábida e da Afurada).

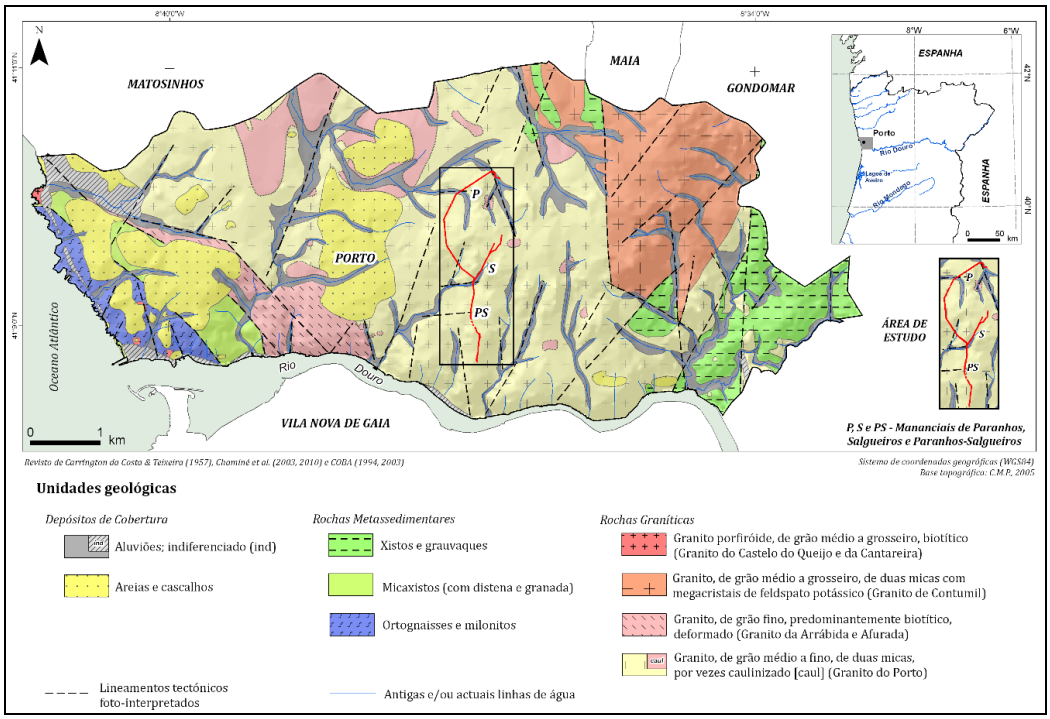


Figura 12. Esboço geológico da cidade do Porto (adaptado de COBA, 2003 e Chaminé et al., 2010). In: Afonso (2011).

A fácies do granito do Porto apresenta-se frequentemente alterada e a alteração excede, frequentemente, 20 a 30 m de profundidade. Na maior parte dos perfis alteração coexiste a rocha medianamente alterada, o saprólito, que pode atingir espessuras superiores a 10 m (Begonha & Sequeira Braga, 2002) e o solo residual. Existe ainda a ocorrência de evansite (fosfato de alumínio hidratado), em camadas pouco espessas de estrutura pisolítica ou estalagmítica, de cor branco-creme ou amarelo ligeiramente avermelhado (Rosas da Silva, 1935). Este mineral é muito

abundante nas galerias dos mananciais de Paranhos e Salgueiros, em particular, no preenchimento de diaclases e falhas, com a típica fluorescência verde-clara à luz ultravioleta (Sanchez-Moral et al., 2011).

Ocorrem, ainda, na cidade do Porto rochas de alto grau metamórfico (e.g., Carríngton da Costa & Teixeira, 1957; Chaminé et al., 2003):

- na zona ocidental, junto à orla litoral entre a foz do rio Douro e o Castelo do Queijo, encontra-se o Complexo Metamórfico da Foz do Douro, constituído por micaxistos com granada e distena, quartzo-tectonitos, ortognaisses e gnaisses ocelados, afetados por deformação cisalhante intensa por vezes com milonitos, pseudotaquilitos e anfibolitos;
- na zona oriental, ocorrem rochas metassedimentares, em particular xistos, micaxistos e metagrauvaques.

Para além das rochas graníticas e metamórficas, ocorrem ainda depósitos de cobertura, os quais correspondem a dois grupos (e.g., Carríngton da Costa & Teixeira, 1957; Araújo et al., 2003):

depósitos de areias e cascalhos de origem marinha, que ocorrem na base dos relevos mais elevados, localizados na faixa litoral na Foz do Douro e Nevogilde, correspondentes a terraços marinhos, e outros depósitos considerados de origem fluvial;

formações aluvionares, correspondentes a depósitos fluviais de natureza essencialmente silto-arenosa, que ocupam os vales de pequenas linhas de água; as formações com maior expressão localizam-se na zona oriental da cidade, nomeadamente nos vales dos rios Tinto e Torto.

Em termos geomorfológicos locais, na cidade do Porto existe uma variação entre áreas aplanadas e vales de pequenas linhas de água. A maioria das linhas de água foi canalizada e/ou objecto de ligeiros desvios ao seu percurso primitivo (e.g., Fontes, 1908; Carríngton da Costa, 1938; COBA, 2003). É possível observar uma gradação de altitude desde o Oceano Atlântico até ao interior, com uma orientação aproximada W-E, havendo uma predominância de áreas aplanadas entre os 80 e os 125 m de altitude. As áreas aplanadas inferiores (fundo de vale) ocorrem, essencialmente, nos extremos Oeste e Este da cidade, junto ao Castelo do Queijo e nos vales dos Rios Tinto e Torto, respetivamente. Nas freguesias de Ramalde e Lordelo do Ouro ocorre uma grande área aplanada com 60 -70 m de altitude. Para Oeste desta área desenvolvem-se uma série de áreas aplanadas de menor extensão e com altitudes decrescentes em direção ao litoral. As áreas aplanadas mais elevadas ocorrem na zona Este da cidade, com altitudes que podem atingir os 160 m. Rodeando esta extensa área elevada, surgem uma série de áreas aplanadas com cotas entre 80

e 125 m, por vezes fortemente entalhadas pelas linhas de água (Carríngton da Costa, 1938; Araújo et al., 2003; Freitas et al., 2014).

As galerias dos mananciais de Paranhos e Salgueiros desenvolvem-se em flanco de encosta na bordadura Oeste de uma das áreas aplanadas mais elevadas, genericamente conhecida por Monte Cativo e Monte Pedral. O traçado à superfície oscila entre as cotas 90 e 140 m, localizando-se o início das galerias de Paranhos (Praça 9 de Abril ou Jardim de Arca d'Água) e de Salgueiros (Rua Antero de Quental) às cotas mais elevadas, 115 e 135 m, respetivamente. A altitude mais baixa corresponde ao final do traçado, junto à Praça de Gomes Teixeira, com uma cota de 90 m (Afonso et al., 2018). Em termos geológicos, as galerias dos mananciais de Paranhos e Salgueiros intersectam as unidades geológicas regionais do granito de duas micas, de grão médio e textura granular (fácies granítica do Porto) e as formações aluvionares (Chaminé et al., 2010).

3.3. Enquadramento hidro-histórico

Esta breve apontamento sobre a descrição hidro-histórica das águas subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros foi retomada e adaptada de Afonso (2011), Freitas et al. (2014), Chaminé et al. (2014), e Afonso et al. (2018).

A cidade do Porto remonta a sua criação ao século V pelos povos Visigodos e Suevos, até ao século I quando se tornou território romano e se estabelece o nome de *Portus Cale*, designação dada aos povoados do Porto e Gaia que cresciam como centros de comércio ao longo das margens do Rio Douro, e que mais tarde daria nome a Portugal. A cidade cresceu e desenvolveu-se como uma das cidades mais importantes da Europa, tendo sido declarado o Centro Histórico do Porto como Património Mundial da UNESCO, em 1996, pelo seu valor arquitetónico e patrimonial da zona antiga da cidade (Oliveira Ramos, 2000; Afonso et al., 2018). Atualmente, o município do Porto, com uma área de 41.42 km^2, alberga 231 962 habitantes, enquanto a Área Metropolitana do Porto, com uma área de 1 900 km^2 alberga uma população de 1 737 395 habitantes (INE, 2021).

O abastecimento de água à cidade do Porto foi feito à custa de numerosas linhas de água, nascentes, minas de água e/ou poços, durante mais de seis séculos. As nascentes abasteciam poços particulares ou eram encaminhadas através de galerias a céu aberto e/ou subterrâneas, as quais alimentavam os fontanários e os chafarizes públicos da cidade, nos quais a população se abastecia (e.g., Bourbon e Noronha, 1885; Carteado Mena, 1908; Fontes, 1908; Carríngton da Costa, 1938, Afonso et al., 2009, 2018; Chaminé et al., 2010; Afonso, 2011).

O Manancial de Paranhos, conhecido ainda como da Arca d'Água ou das Três Fontes, constituiu uma das origens mais importantes no abastecimento de água à cidade do Porto. O abastecimento de toda a cidade foi apenas possível a partir do alvará, concedido pelo Rei Filipe I em 20 de Novembro de 1579, o qual autorizou a primeira obra de encanamento que permitiu conduzir a água do manancial de Paranhos. Esta obra ficou concluída 90 anos mais tarde, em 1669. No entanto, são já conhecidas referências à localização deste manancial desde 1120 (e.g., Bourbon e Noronha, 1885; Fontes, 1908). As águas eram conduzidas em caleiras abertas sobre o granito, ou em tubos de ferro ou chumbo, indo alimentar várias fontes e chafarizes ao longo do percurso. Em 1790 foram iniciados os trabalhos do aqueduto do Manancial de Salgueiros, cujo traçado se viria a intersectar com o do aqueduto do Manancial de Paranhos. Assim, apenas em 1838, as águas dos dois mananciais se juntaram para abastecer a cidade do Porto (Fontes, 1908).

Diversos pedidos de concessão para o abastecimento domiciliário de água foram realizados, face à necessidade de colmatar a escassez de água e de melhorar a sua qualidade, na sequência de um progressivo crescimento populacional. Desta forma, surge em 1880 a *Compagnie Générale des Eaux pour l'Étranger*, que foi responsável durante 40 anos pelo abastecimento de água à cidade do Porto. Em 1927, a concessão da companhia foi registada pela Câmara Municipal do Porto. Nesse mesmo ano foram instituídos os Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento — SMAS, que passariam a ser responsáveis pelo abastecimento de água à cidade até 2006. A partir deste ano, a Câmara Municipal do Porto toma controlo dos SMAS, através da criação da empresa Águas do Porto, EM, abarcando com a gestão integrada e sustentável de todo o ciclo urbano da água no município do Porto (Afonso et al., 2018).

3.4. Síntese do zonamento hidrogeotécnico

Neste tópico apresentar-se-á uma síntese dos zonamentos hidrogeotécnicos propostos por Moreira (2009, 2012) para o Túnel 1, e por Madureira (2012) para o Túnel 2. Todos os parâmetros geológico-geotécnicos essenciais à avaliação hidrogeotécnica seguem as normas da ISRM (1978, 1981) descritas no capítulo 2. Foram ainda retomados elementos cartográficos, geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos, nomeadamente, de Chaminé et al. (2010, 2014), de Afonso (2011), e de Afonso et al. (2010, 2016, 2020), entre outros.

TÚNEL 1 (T1)

A galeria subterrânea tem uma extensão total de 948 m, tendo sido estudados 400 m, a qual interseta um granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado. Os estudos envolveram o levantamento geológico-geotécnico *in situ* de 1 754 descontinuidades e a realização de 294 estações de ensaios à resistência à compressão uniaxial (UCS). Adicionalmente, foram realizados em laboratório ensaios de resistência à carga pontual (PLT), tendo sido ensaiados 234 provetes. Neste túnel foram identificadas três zonas geotécnicas, ZG1, ZG2 e ZG3, tendo sido identificadas três famílias de descontinuidades principais: N20°-40°E, 70°-85°NW; N40°-50°E, 50°-70°NW e N110°-130°E, 5°-25°SW (Quadro 14).

Quadro 14. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 1 (T1), (adaptado de Moreira, 2009, 2012).

Túnel 1 (T1)			
Litologia	Granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado		
Zonamento geotécnico	ZG1	ZG2	ZG3
Extensão (m)	0-116 162-252	116-162 252-379	379-400
Grau de Alteração (W)	W_{1-2} (68%) W_3 (28%) W_{4-5} (4%)	W_{1-2} (23%) W_3 (69%) W_{4-5} (8%)	W_{4-5} (100%)
Grau de Fraturação (F)	F_{4-5} a F_3	F_3	F_3 a F_{1-2}
Intervalo (cm)	15-35	30-50	55-75
Espaçamento médio (cm)	16	36	60
Famílias de descontinuidades	3 + aleatórias	2 + aleatórias	2 + aleatórias
Resistência à compressão uniaxial (UCS)	S_3 a S_2	S_3	S_4 a S_5
Intervalo (MPa)	35-65	25-50	<20
Abertura	Fechada - 78% Aberta - 19% Muito aberta - 3%	Fechada - 76% Aberta - 15% Muito aberta - 9%	Fechada - 67% Aberta - 14% Muito aberta - 19%
Valor médio (mm)	1.4	3.8	9
Rugosidade (R)	R1-2 -30% R3 - 66% R4-5 - 4%	R1-2 - 29% R3 - 67% R4-5 - 4%	R3 - 100%
Preenchimento	Quartzo e Argila - 3% Argila - 15% Evansite - 1% Rocha esmagada - 6% Sem Preenchimento - 75%	Quartzo e Argila - 12% Argila - 34% Evansite - 1% Rocha esmagada - 5% Sem Preenchimento - 48%	Argila - 76% Rocha esmagada - 10% Sem Preenchimento - 14%
Presença de água	Sim - 65% Não - 35%	Sim - 61% Não - 39%	Não - 100%

A zona geotécnica 1 (T1_ZG1) apresenta uma extensão total de 206 m, correspondendo a um granito pouco alterado (W_{1-2}) e muito fraturado (F_{4-5} a F_3), com três famílias principais de descontinuidades e algumas aleatórias. Estas descontinuidades encontram-se, na sua maioria (78%), fechadas com uma abertura média de 1,4 mm e, maioritariamente (75%), sem

preenchimento; as que se encontram abertas a muito abertas (21%) contemplam enchimentos argilosos, ou de rocha esmagada. A presença de água nota-se em 65% da extensão da ZG1.

A zona geotécnica 2 (T1_ZG2) apresenta uma extensão total de 173 m, correspondendo a um granito medianamente alterado (W_3) e medianamente fraturado (F_3), com duas famílias de descontinuidades e algumas aleatórias. Estas encontram-se maioritariamente fechadas (76%), e sem preenchimento; as que se encontram abertas a muito abertas, apresentam uma abertura média de 3,8 mm e preenchimento argiloso e de quartzo. A presença de água nota-se em 61% da extensão da ZG2.

A zona geotécnica 3 (T1_ZG3) apresenta uma extensão total de 21 m, correspondendo a um granito muito alterado a decomposto (W_{4-5}), medianamente a pouco fraturado (F_3 a F_{1-2}), com duas famílias de descontinuidades principais e algumas aleatórias. Estas encontram-se maioritariamente fechadas (67%), sem preenchimento. As que se encontram abertas e muito abertas têm uma abertura média de 9 mm e um preenchimento argiloso e com rocha esmagada. Na zona ZG3 não há presença de água.

Túnel 2 (T2)

A galeria subterrânea tem uma extensão total de 1 227 m, tendo sido estudados 741,9 m, a qual interseta um granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos. Os estudos envolveram o levantamento geológico-geotécnico *in situ* de 1 223 descontinuidades e a realização de 217 estações de ensaios à resistência à compressão uniaxial (UCS). Adicionalmente, foram realizados em laboratório ensaios de resistência à carga pontual (PLT). Neste túnel foram identificados três setores, Setor 1, Setor 2 e Setor 3, os quais se subdividem em várias zonas geotécnicas.

No Setor 1 foram identificadas três zonas geotécnicas, ZG1, ZG2 e ZG3 (Quadro 15).

A zona geotécnica 1 (T2/S1_ZG1) apresenta uma extensão total de 54.4 m, correspondendo a um granito medianamente alterado a pouco alterado (W_3 a W_2) e pouco a medianamente fraturado (F_{1-2} a F_3), com três famílias principais de descontinuidades (N 100° - 110° E, 80° - 90° NE; N 130° - 140° E, 25° - 35° SW; N 30° - 140° E, 70° - 80° NW) e algumas aleatórias. As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (80.3%), fechadas com uma abertura média de 4,1 mm e sem preenchimento; as que se encontram abertas a muito abertas contemplam enchimentos argilosos, de quartzo e evansite, ou de rocha esmagada. O maciço apresenta-se seco a ligeiramente húmido.

Quadro 15. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 2, Setor 1 (T2/S1), (adaptado de Madureira, 2012).

Túnel 2 - Setor 1 (T2/S1)			
Litologia	Granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos		
Zonamento geotécnico	ZG1	ZG2	ZG3
Extensão (m)	0-19,5 39,8-51,0 96,8-120,5	19,5-39,8 51,0-91,2	91,2-96,8 120,5-139,9
Grau de Alteração (W)	W_3 A W_2	W_3	W_3
Grau de Fraturação (F) Intervalo (cm)	F_{1-2} a F_3 75-50	F_3 40-50	F_3 a F_{1-2} 35-65
Famílias de descontinuidades	3 + aleatórias	3 + aleatórias	3 famílias
Resistência à compressão uniaxial (UCS) Intervalo (MPa)	S_3 40-55	S_2 90-120	S_3 a S_4 30-15
Abertura Valor médio (mm)	Fechada - 80,3% Aberta - 16,4% Muito aberta - 3,3% 4.1	Fechada - 72,6% Aberta - 27,4% 0.7	Fechada - 10,7% Aberta - 82,2% Muito aberta - 7,1% 3.1
Rugosidade (R)	R1-2 - 16,4% R3 - 78,7% R4-5 - 4,9%	R1-2 - 1,8% R3 - 94,7% R4-5 - 3,5%	R1-2 - 78,6% R3 - 21,4%
Preenchimento	Quartzo - 6,6% Argila - 18,0% Evansite - 9,8% Rocha esmagada - 8,2% Sem Preenchimento - 57,4%	Quartzo - 0,9% Argila - 18,6% Evansite - 7,1% Rocha esmagada - 5,3% Sem Preenchimento - 68,1%	Argila - 3,6% Evansite - 46,4% Rocha esmagada- 35,7% Sem Preenchimento - 14,3%
Presença de água	Seco - 45,9% Ligeiramente Húmido - 36,0% Húmido a Gotejante - 14,8% Fluxo Abundante- 3,3%	Seco - 40,7% Ligeiramente Húmido - 22,1% Húmido a Gotejante - 16,0% Fluxo Abundante - 21,2%	Seco - 35,7% Ligeiramente Húmido - 53,6% Húmido a Gotejante - 10,7%

Na zona geotécnica 2 (T2/S1_ZG2) apresenta uma extensão total de 57,5 m, correspondendo a um maciço medianamente alterado (W_3) e medianamente (F_3), com três famílias de descontinuidades principais (N 0° - 10° E; 40° - 60° NW; N 110° - 130° E; 80° - 90° NE/SW; N 50° -

60° E; 75° - 85° SE) e algumas aleatórias. As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (72,6%), fechadas e sem preenchimento; as que se encontram abertas a muito abertas, apresentam uma abertura média de 0,7 mm, um preenchimento argiloso, de evansite, e rocha esmagada. O maciço apresenta-se seco a ligeiramente húmido.

Na zona geotécnica 3 (T2/S1_ZG3) apresenta uma extensão total de 25,0 m, correspondendo a um

maciço medianamente alterado (W_3) e medianamente a pouco fraturado (F_3 a F_{1-2}), com três famílias de descontinuidades principais (N 50° - 60° E; 30° - 40° SE; N 160° - 170° E; 80° - 90° NE/SW; N 100° - 110° E; 0° - 20° NE/SW). As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (82,2%), abertas, sendo o valor médio de 3,1 mm. O preenchimento é maioritariamente de evansite (46,4%) e rocha esmagada (35,7%). O maciço apresenta-se maioritariamente (53,6(%) ligeiramente húmido.

No Setor 2 foram identificadas três zonas geotécnicas, ZG1, ZG2 e ZG3 (Quadro 16).

A zona geotécnica 1 (T2/S2_ZG1) apresenta uma extensão total de 231,6 m, correspondendo a um granito medianamente alterado (W_3) e medianamente fraturado (F_3), com três famílias principais de descontinuidades (N 110° - 130° E; 80° - 90° NE/SW; N 10° - 20° E; 80° - 90° SE; N 170° - 180° E; 10° - 20° SW) e algumas aleatórias. As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (78,7%), fechadas com uma abertura média de 6,2 mm e sem preenchimento; as que se encontram abertas contemplam um enchimento argiloso. O maciço apresenta-se ligeiramente húmido a seco.

A zona geotécnica 2 (T2/S2_ZG2) apresenta uma extensão total de 199,7 m, correspondendo a um granito pouco alterado (W1-2) e pouco fraturado (F1-2), com três famílias principais de descontinuidades (N 100° - 120° E; 0° - 20° NE; N 10° - 30° E; 80° - 90° SE; N 50° - 60° E; 60° - 80° NE) e algumas aleatórias. As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (93,1%), fechadas, com uma abertura média de 1,3 mm, e sem preenchimento; as que se encontram abertas contemplam um enchimento argiloso ou de quartzo. O maciço apresenta-se ligeiramente húmido a seco.

Quadro 16. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 2, Setor 2 (T2/S2), (adaptado de Madureira, 2012).

Túnel 2 - Setor 2 (T2/S2)			
Litologia	Granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos		
Zonamento geotécnico	ZG1	ZG2	ZG3
Extensão (m)	0-33,8 141-162 226,3-246,9 266,4-422,6	33,8-141 162-226,3 246,9-266,4 422,6-434,4 463,5-472,2	434,4-463,5
Grau de Alteração (W)	W_3 A W_2	W_3	W_3
Grau de Fraturação (F) Intervalo (cm)	F_{1-2} a F_3 75-50	F_3 40-50	F_3 a F_{1-2} 35-65
Famílias de descontinuidades	3 + aleatórias	3 + aleatórias	3 famílias
Resistência à compressão uniaxial (UCS) Intervalo (MPa)	S_3 40-60	S_2 a S_3 70-55	S_4 a S_3 15-30
Abertura Valor médio (mm)	Fechada - 78,7% Aberta - 19,5% Muito aberta - 1,8% 6.2	Fechada - 93,1% Aberta - 4,7% Muito aberta - 2,2% 1.3	Fechada - 71,4% Aberta - 20,4% Muito aberta - 8,2% 2
Rugosidade (R)	R1-2 - 46,4% R3 - 47,3% R4-5 - 6,3%	R1-2 - 37,6% R3 - 60,9% R4-5 - 1,5%	R1-2 - 78,4% R3 - 24,5% R4-5 - 4,1%
Preenchimento	Quartzo - 1,3% Argila - 14,6% Evansite - 1,7% Rocha esmagada - 6,9% Sem Preenchimento - 75,5%	Quartzo - 0,9% Argila - 18,6% Rocha esmagada- 5,8% Sem Preenchimento - 66,8%	Argila - 3,6% Rocha esmagada - 6,1% Sem Preenchimento- 81,6%
Presença de água	Seco - 27,8% Ligeiramente Húmido - 44,2% Húmido a Gotejante - 16,5% Fluxo Abundante - 11,5%	Seco - 38,3% Ligeiramente Húmido - 53,3% Húmido a Gotejante - 3,3% Fluxo Abundante - 5,1%	Seco - 100,0%

A zona geotécnica 3 (T2/S2_ZG3) apresenta uma extensão total de 29,1 m, correspondendo a um granito medianamente a muito alterado (W_3 a W4-5) e medianamente a pouco fraturado (F_3 a F1-2), com três famílias de descontinuidades (N 50° - 70° E; 70° - 80° SE; N 10° - 20° E; 80° - 90° SE; N 110° - 120° E; 80° - 90° NE). As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (71,4%), fechadas, com um valor médio de 2mm, e sem preenchimento; as que se encontram abertas têm um preenchimento de argila e rocha esmagada. O maciço encontra-se seco.

No Setor 3 foram identificadas quatro zonas geotécnicas ZG1, ZG2, ZG3 e ZG4 (Quadro 17).

A zona geotécnica 1 (T2/S3_ZG1) apresenta uma extensão total de 10,1 m, correspondendo a um granito medianamente alterado (W_3) medianamente a pouco fraturado (F_3 a F1-2), com três famílias principais de descontinuidades (N 10° - 20° E; 55° - 75° NW; N 30° - 40° E; 20° - 30° NW; N 130° - 140° E; 0° - 20° SW) e algumas aleatórias. As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (63,6%), fechadas e sem preenchimento; as que se encontram abertas a muito abertas têm um valor médio de 1,3 mm e preenchimentos com rocha esmagada. O maciço apresenta-se seco a ligeiramente húmido a gotejante.

A zona geotécnica 2 (T2/S3_ZG2) apresenta uma extensão total de 9,3 m, correspondendo a um granito pouco alterado a são (W1-2) e muito a medianamente fraturado (F4-5 a F_3), com duas famílias de descontinuidades principais (N 170° - 180° E; 55° - 75° SW; N 70° - 80° E; 50° - 70° NW). As descontinuidades apresentam-se fechadas e sem preenchimento. O maciço encontra-se maioritariamente ligeiramente húmido.

A zona geotécnica 3 (T2/S3_ZG3) apresenta uma extensão total de 93,2 m, correspondendo a um granito pouco alterado a são (W1-2), pouco a medianamente fraturado (F1-2 a F3), com três famílias de descontinuidades principais (N 70° - 80° E; 60° - 70° SE; N 100° - 110° E; 80° - 90° NE/SW; N 10° - 30° E; 65° - 75° NW). As descontinuidades apresentam-se, maioritariamente (74%), fechadas e sem preenchimento; as que se apresentam abertas, o valor médio é de 1,4 mm, sendo o preenchimento na maior parte argila. O maciço apresenta-se seco.

A zona geotécnica 4 (T2/S3_ZG4) apresenta uma extensão total de 37,0 m, correspondendo a um granito muito alterado (W4-5), pouco a medianamente fraturado (F1-2 a F3), com três famílias de descontinuidades principais (N 40° - 50° E; 70° - 80° SE; N 110° - 120° E; 20° - 30° SW; N 0° - 10° E; 65° - 85° NW). As descontinuidades encontram-se, na sua maioria (65,2%), fechadas, com um valor médio de abertura de 2,1 mm, e sem preenchimento. O preenchimento, quando existe é, fundamentalmente, argiloso. O maciço apresenta-se seco.

Quadro 17. Zonamento geológico-geotécnico do Túnel 2, Setor 3 (T2/S3) (adaptado de Madureira, 2012).

Túnel 2 - Setor 3 (T3/S2)				
Litologia	Granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos			
Zonamento geotécnico	ZG1	ZG2	ZG3	ZG4
Extensão (m)	0-10,1	10,1-19,4	19,4-97,2 134,2-149,5	97,2-134,2
Grau de Alteração (W)	W_3 A W_2	W_3	W_3	W_3
Grau de Fraturação (F) Intervalo	F_{1-2} a F_3 75-50	F_3 40-50	F_3 a F_{1-2} 35-65	F_3 a F_{1-2} 35-65
Famílias de descontinuidades	3 + aleatórias	2 famílias	3 + aleatórias	3 + aleatórias
Resistência à compressão uniaxial (UCS) Intervalo (MPa)	S_2 a S_3 70-55	S_3 30-45	S_3 a S_2 35-75	S_4 a S_3 20-35
Abertura Valor médio (mm)	Fechada - 63,6% Aberta - 27,3% Muito aberta - 9,1% 1.3	Fechada - 100,0%	Fechada - 74,0% Aberta - 19,5% Muito aberta - 6,5% 1.4	Fechada - 65,2% Aberta - 28,3% Muito aberta - 6,5% 2.1
Rugosidade (R)	R1-2 - 50,0% R3 - 50,0%	R1-2 - 3,4% R3 - 96,6%	R1-2 - 65,1% R3 - 33,3% R4-5 - 1,6%	R1-2 - 69,6% R3 - 30,4%
Preenchimento	Rocha esmagada - 9,1% Sem Preenchimento- 90,9%	Sem preenchimento - 100,0%	Argila - 15,4% Rocha esmagada - 5,7% Sem Preenchimento - 78,9%	Argila - 21,7% Rocha esmagada - 6,5% Sem Preenchimento - 71,8%
Presença de água	Seco - 72,8% Ligeiramente Húmido - 13,6% Húmido a Gotejante - 13,6%	Seco - 3,4% Ligeiramente Húmido - 96,6%	Seco - 100,0%	Seco - 100,0%

3.5. Avaliação hidrogeomecânica: os índices HP-Value e HC-System

3.5.1. Considerações iniciais

A avaliação hidrogeomecânica do maciço foi realizada para todas as zonas geotécnicas previamente caracterizadas, a saber:

- No caso do Túnel 1, retoma-se, revisita-se e expande-se a avaliação geomecânica, realizada por Moreira (2012) através da aplicação conjunta do RMR, Q-System e GSI, e integram-se, pela primeira vez, o índice hidrogeomecânico HP e a classificação HC-system;
- Para o Túnel 2, retoma-se, revisita-se e expande-se a avaliação hidrogeomecânica, realizada por Madureira (2012) através da aplicação conjunta do RMR, Q-System, GSI e HP-value, e integra-se a classificação HC-system.

O índice hidrogeomecânico HP-value foi avaliado com base nos parâmetros propostos por Gates (1997, 2003), sendo quatro dos quais comuns à classificação geomecânica Q-System, tal como se referiu anteriormente. Na aplicação desta classificação foram estabelecidos dois cenários para cada zona geotécnica, um para as condições que predominam, mais realista, e outro para as condições complementares, tendo sempre em consideração, para ambos os cenários, o conhecimento do maciço "in situ" (Moreira, 2009, 2012; Afonso, 2011; Martins, 2011; Madureira, 2012). Desta forma, os valores de cada cenário representam o intervalo dominante de HP-Value.

Para a classificação HC-system (Hsu et al. 2008, 2011), a qual permite estimar a condutividade hidráulica em rochas fraturadas a partir de dados de sondagens e de ensaios de permeabilidade in situ, foram necessárias diversas aproximações e adaptações, uma vez que não se dispunha deste tipo de dados, considerando a galeria subterrânea como um furo horizontal. Assim:

- Os valores de L_T e L_C, que permitem o cálculo do parâmetro DI, correspondem, respetivamente, ao valor (m) da extensão total de cada zona geotécnica, e ao valor (m) correspondente à percentagem da zona geotécnica que, em termos de presença de água, se encontra com humidade, isto é, não seca;
- Os valores de R_G, R_T e R_S, que permitem o cálculo do parâmetro GCD, correspondem, respetivamente, ao valor (m) correspondente à percentagem das descontinuidades que se encontram abertas e com preenchimento, ao valor (m) da extensão total de cada zona geotécnica, e ao valor (m) da extensão da zona geotécnica correspondente ao valor médio de RQD obtido para essa zona;

- Ao parâmetro LPI foi atribuído o valor de 0,15 para todas as zonas geotécnicas, uma vez que a litologia dominante é o granito.
- Na aplicação desta classificação foi apenas estabelecido um cenário para cada zona geotécnica, com as mesmas premissas referidas atrás.

3.5.2. HP-value: Resultados e discussão

Tal como referido anteriormente, os valores de HP variam entre $1{,}33 \times 10^{-3}$ para maciços de fraca qualidade e 800 para maciços de muito boa qualidade, enquanto a presença de água subterrânea em maciços fraturados é definida para valores de HP inferiores a 3, permitindo estimar a circulação geohidráulica, representada pelos valores de caudal (Q), que aumentam com a diminuição do valor de HP.

Assim, sintetizam-se nos Quadros 18 a 21, os parâmetros selecionados e os valores resultantes da aplicação deste índice hidrogeomecânico, bem como da estimativa dos caudais de água subterrânea, nos dois cenários, cenário 1 (condições complementares) e cenário 2 (condições que predominam), para o Túnel 1 e o Túnel 2.

Túnel 1

No Túnel 1 (Quadro 18), as zonas geotécnicas ZG1 e ZG3 são de qualidade geomecânica fraca, enquanto a zona geotécnica ZG2 é de qualidade razoável. Relativamente aos valores de HP, estes encontram-se no intervalo $1{,}47 < HP < 10{,}91$, estando a zona geotécnica ZG1 no intervalo inferior de 1,47 a 2,69, com caudais estimados de 0,12 a 1,94 L/s, e as zonas ZG2 e ZG3 no intervalo 5,46 a 10,91, com caudais nulos.

Túnel 2

No Túnel 2, Setor 1 (Quadro 19), as zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 são de qualidade geomecânica fraca, enquanto a zona geotécnica ZG3 é de qualidade muito fraca. Relativamente aos valores de HP, estes encontram-se no intervalo $1{,}34 < HP < 4{,}94$. A zona geotécnica ZG1 é a zona que apresenta valores mais elevados de HP, de 2,06 a 4,94, com caudais estimados inferiores a 0,50 L/s, enquanto as zonas geotécnicas ZG2 e ZG3 se encontram nos intervalos 1,34 a 2,38, com caudais de 0,24 a 2,59 L/s.

Quadro 18. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 1.

Túnel 1						
Litologia	Granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado					
Z.G.	ZG1		ZG2		ZG3	
Extensão Total (m)	206.0		173.0		21.0	
Cenário 1						
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	30	Razoável	65	Fraco	48
J_n	3 + aleatórias	12	2 + aleatórias	6	2 + aleatórias	6
J_r	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3) onduladas	3
J_{af}	Abertura entre 0,1 e 1mm 1,4mm (média)	1.2	Abertura entre 1 e 5mm 3,8mm (média)	1.4	Abertura entre 5 e 10mm 9mm (média)	1.8
J_k	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2
J_w	Gotas	0.86	Húmido	0.94	Seco	1
HP value		2.69		10.91		6.67
Q (L/min)		6.93		0.00		0.00
Q (L/s)		0.12		0.00		0.00
Cenário 2						
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	30	Razoável	65	Fraco	48
J_n	3 + aleatórias	12	2 + aleatórias	6	2 + aleatórias	6
J_r	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3) onduladas	3
J_{af}	Abertura entre 0,1 e 1mm 1,4mm (média)	1.2	Abertura entre 1 e 5mm 3,8mm (média)	1.4	Abertura entre 5 e 10mm 9mm (média)	1.8
J_k	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2
J_w	Húmido	0.94	Húmido	0.94	Seco	1
HP value		1.47		5.46		6.67
Q (L/min)		116.33		0.01		0.00
Q (L/s)		1.94		0.00		0.00

Quadro 19. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 2, Setor 1 (T2/S1).

Túnel 2 - Setor 1 (T2/S1)						
Z.G.	ZG1		ZG2		ZG3	
Litiologia	Granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos					
Extensão Total (m)	54.4		57.5		25.0	
Cenário 1						
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	42	Fraco	30	Muito Fraco	23
J_n	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
J_r	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3) planas	1.5	Lisas (R1-2) onduladas	2
J_{af}	Abertura entre 1 e 5mm 4,1mm (média)	1.2	Abertura entre 0,1 e 1mm 0,7mm (média)	1.2	Abertura entre 1 e 5mm 3,1mm (média)	1.4
J_k	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2
J_w	Húmido	0.94	Gotas	0.86	Húmido	0.94
HP value		2.06		1.34		1.72
Q (L/min)		29.87		155.35		65.67
Q (L/s)		0.50		2.59		1.09
Cenário 2						
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	42	Fraco	30	Muito Fraco	23
J_n	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
J_r	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3) onduladas	3	Lisas (R1-2) onduladas	2
J_{af}	Descontinuidades Fechadas, <0,1mm 4,1mm (média)	1	Abertura entre 0,1 e 1 mm 0,7mm (média)	1.2	Abertura entre 1 e 5mm 3,1mm (média)	1.4
J_k	Preenchimento com quartzo Sem fluxo	1	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2
J_w	Húmido	0.94	Gotejante	0.76	Gotas	0.86
HP value		4.94		2.38		1.57
Q (L/min)		0.04		14.29		92.06
Q (L/s)		0.00		0.24		1.53

No Túnel 2, Setor 2 (Quadro 20), as zonas geotécnicas ZG1 e ZG3 são de qualidade geomecânica fraca, enquanto a zona geotécnica ZG2 é de qualidade razoável. Relativamente aos valores de HP, estes encontram-se no intervalo 1,19 < HP < 8,62. A zona geotécnica ZG1 é a zona que apresenta menores valores de HP, de 1,19 a 1,34, e caudais de 2,59 a 3,66 L/s, enquanto as zonas geotécnicas ZG2 e ZG3 se encontram nos intervalos 2,96 a 8,62, com caudais estimados inferiores a 0,06 L/s.

No Túnel 2, Setor 3 (Quadro 21), a zona geotécnica ZG1 é de qualidade geomecânica fraca, a zona ZG2 é de qualidade muito fraca, e as zonas geotécnicas ZG3 e ZG4 são de qualidade razoável. Relativamente aos valores de HP, estes encontram-se no intervalo 1,98 < HP < 7,05. As zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 apresentam os valores mais elevados de HP, de 3,05 a 7,05, e caudais inferiores a 0,05 L/s, enquanto as zonas geotécnicas ZG3 e ZG4 se encontram no intervalo 1,98 a 3,47, com caudais de 0,02 a 0,59 L/s.

Quadro 20. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 2, Setor 2 (T2/S2).

Túnel 2 - Setor 2						
Litologia	Granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos					
Z.G.	ZG1		ZG2		ZG3	
Extensão Total (m)	231.6		199.7		29.1	
Cenário 1						
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	35	Razoável	55	Fraco	42
J_n	3 famílias	9	3 famílias	9	3 famílias	9
J_r	Lisas (R1-2 a R3) planas	1	Rugosas (R3 e R1-2) planas	1.5	Lisas (R1-2 a R3) planas	1
J_{af}	Abertura entre 1 e 5mm 6,2mm (média)	1.4	Descontinuidades Fechadas, <0,1mm 1,3mm (média)	1	Abertura entre 1 e 5mm 2,0mm (média)	1.4
J_k	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1
J_w	Gotas	0.86	Húmido	0.94	Seco	1
HP value		1.19		8.62		3.33
Q (L/min)		219.35		0.00		1.55
Q (L/s)		3.66		0.00		0.03
Cenário 2						
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	35	Razoável	55	Fraco	42
J_n	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
J_r	Rugosas (R1-2 a R3) planas	1.5	Rugosas (R3 e R1-2) planas	1.5	Rugosas (R1-2 a R3) planas	1.5
J_{af}	Abertura entre 1 e 5mm 6,2mm (média)	1.4	Descontinuidades Fechadas, <0,1mm 1,3mm (média)	1	Abertura entre 1 e 5mm 2,0mm (média)	1.4
J_k	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1
J_w	Gotas	0.86	Gotas	0.86	Seco	1
HP value		1.34		2.96		5.00
Q (L/min)		155.35		3.72		0.03
Q (L/s)		2.59		0.06		0.00

Quadro 21. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Túnel 2, Setor 3 (T2/S3).

Túnel 2 - Setor 3								
Litologia	Granito de duas micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos							
Z.G.	ZG1		ZG2		ZG3		ZG4	
Extensão Total (m)	10.1		9.3		93.2		37.0	
Cenário 1								
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	35	Muito Fraco	10	Razoável	50	Razoável	55
J_n	3 famílias	9	2 famílias	4	3 famílias	9	3 famílias	9
J_r	Rugosas (R3 a R1-2) planas	1.5	Rugosas (R3) onduladas	3	Lisas (R3 a R1-2) planas	1	Lisas (R3 a R1-2) planas	1
J_{af}	Abertura entre 1 e 5 mm 1,3mm (média)	1.4	Descontinuidades Fechadas, <0,1mm 0,09mm (média)	1	Abertura entre 1 e 5 mm 1,4mm (média)	1.4	Abertura entre 1 e 5 mm 2,1mm (média)	1.4
J_k	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2
J_w	Seco	1	Húmido	0.94	Seco	1	Seco	1
HP value		4.17		7.05		1.98		2.18
Q (L/min)		0.23		0.00		35.30		22.30
Q (L/s)		0.00		0.00		0.59		0.37
Cenário 2								
Parâmetros	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
RQD (%)	Fraco	35	Muito Fraco	10	Razoável	50	Razoável	55
J_n	3 famílias	9	2 famílias	4	3 famílias	9	3 famílias	9
J_r	Lisas (R3 a R1-2) planas	1	Rugosas (R3) onduladas	3	Rugosas (R1-2 a R3) planas	1.5	Rugosas (R1-2 a R3) planas	1.5
J_{af}	Abertura entre 0,1 e 1 mm 1,3mm (média)	1.2	Descontinuidades Fechadas, <0,1mm 0,09mm (média)	1	Abertura entre 0,1 e 1mm 1,4mm (média)	1.2	Abertura entre 1 e 5mm 1,4mm (média)	1.4
J_k	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Descontinuidades fechadas Sem fluxo	1	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2	Preenchimento argiloso Fluxo baixo	2
J_w	Húmido	0.94	Gotas	0.86	Seco	1	Seco	1
HP value		3.05		6.45		3.47		3.27
Q (L/min)		3.02		0.00		1.13		1.79
Q (L/s)		0.05		0.00		0.02		0.03

3.5.3. HC-System: Resultados e discussão

Os resultados obtidos para o HC-system passaram pela avaliação de cada parâmetro de forma que o valor atribuído seja o mais adequado às condições hidrogeológicas e hidrogeomecânicas presentes no maciço em estudo. Hsu et al. (2008, 2011) não definem limites para o HC-system,

referindo apenas que quanto maior for o valor de HC-system, maior será a permeabilidade do maciço.

Os resultados serão apresentados nos Quadros 22 a 25, onde se apresentam também os valores utilizados para o cálculo dos parâmetros e respetivos componentes.

Túnel 1

O Túnel 1 apresenta em termos de RQD uma qualidade fraca a razoável (30% < RQD < 65%) e encontra-se com água na maior parte do traçado, ZG1 (65%) e ZG2 (61%), apresentando-se seca a ZG3. As zonas ZG1 e ZG2 apresentam menos descontinuidades com preenchimento, 6% e 12%, respectivamente. Os valores de HC-system variam entre $1{,}32 \times 10^{-2}$ e $3{,}54 \times 10^{-2}$, apresentando as zonas ZG1 e ZG3 valores semelhantes e os mais elevados e a ZG2 o menor valor (Quadro 22).

Quadro 22. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 1 (T1).

Túnel 1				
Litologia		Granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado.		
Z.G.		ZG1	ZG2	ZG3
Extensão Total (m)		206.0	173.0	21.0
Descontinuidades abertas com preenchimento		6%	12%	28%
Presença de água		65%	61%	0%
RQD (%)		30	65	48
DI	L_C	133.9	105.53	0.00
	L_T	206.00	173.00	21.00
	Valor final	0.35	0.39	1.00
GCD	R_G	11.33	21.59	5.96
	R_T	206.00	173.00	21.00
	R_S	61.8	112.45	10.08
	Valor final	0.08	0.36	0.55
LPI		0.15	0.15	0.15
HC		3.39E-02	1.32E-02	3.54E-02

Túnel 2

O Túnel 2, setor 1 apresenta em termos de RQD uma qualidade fraca (23% < RQD < 42%) e encontra-se com água na maior parte do traçado, ZG1 (54%), ZG2 (59%), e ZG3 (64%). As zonas

ZG1 e ZG2 apresentam menos descontinuidades com preenchimento, 8% e 9%, respectivamente. Os valores de HC-system variam entre 2,87x10^{-2} e 3,74x10^{-2}, apresentando a zona ZG2 o valor mais alto e a zona ZG3 o valor mais baixo (Quadro 23).

Quadro 23. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 2, setor 1 (T2/S1).

Túnel 2 - Setor 1				
Litologia		Granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado.		
Z.G.		ZG1	ZG2	ZG3
Extensão Total (m)		54.4	57.5	25.0
Descontinuidades abertas com preenchimento		8%	9%	23%
Presença de água		54%	59%	64%
RQD (%)		42	30	23
DI	L_C	29.43	34.10	16.08
	L_T	54.40	57.50	25.00
	Valor final	0.46	0.41	0.36
GCD	R_G	4.57	5.03	5.87
	R_T	54.40	57.50	25.00
	R_S	22.85	17.25	5.75
	Valor final	0.14	0.12	0.30
LPI		0.15	0.15	0.15
HC		3.42E-02	3.74E-02	2.87E-02

O Túnel 2, setor 2 apresenta em termos de RQD uma qualidade fraca a razoável (30% < RQD < 55%) e encontra-se com água na maior parte do traçado, ZG1 (72%), ZG2 (62%), encontrando-se seca a zona ZG3. As descontinuidades com preenchimento correspondem a 2% na zona ZG2 e 5% nas zonas ZG1 e ZG3. Os valores de HC-system variam entre 2,45x10^{-2} e 7,91x10^{-2}, apresentando as zonas ZG1 e ZG2 valores semelhantes e os mais baixos e a zona ZG3 o valor mais alto.

O Túnel 2, setor 3 apresenta em termos de RQD uma qualidade fraca a razoável (10% < RQD < 55%) e encontra-se com água em particular na zona ZG2 (97%), seguida da zona ZG1 (27%), encontrando-se secas as zonas ZG3 e ZG4. As descontinuidades com preenchimento correspondem a 3% na zona ZG1, 5% na zona ZG3 e 10% na zona ZG2, não havendo nenhuma na zona ZG2. Os valores de HC-system variam entre 4,59x10^{-3} e 6,74x10^{-2}, apresentando a zona ZG2 o valor mais baixo e nas zonas ZG1 e ZG3 os valores são semelhantes e os mais elevados (Quadro 24).

Quadro 24. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 2, setor 2 (T2/S2).

Túnel 2 - Setor 2				
Litologia		Granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado.		
Z.G.		ZG1	ZG2	ZG3
Extensão Total (m)		231.6	199.7	29.1
Descontinuidades abertas com preenchimento		5%	2%	5%
Presença de água		72%	62%	0%
RQD (%)		35	55	42
DI	L_C	167.22	123.21	0.00
	L_T	231.60	199.70	29.10
	Valor final	0.28	0.38	1.00
GCD	R_G	12.09	4.57	1.53
	R_T	231.60	199.70	29.10
	R_S	81.06	109.84	12.22
	Valor final	0.08	0.05	0.09
LPI		0.15	0.15	0.15
HC		2.49E-02	2.45E-02	7.91E-02

Quadro 25. Aplicação da classificação HC-system ao Túnel 2, setor 3 (T2/S3).

Túnel 2 - Setor 3					
Litologia		Granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado.			
Z.G.		ZG1	ZG2	ZG3	ZG4
Extensão Total (m)		10.1	9.3	93.2	37.0
Descontinuidades abertas com preenchimento		3%	0%	5%	10%
Presença de água		27%	97%	0%	0%
RQD (%)		35	10	50	55
DI	L_C	2.75	8.98	0.00	0.00
	L_T	10.10	9.30	93.20	37.00
	Valor final	0.73	0.03	1.00	1.00
GCD	R_G	0.33	0.00	5.11	3.63
	R_T	10.10	9.30	93.20	37.00
	R_S	3.54	0.93	46.60	20.35
	Valor final	0.05	0.00	0.11	0.22
LPI		0.15	0.15	0.15	0.15
HC		6.74E-02	4.59E-03	6.68E-02	5.28E-02

3.5.4. Apresentação e discussão de alguns parâmetros hidrodinâmicos segundo o HP-value e o HC-system

Embora a estrutura e características do maciço e das suas descontinuidades desempenhem um papel muito importante em estudos hidrogeomecânicos, outros parâmetros hidrodinâmicos devem ser articulados para delinear o zonamento hidrogeomecânico do maciço, nomeadamente o caudal, a capacidade específica (Q/s), a transmissividade (T) e a condutividade hidráulica (K).

Para que se possa perceber melhor a síntese apresentada nos Quadros 26 a 33, apresentam-se seguidamente algumas considerações sobre a avaliação dos parâmetros do HP-value e do HC-system:

HP-value

- Foram calculados dois valores para o caudal (Q), o primeiro através da expressão de Gates (1997, 2003), denominada neste trabalho por "Expressão de Gates" (Q_E), enquanto o segundo é obtido através da equação retirada da projeção realizada por Gates (1997, 2003) na Figura 9, denominada por "Ábaco de Gates" (Q_A). As expressões são as seguintes:

Expressão de Gates (1997)

$$Q_E = 3{,}785 \times (919{,}71 \times e^{-2314 \times HP})\,(L/min)$$

Ábaco de Gates (1997, 2003)

$$Q_A = 2979{,}3548 \times e^{-2{,}051 \times HP}(L/min)$$

- A espessura saturada do aquífero (*e*) corresponde à extensão (em metros) da galeria que se encontra com água, isto é, não seca.
- Os valores da capacidade específica (*Q/s*) foram obtidos através da equação dada por Gates (1997, 2003) no Ábaco de Gates:

$$Q/s = 358{,}7939 \times e^{-2{,}665 \times HP}(m^2/dia)$$

- Os valores para a transmissividade (*T*) foram obtidos a partir das expressões de Logan (1964), de Huntley et al. (1992) e de Batu (1998), as quais dependem de *Q/s*.
- Os valores de condutividade hidráulica K#1, K#2 e K#3 foram calculados a partir dos valores de *T* anteriores e de *e*, a partir da seguinte expressão:

$$K = \frac{T}{e} \ (m/dia)$$

- O valor de condutividade hidráulica K#4 foi calculado a partir de *Q/s* e de *e*.

HC-system

- A espessura saturada do aquífero (e) foi avaliada da mesma forma que no HP-value.
- A condutividade hidráulica (K) foi calculada diretamente a partir das duas expressões do HC-system (Hsu et al., 2011):

$$K1 = 2{,}93 \times 10^{-6} \times HC^{1{,}380}, R^2 = 0{,}866 \text{ (m/dia)}$$

$$K2 = 2{,}31 \times 10^{-6} \times HC^{1{,}342}, R^2 = 0{,}905 \text{ (m/dia)}$$

- Os valores para a transmissividade (*T*) foram calculados através dos valores de K#1 e K#2 e da espessura saturada (*e*), resultando nos valores de T#1 e T#2.
- A capacidade especifica (Q/s) foi calculada para cada valor de transmissividade (T#1 e T#2) obtido, através das expressões de Logan (1964) e de Batu (1998), respetivamente. A expressão de Huntley et al. (1992) não foi utilizada por não permitir uma fácil interpretação.

Logan (1964)

$$Q/s = \frac{T}{1{,}22} \ (m^2/dia)$$

Batu (1998)

$$Q/s = \frac{T}{1{,}385} \ (m^2/dia)$$

As seções com "Não determinado", no HP-value e no HC-system, representam os valores que não são possíveis de determinar usando as fórmulas selecionadas.

Quadro 26. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 1 (T1), Cenário 1.

Túnel 1						
	Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3
	Extensão (m)			206.0	173.0	21.0
HP Value - Cenário 1	HP value	Gates (1997, 2003)		2.69	10.91	6.67
	Caudal Q_E (L/min)			6.93	0.00	0.00
	Caudal Q_E (L/s)			0.12	0.00	0.00
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)		11.97	0.00	0.00
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)			2.76E-01	8.42E-11	6.82E-06
	Espessura zona saturada, e (m)			133.90	105.53	0.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964)	T#1	3.37E-01	1.03E-10	8.32E-06
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1		2.51E-03	9.73E-13	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992)	T#2	2.63E-02	1.55E-13	9.61E-08
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2		1.96E-04	1.47E-15	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998)	T#12	3.82E-01	1.17E-10	9.44E-06
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3		2.85E-03	1.11E-12	Não Determinado
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4		2.06E-03	7.98E-13	Não Determinado
HC System	HC System	Hsu et al. (2008, 2011)		3.39E-02	1.32E-02	3.54E-02
	Espessura zona saturada, e (m)			133.90	105.53	0.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,866 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#1	2.37E-03	6.45E-04	2.52E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #1		3.18E-01	6.81E-02	0.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,905 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#2	2.13E-03	6.00E-04	2.25E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #2		2.85E-01	6.33E-02	0.00
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Logan (1964)	T #1	2.60E-01	5.58E-02	Não Determinado
			T #2	2.33E-01	5.19E-02	Não Determinado
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Batu (1998)	T #1	2.29E-01	4.92E-02	Não Determinado
			T #2	2.06E-01	4.57E-02	Não Determinado

Quadro 27. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 1 (T1), Cenário 2.

Túnel 1						
	Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3
	Extensão (m)			206.0	173.0	21.0
HP Value - Cenário 2	HP value	Gates (1997, 2003)		1.47	5.46	6.67
	Caudal Q_E (L/min)			116.33	0.00	0.00
	Caudal Q (L/s)			1.94	0.00	0.00
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)		146.13	0.04	0.00
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)			7.13	1.72E-04	6.82E-06
	Espessura zona saturada, e (m)			133.90	105.53	0.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964)	T#1	8.70	2.09E-04	8.32E-06
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1		6.50E-02	1.98E-06	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992)	T#2	1.22	4.32E-06	9.61E-08
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2		9.10E-03	4.10E-08	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998)	T#12	9.88	2.38E-04	9.44E-06
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3		7.38E-02	2.25E-06	Não Determinado
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4		5.33E-02	1.63E-06	Não Determinado

Quadro 28. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 1 (T2/S1), Cenário 1.

Túnel 2, Setor 1						
	Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3
	Extensão (m)			54.4	57.5	25.0
HP Value - Cenário 1	HP value	Gates (1997, 2003)		2.06	1.34	1.72
	Caudal Q_E (L/min)			29.87	155.35	65.67
	Caudal Q (L/s)			0.50	2.59	1.09
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)		43.57	190.78	87.51
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)			1.48	10.08	3.66
	Espessura zona saturada, e (m)			29.38	33.93	16.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964)	T#1	1.81	12.30	4.47
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1		6.15E-02	3.63E-01	2.79E-01
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992)	T#2	1.91E-01	1.83	5.55E-01
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2		6.49E-03	5.41E-02	3.47E-02
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998)	T#12	2.05	13.97	5.07
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3		6.98E-02	4.12E-01	3.17E-01
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4		5.04E-02	2.97E-01	2.29E-01
HC System	HC System	Hsu et al. (2008, 2011)		3.42E-02	3.74E-02	2.87E-02
	Espessura zona saturada, e (m)			29.38	33.93	16.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,866 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#1	2.40E-03	2.72E-03	1.88E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #1		7.05E-02	9.21E-02	3.02E-02
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,905 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#2	2.15E-03	2.43E-03	1.70E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #2		6.32E-02	8.23E-02	2.72E-02
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Logan (1964)	T #1	5.78E-02	7.55E-02	2.47E-02
			T #2	5.18E-02	6.75E-02	2.23E-02
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Batu (1998)	T #1	5.09E-02	6.65E-02	2.18E-02
			T #2	4.56E-02	5.94E-02	1.96E-02

Quadro 29. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 1 (T2/S1), Cenário 2.

Túnel 2, Setor 1					
Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3
Extensão (m)			54.4	57.5	25.0
HP Value - Cenário 2	HP value	Gates (1997, 2003)	4.94	2.38	1.57
	Caudal Q_E (L/min)		0.00	14.29	92.06
	Caudal Q (L/s)		0.00	0.24	1.53
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)	0.12	22.60	119.03
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)		6.88E-04	6.31E-01	5.47
	Espessura zona saturada, e (m)		29.38	33.93	16.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964) T#1	8.39E-04	7.70E-01	6.67
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1	2.86E-05	2.27E-02	4.17E-01
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992) T#2	2.22E-05	6.97E-02	8.91E-01
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2	7.57E-07	2.06E-03	5.57E-02
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998) T#12	9.52E-04	8.74E-01	7.57
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3	3.24E-05	2.58E-02	4.73E-01
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4	2.34E-05	1.86E-02	3.42E-01

Quadro 30. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 2 (T2/S2), Cenário 1.

Túnel 2, Setor 2						
	Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3
	Extensão (m)			231.6	199.7	29.1
HP Value - Cenário 1	HP value	Gates (1997, 2003)		1.19	8.62	3.33
	Caudal Q_E (L/min)			219.35	0.00	1.55
	Caudal Q (L/s)			3.66	0.00	0.03
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)		259.50	0.00	3.22
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)			15.05	3.79E-08	5.02E-02
	Espessura zona saturada, e (m)			166.75	123.81	0.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964)	T#1	18.36	4.62E-08	6.12E-02
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1		1.10E-01	5.41E-03	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992)	T#2	2.94	2.10E-10	3.52E-03
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2		1.76E-02	1.69E-12	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998)	T#12	20.84	5.24E-08	6.95E-02
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3		1.25E-01	4.23E-10	Não Determinado
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4		9.03E-02	3.06E-10	Não Determinado
HC System	HC System	Hsu et al. (2008, 2011)		2.49E-02	2.45E-02	7.91E-02
	Espessura zona saturada, e (m)			166.75	123.81	0.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,866 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#1	1.55E-03	1.52E-03	7.64E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #1		2.58E-01	1.88E-01	0.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,905 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#2	1.41E-03	1.38E-03	6.63E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #2		2.34E-01	1.70E-01	0.00
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Logan (1964)	T #1	2.12E-01	1.54E-01	Não Determinado
			T #2	1.92E-01	1.40E-01	Não Determinado
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Batu (1998)	T #1	1.87E-01	1.35E-01	Não Determinado
			T #2	1.69E-01	1.23E-01	Não Determinado

Quadro 31. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 2 (T2/S2), Cenário 2.

Túnel 2, Setor 2					
Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3
Extensão (m)			231.6	199.7	29.1
HP Value - Cenário 2	HP value	Gates (1997, 2003)	1.34	2.96	5.00
	Caudal Q_E (L/min)		155.35	3.72	0.03
	Caudal Q (L/s)		2.59	0.06	0.00
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)	190.78	6.88	0.10
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)		10.09	1.35E-01	5.86E-04
	Espessura zona saturada, e (m)		166.75	123.81	0.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964) T#1	12.31	1.64E-01	7.15E-04
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1	7.38E-02	5.41E-03	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992) T#2	1.84	1.13E-02	1.84E-05
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2	1.10E-02	9.09E-05	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998) T#12	13.98	1.86E-01	8.12E-04
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3	8.38E-02	1.51E-03	Não Determinado
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4	6.05E-02	1.09E-03	Não Determinado

Quadro 32. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 3 (T2/S3), Cenário 1

Túnel 2, Setor 3							
	Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3	ZG4
	Extensão (m)			10.1	9.3	93.2	37.0
HP Value - Cenário 1	HP value	Gates (1997, 2003)		4.17	7.05	1.98	2.18
	Caudal Q_E (L/min)			0.23	0.00	35.30	22.30
	Caudal Q (L/s)			0.00	0.00	0.59	0.37
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)		0.58	0.00	51.34	34.07
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)			5.35E-03	2.48E-06	1.83	1.08
	Espessura zona saturada, e (m)			2.73	8.98	0.00	0.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964)	T#1	6.53E-03	3.03E-06	2.24	1.31
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1		2.39E-03	3.37E-07	Não Determinado	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992)	T#2	2.51E-04	2.92E-08	2.45E-01	1.31E-01
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2		9.19E-05	3.25E-09	Não Determinado	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998)	T#12	7.41E-03	3.44E-06	2.54	1.49
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3		2.72E-03	3.83E-07	Não Determinado	Não Determinado
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4		1.96E-03	2.77E-07	Não Determinado	Não Determinado
HC System	HC System	Hsu et al. (2008, 2011)		6.74E-02	4.59E-03	6.68E-02	5.28E-02
	Espessura zona saturada, e (m)			2.73	8.98	0.00	0.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,866 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#1	6.12E-03	1.50E-04	6.05E-03	4.37E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #1		1.67E-02	1.35E-03	0.00	0.00
	Condutividade hidráulica K, R^2=0,905 (m/dia)	Hsu et al. (2011)	K#2	5.35E-03	1.45E-04	5.28E-03	3.85E-03
	Transmissividade T (m^2/dia)	T #2		1.46E-02	1.31E-03	0.00	0.00
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Logan (1964)	T #1	1.37E-02	1.11E-03	Não Determinado	Não Determinado
			T #2	1.20E-02	1.07E-03	Não Determinado	Não Determinado
	Capacidade Esp. (Q/s) (m^2/dia)	Batu (1998)	T #1	1.21E-02	9.74E-04	Não Determinado	Não Determinado
			T #2	1.05E-02	9.43E-04	Não Determinado	Não Determinado

Quadro 33. Parâmetros hidrogeomecânicos para o Túnel 2, Setor 3 (T2/S3), Cenário 2.

Túnel 2, Setor 3							
	Z.G.			ZG1	ZG2	ZG3	ZG4
	Extensão (m)			10.1	9.3	93.2	37.0
HP Value - Cenário 2	HP value	Gates (1997, 2003)		3.05	6.45	3.47	3.27
	Caudal Q_E (L/min)			3.02	0.00	1.13	1.79
	Caudal Q (L/s)			0.05	0.00	0.02	0.03
	Caudal Q_A (L/min)	Ábaco Gates (2003)		5.72	0.01	2.42	3.64
	Capacidade Esp. Q/s (m^2/dia)			1.06E-01	1.23E-05	3.46E-02	5.89E-02
	Espessura zona saturada, e (m)			2.73	8.98	0.00	0.00
	Transmissividade T (m^2/dia)	Logan (1964)	T#1	1.29E-01	1.50E-05	4.22E-02	7.19E-02
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#1		4.74E-02	1.67E-06	Não Determinado	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Huntley et al. (1992)	T#2	8.48E-03	1.93E-07	2.26E-03	4.25E-03
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#2		3.11E-03	2.15E-08	Não Determinado	Não Determinado
	Transmissividade T (m^2/dia)	Batu (1998)	T#12	1.47E-01	1.70E-05	4.79E-02	8.16E-02
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#3		5.38E-02	1.90E-06	Não Determinado	Não Determinado
	Condutividade hidráulica K (m/dia)	K#4		3.88E-02	1.37E-06	Não Determinado	Não Determinado

Face aos resultados apresentados nos quadros anteriores, tecem-se seguidamente algumas considerações da aplicação dos índices hidrogeomecânicos.

HP-Value

O Túnel 1 é a secção que apresenta tendencialmente os valores médios de HP mais elevados, nos dois cenários, particularmente no cenário 1. A este segue-se, no cenário 1, o Túnel 2/Setor 2, e no cenário 2, o Túnel 2/Setor 3.

Quanto aos valores de caudal em L/min, quer para Q_E quer para Q_A, o Túnel 2 apresenta os valores mais altos nos Setores 1 e 2 para o Cenário 1. Quanto ao Cenário 2, o Túnel 1 e o Túnel 2/Setor 2 apresentam os maiores valores médios. Relativamente aos valores de caudal em L/s para ambos os cenários, verificando-se grandes disparidades entre as secções. O Túnel 1 e o Túnel 2/Setor 1 são as secções onde melhor se identifica a diferença entre os dois cenários. Apesar da

disparidade entre cenários, é possível verificar que a secção onde se verifica sinais de menor circulação de águas subterrâneas é o Túnel 2/Setor 3.

Na Figura 13 apresenta-se a correlação entre os valores de HP e os caudais Q (L/min), a qual como se pode verificar é excelente (R^2=1), indo ao encontro da obtida por Gates (1997, 2003).

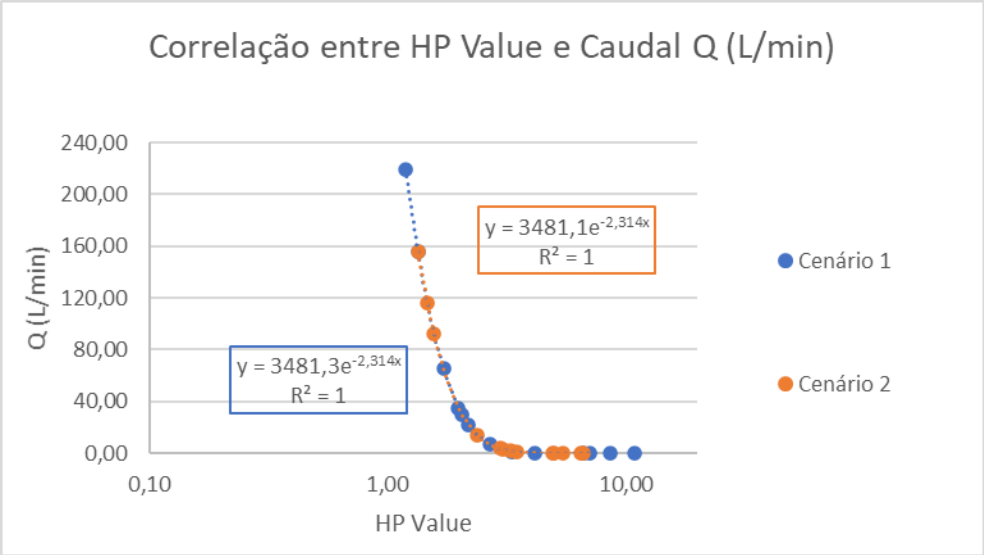


Figura 13. Correlação entre os valores de HP e o Q (L/min).

Da mesma forma, a correlação entre os valores de HP e os caudais Q (L/s) é excelente (Figura 14).

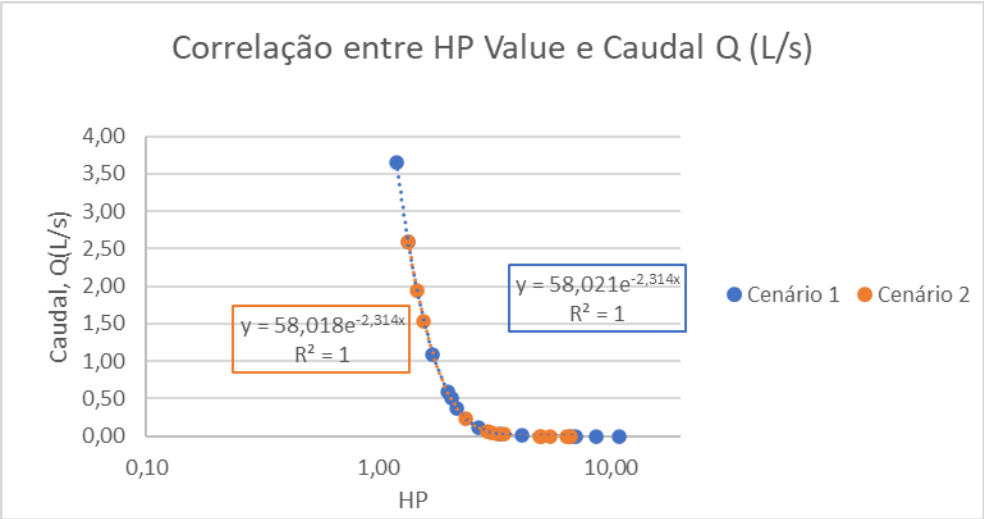


Figura 14. Correlação entre os valores de HP e o Q (L/s).

A fim de comparar os resultados obtidos no HP-value, estes foram projetados em conjunto com os valores de caudal Q_E (L/min), no Ábaco de Gates (2003). Para além disso, projetaram-se também os valores de capacidade específica Q/s (m^2/dia) neste ábaco (Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18).

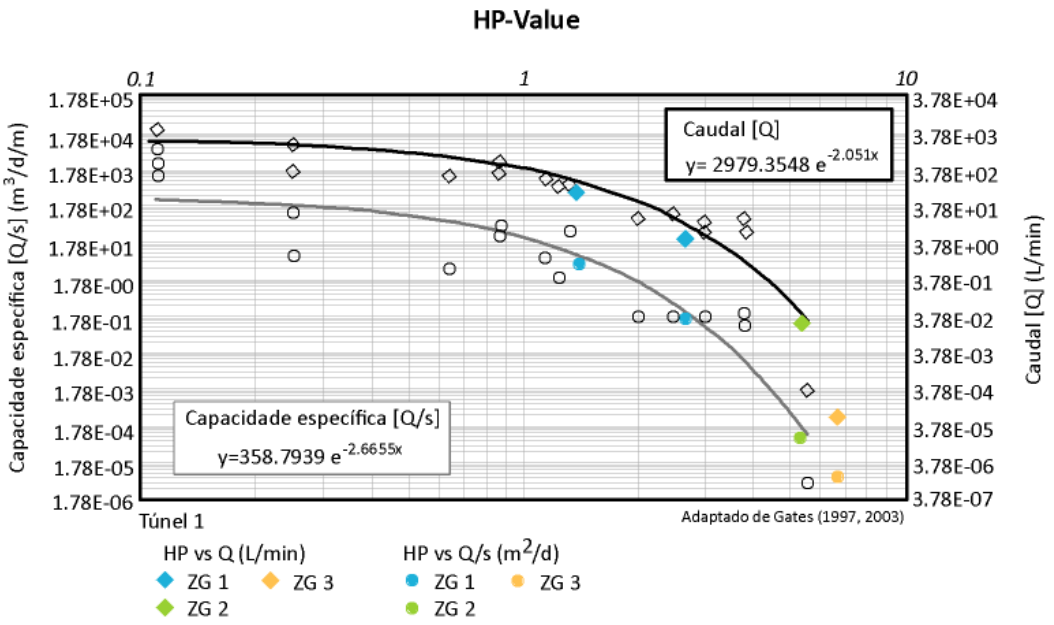


Figura 15. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 1 com os obtidos por Gates (2003).

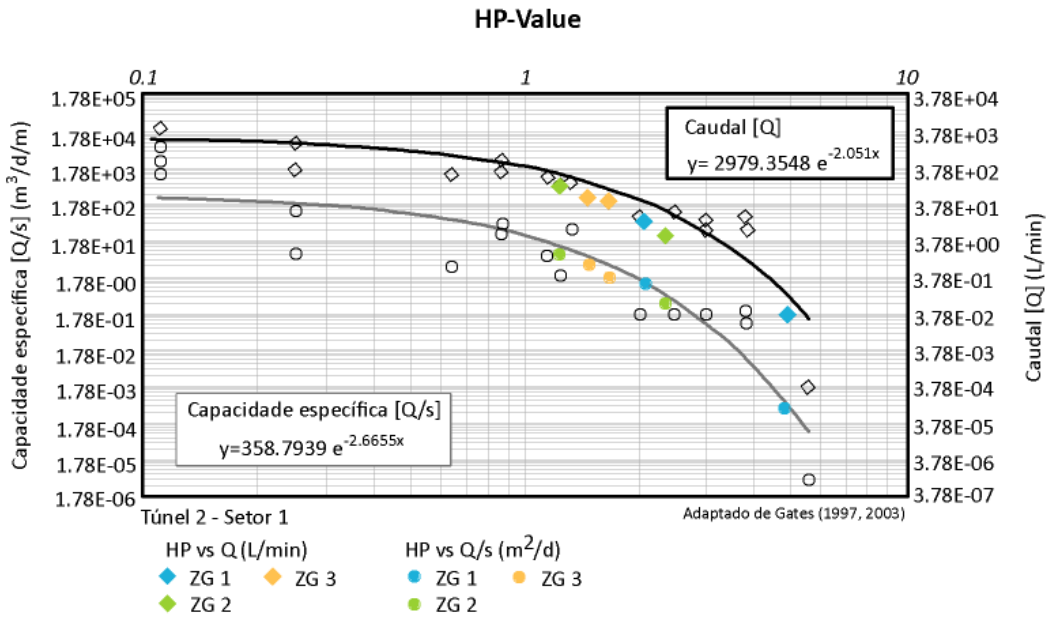


Figura 16. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 2/Setor 1 com os obtidos por Gates (2003).

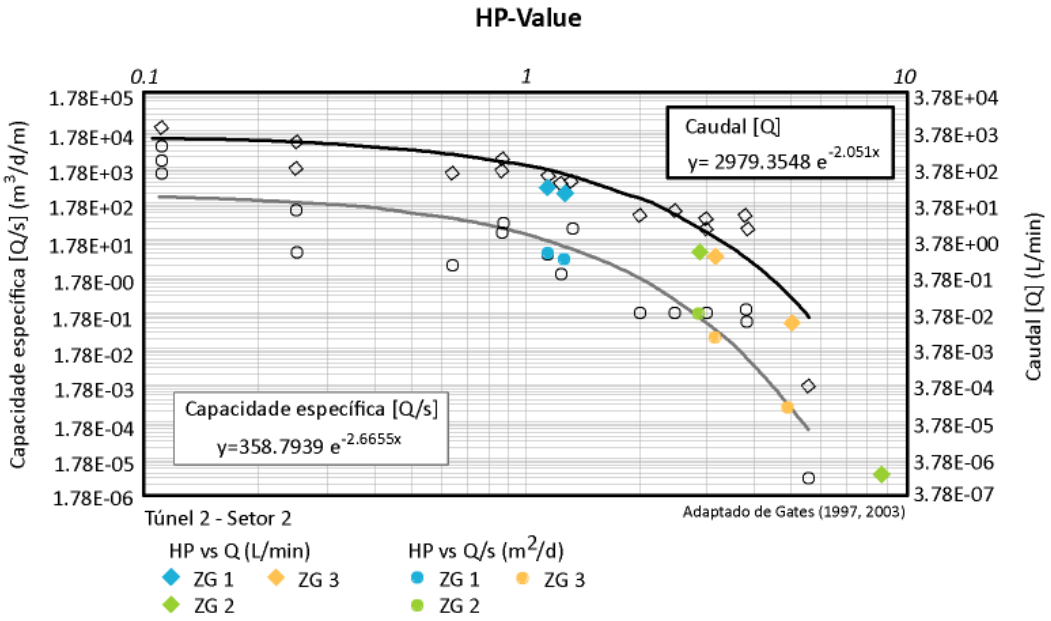


Figura 17. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 2/Setor 2 com os obtidos por Gates (2003).

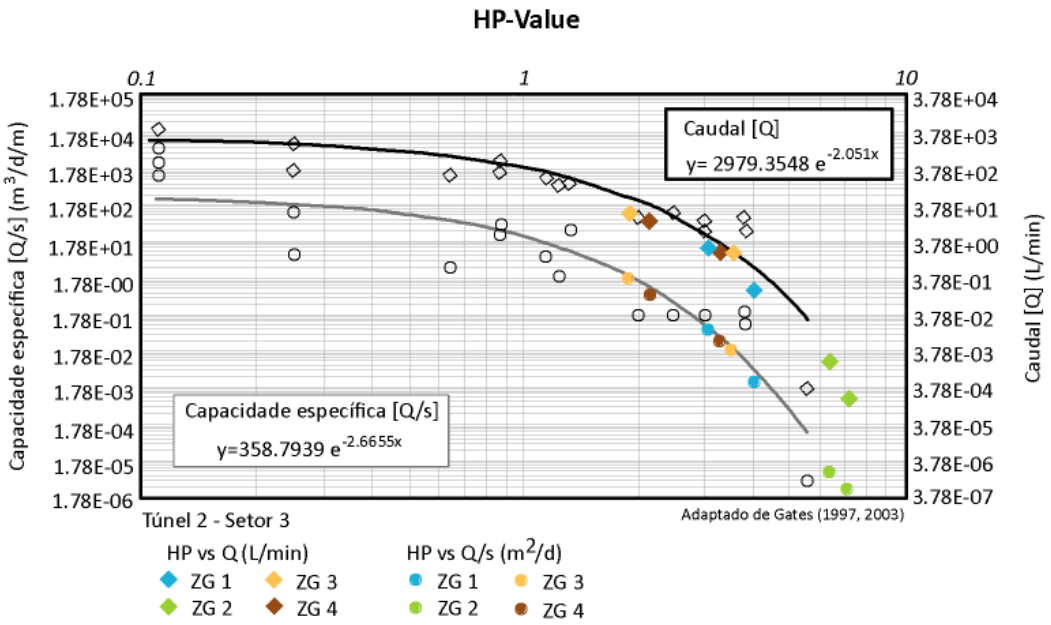


Figura 18. Comparação dos valores de HP calculados para o Túnel 2/Setor 3 com os obtidos por Gates (2003).

De uma forma geral, os valores calculados posicionam-se próximo das curvas de correlação propostas por Gates (2003), sendo a curva de correlação muito idêntica (Figura 19), o que conforta a abordagem realizada neste estudo.

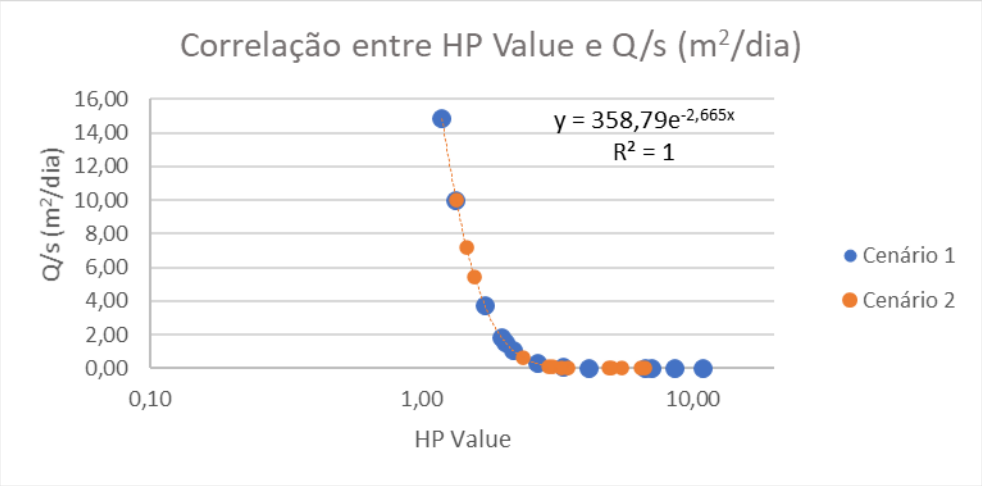


Figura 19. Correlação entre os valores de HP e a Q/s (m^2/dia).

Relativamente à correlação entre os valores de HP e os valores de condutividade hidráulica K#1, K#2, K#3 e K#4, esta parece ser inexistente nos dois cenários (Figura 20 e Figura 21).

Observa-se, no entanto, que quanto maior for o valor de HP, menor será o valor de condutividade hidráulica, sendo a expressão de K#3 a que produz os valores mais elevados, seguida da expressão K#1, e a expressão K#4 é a que produz os valores mais baixos.

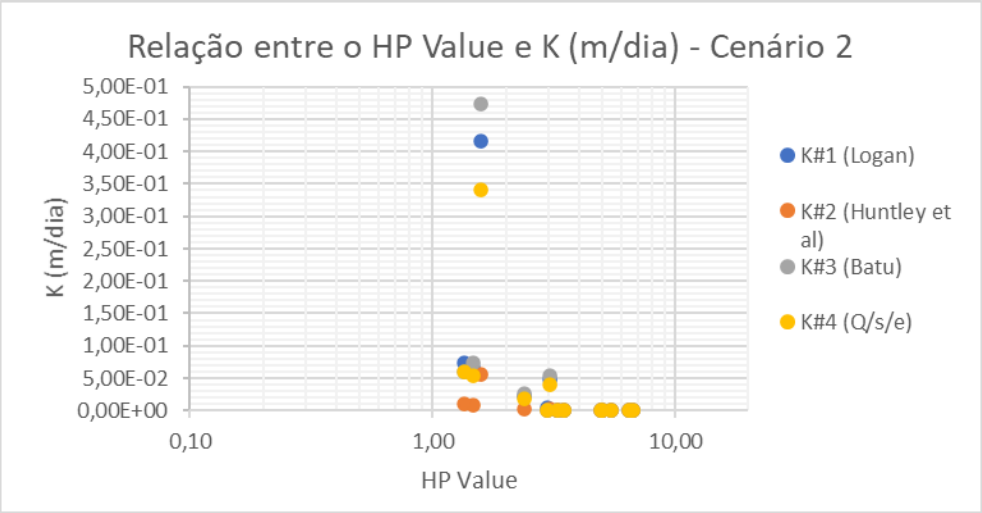


Figura 20. Correlação entre os valores de HP e os valores de K (m/dia) para o Cenário 1.

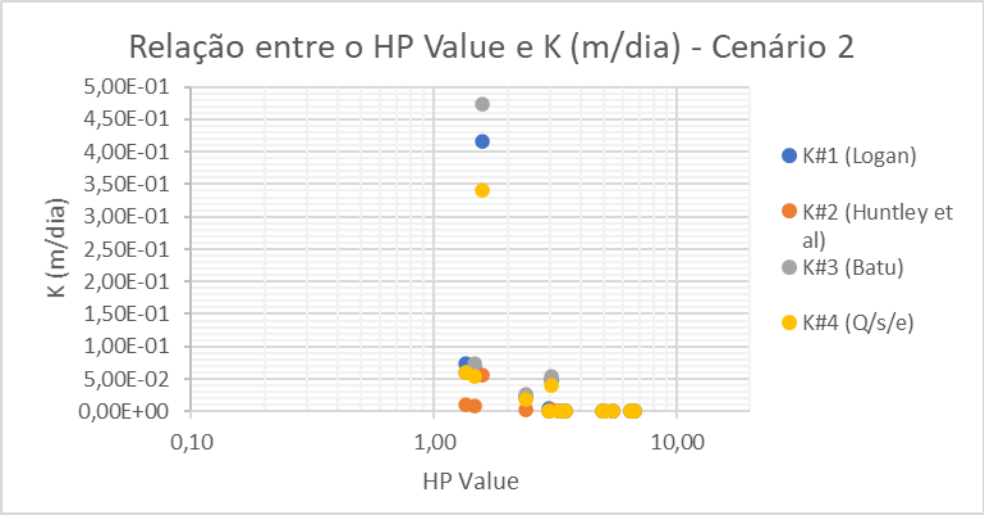


Figura 21. Correlação entre os valores de HP e os valores de K (m/dia) para o Cenário 2.

HC-System

Os valores de HC-system foram igualmente comparados com outros parâmetros. A relação entre HC-system e os dois valores de condutividade hidráulica, K(HC)#1 e K(HC)#2, encontra-se na Figura 22, sendo de notar que existe uma correlação linear excelente. Relativamente aos parâmetros transmissividade (T) e capacidade específica (Q/s) não foi encontrada qualquer correlação com os valores de HC-system.

Estabeleceram-se ainda as correlações entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2 e os valores de RQD, DI e GCD, parâmetros que estão na base do cálculo de HC-system, como se viu anteriormente. Não foi estabelecida qualquer correlação com o parâmetro LPI, uma vez que este tem o valor constante de 0.15.

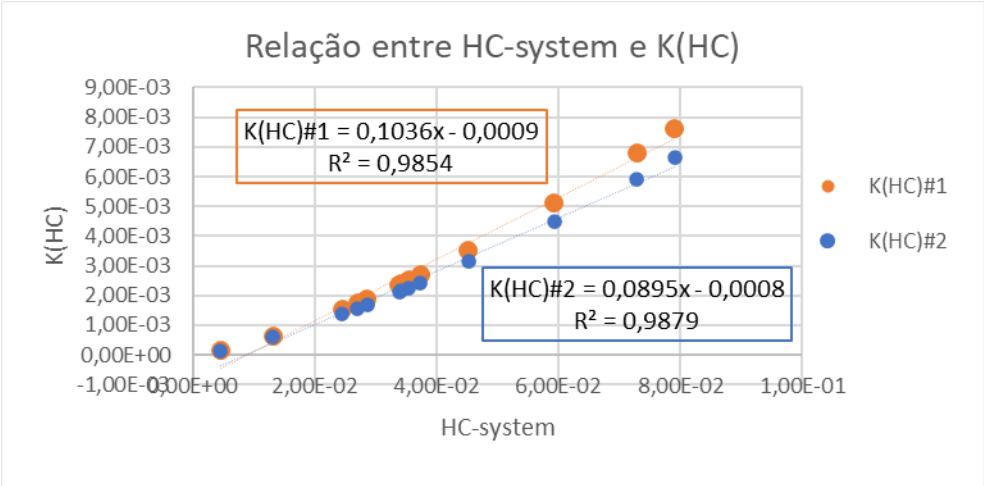


Figura 22. Correlação entre os valores de HC-system e os valores de K (m/dia).

Relativamente à comparação com o RQD, a correlação linear não existe (Figura 23) e a melhor correlação encontrada é polinomial (Figura 24).

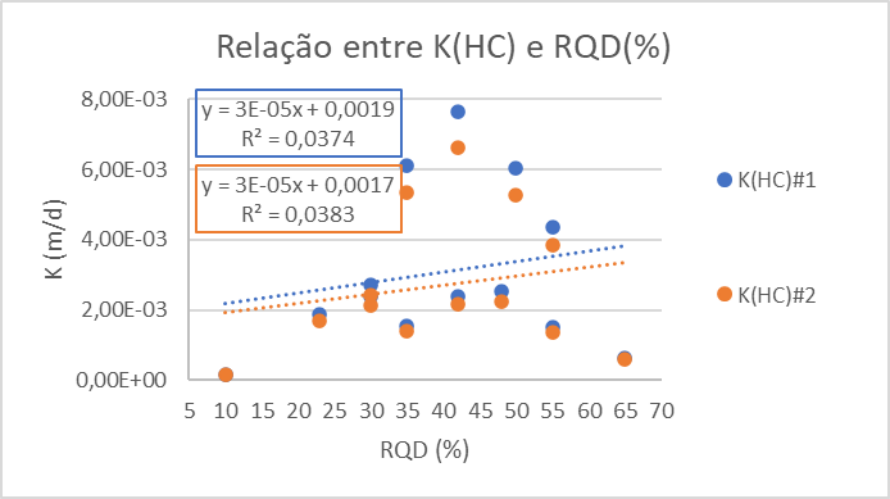


Figura 23. Correlação linear entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2) e os valores de RQD.

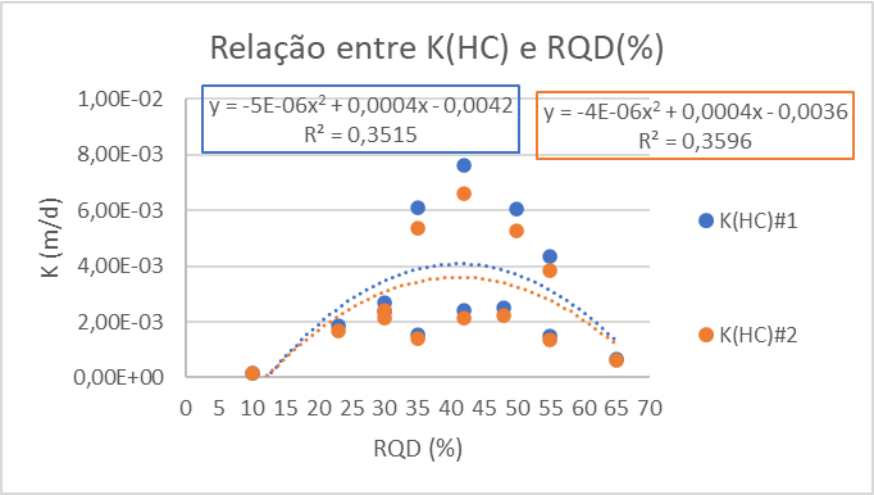


Figura 24. Correlação polinomial entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2) e os valores de RQD.

Quanto à comparação com o DI, existe uma correlação linear razoável (Figura 25). Relativamente ao parâmetro GCD não foi encontrada qualquer correlação.

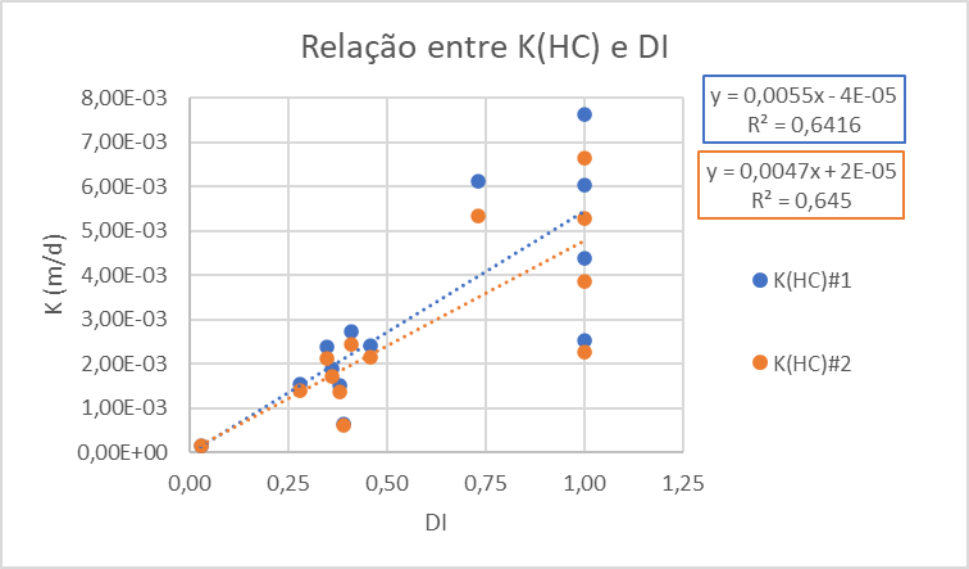


Figura 25. Correlação entre os valores de K(HC)#1 e K(HC)#2) e os valores de DI.

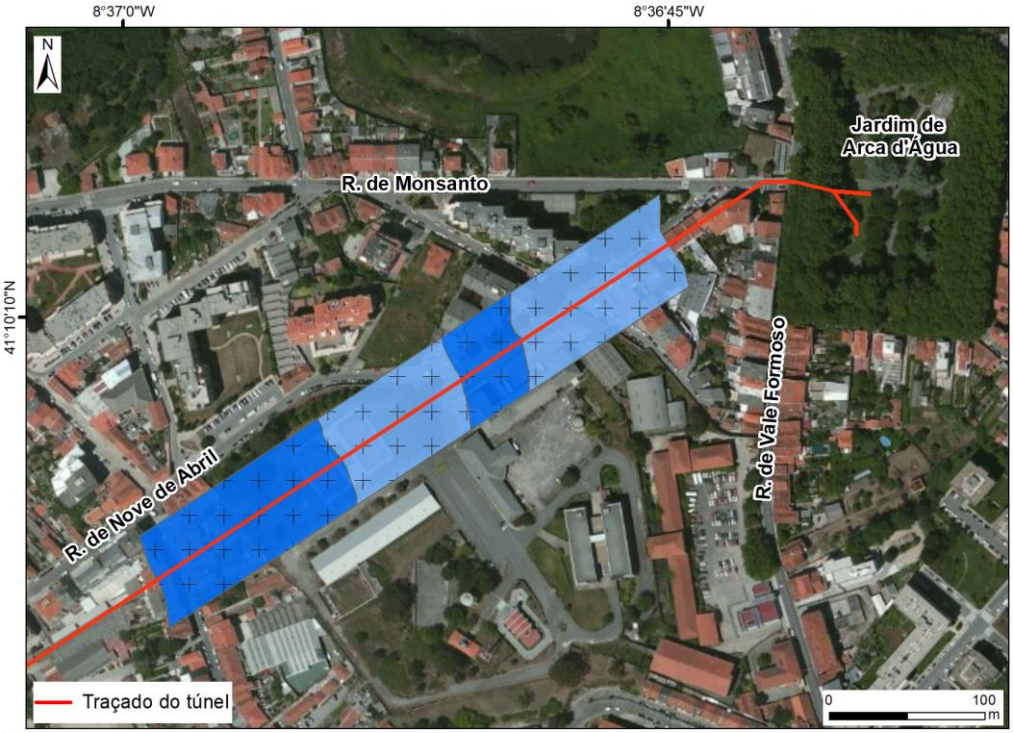
3.6. Zonamento hidrogeomecânico

A abordagem metodológica para esboçar uma proposta de zonamento hidrogeomecânico foi realizado a partir da classificação HP-Value, que aponta para a avaliação das condições geohidráulicas subterrâneas (especialmente do caudal, Q, L/s) da água que circula no maciço rochoso. Com base no potencial da quantidade de água subterrânea, é plausível estabelecer um zonamento que traduza as condições hidrogeomecânicas dominantes do maciço. Foi igualmente tido em consideração o parâmetro das condições hidraúlicas estimadas para a classificação RMR, o HC-System, bem como do conhecimento dos estudos hidrogeológicos de pormenor dos subterrâneos de Paranhos (e.g., Afonso, 2011; Afonso et al., 2016). Esta abordagem segue também as ensaiadas em casos de estudos desenvolvidos, por exemplo, por Madureira (2012) e Meirinhos (2015).

Assim, o zonamento hidrogeomecânico foi desenvolvido através da relação entre os valores obtidos pelo índice hidrogeomecânico HP-value e a classificação HC-system, dividindo o maciço em zonas com características semelhantes em termos de potencial geohidráulico e permeabilidade (ZHGM). O potencial geohidráulico, complementado ainda a partir do conhecimento local de Afonso (2011), foi sistematizado em quatro (4) classes principais em função dos caudais (Q, L/s), a saber: i) Muito baixo: < 0,2 L/s; ii) Baixo: 0,2 – 1,5 L/s; iii) Moderado: 1,5 – 3,5 L/s; iv) Elevado: > 3,5 L/s

Túnel 1

No Túnel 1 é possível definir duas unidades hidrogeomecânicas, ZHGM1 correspondente à zona geotécnica ZG1 e ZHGM2 que corresponde ao agrupamento das zonas geotécnicas ZG2 e ZG3. A unidade ZHGM1 caracteriza-se por um potencial geohidráulico moderado a baixo, com caudais inferiores a 1,9 L/s e permeabilidade baixa, na ordem de $2x10^{-3}$ m/d. Por seu turno, a unidade ZHGM2 caracteriza-se por um potencial geohidráulico muito baixo, com caudais virtualmente nulos e permeabilidade baixa, inferior a $2,5x10^{-3}$ m/d. Na Figura 26 apresenta-se o zonamento hidrogeomecânico definido para o Túnel 1, no qual se indica a qualidade geomecânica do maciço, os caudais e as permeabilidades expectáveis.



Túnel 1

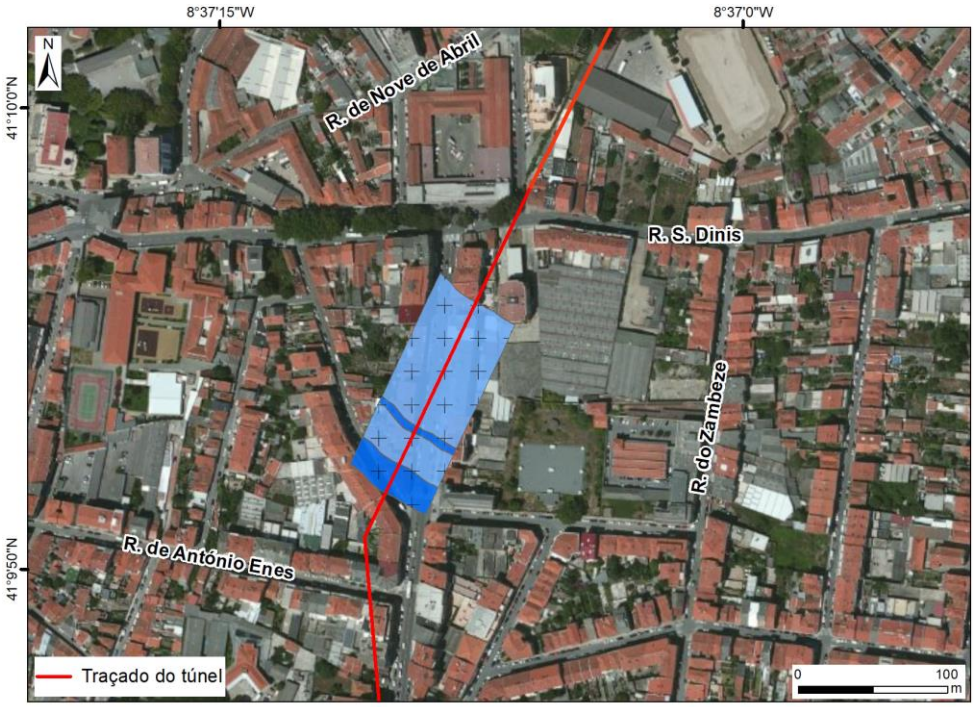
Zona Geotécnica (ZG)	Qualidade Geomecânica (Moreira, 2009, 2012)	HP-value		HC-System	Zona Hidrogeomecânica (ZHGM)	Descrição
		Valor	Caudal (Q, L/s)	Condutividade hidráulica (K_{HC}, m/d)		
ZG 1	RMR: 41-51 Q-System: 0,6-1 *Muito fraca a fraca*	1,47	1,94	$2,13x10^{-3}$ / $2,37x10^{-3}$	**ZHGM 1** *Potencial geohidráulico baixo a moderado*	HP-value: 1,4-2,7 Q (L/s): 0,1-1,9 K_{HC} (m/d): $2,1x10^{-3}$ - $2,4x10^{-3}$ *Maciço apresenta caudal baixo a moderado e permeabilidade baixa*
ZG 2	RMR: 35-55 Q-System: 0,75-3,5 *Fraca a razoável*	5,46	0,00	$6,00x10^{-4}$ / $6,45x10^{-4}$	**ZHGM 2** *Potencial geohidráulico muito baixo*	HP-value: 5,4-6,7 Q (L/s): 0,0 K_{HC} (m/d): $6,0x10^{-4}$ - $2,5x10^{-3}$ *Maciço apresenta caudal extremamente baixo e permeabilidade baixa*
ZG 3		6,67	0,00	$2,25x10^{-3}$ / $2,52x10^{-3}$		

Figura 26. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 1.

Túnel 2/Setor 1

O Túnel 2/Setor 1 apresenta duas unidades hidrogeomecânicas, ZHGM1 correspondente ao agrupamento das zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 e ZHGM2 que corresponde à zona geotécnica ZG3. A unidade ZHGM1 caracteriza-se por um potencial geohidráulico baixo, com caudais inferiores a 1,0 L/s e permeabilidade baixa, na ordem de $2x10^{-3}$ m/d. Por outro lado, a unidade ZHGM2 caracteriza-se por um potencial geohidráulico baixo a moderado, com caudais no intervalo 1,0 a 1,6 L/s e permeabilidade baixa, na ordem de $2,0x10^{-3}$ m/d.

Na Figura 27 apresenta-se o zonamento hidrogeomecânico definido para o Túnel 2/Setor 1, no qual se indica a qualidade geomecânica do maciço, os caudais e as permeabilidades expectáveis.



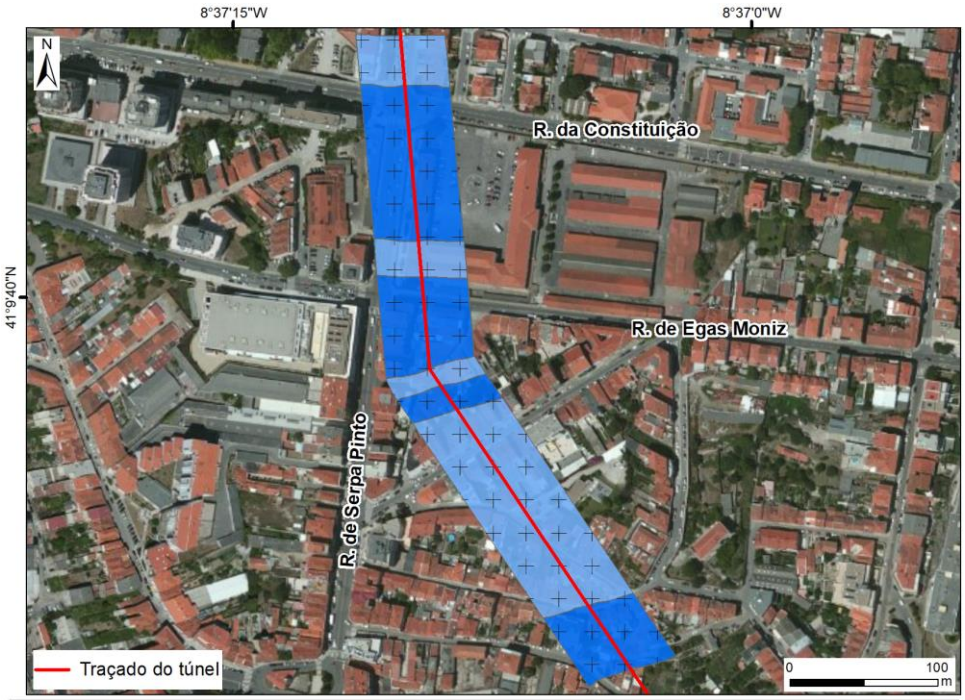
Túnel 2 - Setor 1

Zona Geotécnica (ZG)	Qualidade Geomecânica (Madureira, 2012)	HP-value: Valor	HP-value: Caudal (Q, L/s)	HC-System: Condutividade hidráulica (K_{HC}, m/d)	Zona Hidrogeomecânica (ZHGM)	Descrição
ZG 1	RMR: 40-55 Q-System: 0,7-2,0 *Fraca*	2,06	0,50	$2,15x10^{-3}$ / $2,40x10^{-3}$	**ZHGM 1** *Potencial geohidráulico baixo*	HP-value: 2,0-2,5 Q (L/s): 0,2-1,0 K_{HC} (m/d): $2,0x10^{-3}$ - $3,0x10^{-3}$ *Maciço apresenta caudal muito baixo e permeabilidade baixa*
ZG 2		2,38	0,24	$2,43x10^{-3}$ / $2,72x10^{-3}$		
ZG 3	RMR: 30-45 Q-System: 1,1-1,5 *Muito fraca*	1,72	1,09	$1,70x10^{-3}$ / $1,88x10^{-3}$	**ZHGM 2** *Potencial geohidráulico baixo a moderado*	HP-value: 1,5-1,8 Q (L/s): 1,0-1,6 K_{HC} (m/d): $1,6x10^{-3}$ - $2,0x10^{-3}$ *Maciço apresenta caudal baixo e permeabilidade baixa*

Figura 27. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 2/Setor 1.

Túnel 2/Setor 2

No Túnel 2/Setor 2 é possível definir duas unidades hidrogeomecânicas, ZHGM1 correspondente à zona geotécnica ZG1 e ZHGM2 que corresponde ao agrupamento das zonas geotécnicas ZG2 e ZG3. A unidade ZHGM1 caracteriza-se por um potencial geohidráulico moderado, com caudais no intervalo 2,5 a 3,7 L/s e permeabilidade baixa, na ordem de $1{,}5 \times 10^{-3}$ m/d. Por seu turno, a unidade ZHGM2 caracteriza-se por um potencial geohidráulico muito baixo, com caudais inferiores a 0,1 L/s e permeabilidade baixa a moderada, podendo atingir valores da ordem de $8{,}0 \times 10^{-3}$ m/d. Na Figura 28 apresenta-se o zonamento hidrogeomecânico definido para o Túnel 2/Setor 2, no qual se indica a qualidade geomecânica do maciço, os caudais e as permeabilidades expectáveis.



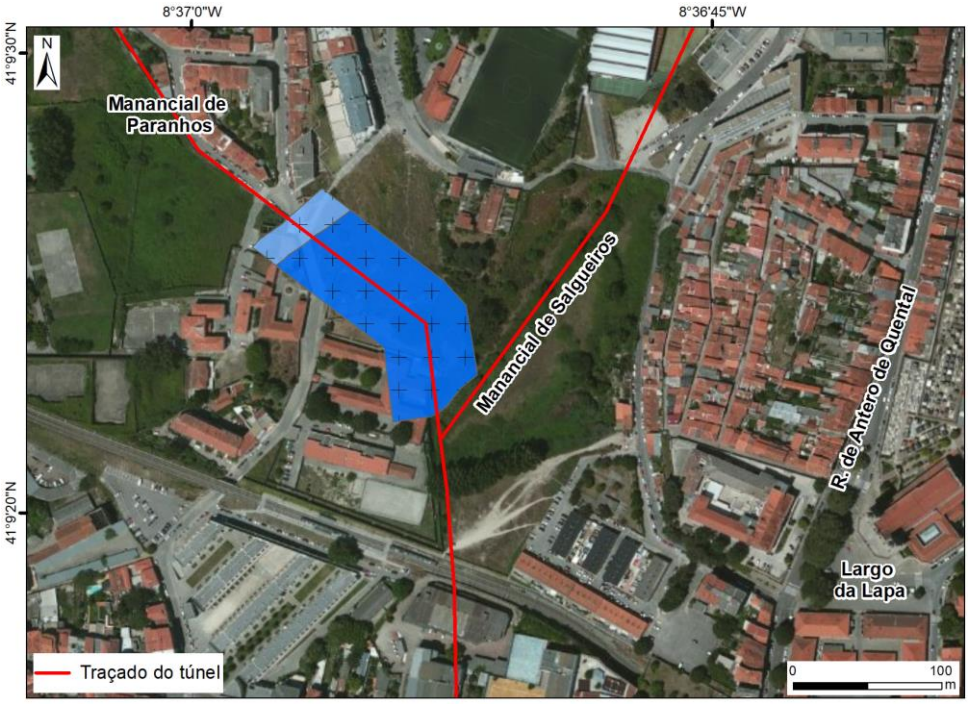
Túnel 2 - Setor 2

Zona Geotécnica (ZG)	Qualidade Geomecânica (Madureira, 2012)	HP-value		HC-System	Zona Hidrogeomecânica (ZHGM)	Descrição
		Valor	Caudal (Q, L/s)	Condutividade hidráulica (K_{HC}, m/d)		
ZG 1	RMR: 30-35 Q-System: 0,5-1,0 *Muito fraca*	1,34	2,59	$1{,}41 \times 10^{-3}$ / $1{,}55 \times 10^{-3}$	**ZHGM 1** *Potencial geohidráulico moderado*	HP-value: 1,0-1,5 Q (L/s): 2,5-3,7 K_{HC} (m/d): $1{,}4 \times 10^{-3}$ - $1{,}6 \times 10^{-3}$ *Maciço apresenta caudal moderado e permeabilidade baixa*
ZG 2	RMR: 40-55 Q-System: 1,5-2,0 *Fraca a razoável*	2,96	0,06	$1{,}38 \times 10^{-3}$ / $1{,}52 \times 10^{-3}$	**ZHGM 2** *Potencial geohidráulico muito baixo*	HP-value: 2,8-5,0 Q (L/s): <0,1 K_{HC} (m/d): $1{,}4 \times 10^{-3}$ - $7{,}6 \times 10^{-3}$ *Maciço apresenta caudal extremamente baixo e permeabilidade baixa a moderada*
ZG 3		5,0	0,00	$6{,}63 \times 10^{-3}$ / $7{,}64 \times 10^{-3}$		

Figura 28. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 2/Setor 2.

Túnel 2/Setor 3

O Túnel 2/Setor 3 apresenta duas unidades hidrogeomecânicas, ZHGM1 correspondente ao agrupamento das zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 e ZHGM2 correspondente ao agrupamento das zonas geotécnicas ZG3 e ZG4. A unidade ZHGM1 caracteriza-se por um potencial geohidráulico extremamente baixo, com caudais inferiores a 0,1 L/s e permeabilidade baixa, podendo atingir valores da ordem de $1{,}5x10^{-4}$ m/d. Por outro lado, a unidade ZHGM2 caracteriza-se por um potencial geohidráulico muito baixo, com caudais inferiores a 0,6 L/s e permeabilidade baixa, na ordem de $5{,}0x10^{-3}$ m/d. Na Figura 29 apresenta-se o zonamento hidrogeomecânico definido para o Túnel 2/Setor 3, no qual se indica a qualidade geomecânica do maciço, os caudais e as permeabilidades expectáveis.



Túnel 2 - Setor 3

Zona Geotécnica (ZG)	Qualidade Geomecânica (Madureira, 2012)	HP-value		HC-System	Zona Hidrogeomecânica (ZHGM)	Descrição
		Valor	Caudal (Q, L/s)	Condutividade hidráulica (K_{HC}, m/d)		
ZG 1	RMR: 35-55 Q-System: 0,7-2,8 *Fraca a muito fraca*	3,05	0,05	$5{,}35x10^{-3}$ / $6{,}12x10^{-3}$	**ZHGM 1** *Potencial geohidráulico muito baixo*	HP-value: 3,0-6,5 Q (L/s): <0,1 K_{HC} (m/d): $1{,}5x10^{-4}$ - $6{,}2x10^{-3}$
ZG 2		6,45	0,00	$1{,}45x10^{-4}$ / $1{,}50x10^{-4}$		*Maciço apresenta caudal extremamente baixo e permeabilidade baixa*
ZG 3	RMR: 45-60 Q-System: 1,5-2,5 *Razoável*	3,47	0,02	$5{,}2810^{-3}$ / $6{,}05x10^{-3}$	**ZHGM 2** *Potencial geohidráulico muito baixo*	HP-value: 2,0-3,5 Q (L/s): 0,02-0,6 K_{HC} (m/d): $4{,}4x10^{-3}$ - $6{,}1x10^{-3}$
ZG 4		3,27	0,03	$3{,}85x10^{-3}$ / $4{,}37x10^{-3}$		*Maciço apresenta caudal muito baixo e permeabilidade baixa*

Figura 29. Proposta de zonamento hidrogeomecânico para o Túnel 2/Setor 3.

(página propositadamente em branco)

Capítulo IV

O modelo hidrogeológico conceptual: o papel da hidrogeomecânica em estudos de pormenor

(página propositadamente em branco)

4. O modelo hidrogeológico conceptual: o papel da hidrogeomecânica em estudos de pormenor

Afonso (2011) e Afonso et al. (2016) apresentaram uma proposta do modelo hidrogeológico conceptual da área dos túneis dos mananciais de Paranhos-Salgueiros. Na área envolvente às galerias dos mananciais de Paranhos e Salgueiros coexistem três tipos de sistemas aquíferos que se interrelacionam, a saber (Figura 30):

- **Aluviões:** meio poroso, com espessura reduzida (< 6 m), aquífero livre, nível hidrostático posiciona-se próximo da superfície (< 4 m), permeabilidade baixa a moderada (< 2 m/d);
- **Granito muito alterado a decomposto, pontualmente caulinizado:** meio fissurado e/ou poroso, com espessuras que podem atingir os 20-35 m de profundidade, aquífero livre, com o nível hidrostático a baixa profundidade (4-6 m), e permeabilidade muito baixa a baixa (< 0.3 m/d);
- **Granito medianamente a pouco alterado, fracturado:** meio fissurado, aquífero semi-confinado, nível piezométrico a profundidades da ordem dos 8-12 m, com uma permeabilidade muito baixa a baixa (<0.8 m/d);
- **Granito são compacto:** meio fissurado, aquífero confinado, com uma permeabilidade praticamente nula (< 0.01 m/d).

As águas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros são, globalmente, águas de circuito curto e superficial, associadas a um tempo de residência reduzido, as quais circulam fundamentalmente nas unidades livres a semi-confinadas (Afonso et al., 2016). Ainda, segundo Afonso (2011*): "A recarga direta dos sistemas aquíferos livres tem origem, fundamentalmente, na infiltração resultante da precipitação atmosférica (águas meteóricas) em zonas de vale nas quais as aluviões e o maciço granítico muito alterado afloram ou se encontram sob espaços ajardinados e agrícolas. Além disso, a recarga destes sistemas pode processar-se localmente, através dos poços de ventilação não estanques existentes nas galerias e indiretamente, pelos sistemas de águas pluviais, de água potável e da rede de saneamento. Por seu turno, o sistema semi-confinado, será alimentado: i) superiormente pelas unidades livres, as quais funcionam como uma "esponja" que*

armazena e drena para os níveis inferiores; ii) diretamente a partir da superfície, nas zonas onde aquele aflora, por intermédio de descontinuidades (diaclases e/ou falhas) abertas ou estruturas tectónicas com uma penetratividade importante em profundidade.".

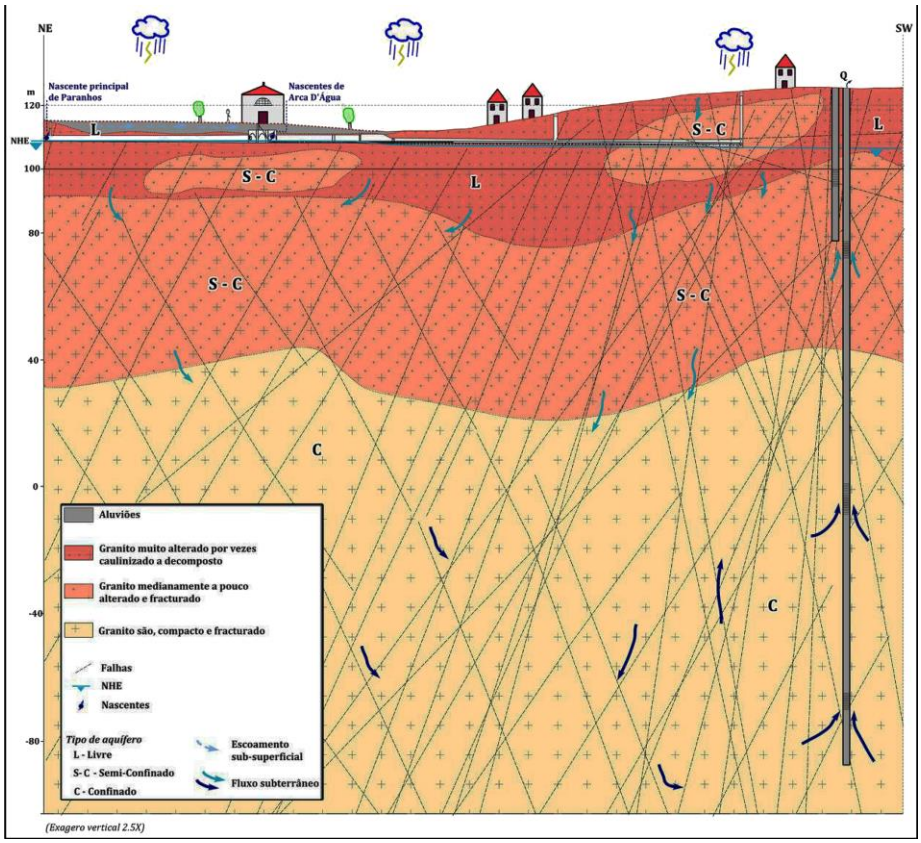


Figura 30. Modelo hidrogeológico conceptual da área envolvente às galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros (segundo Afonso, 2011).

Neste estudo, a partir dos parâmetros hidrogeomecânicos, o sistema HC-System apresenta uma abordagem mais simplista considerando parâmetros menos influentes no que diz respeito ao fluxo de água (Hsu et al., 2011). Isto porque os autores não relevam as características geológico-geotécnicas das descontinuidades, incluindo o parâmetro de intercepto de fracturação/espaçamento, F (ISRM, 1981), tornando mais difícil a ligação entre a classificação e o maciço rochoso.

Mayer et al. (2014) publicaram um interessante artigo, relativo a um estudo estatístico dos parâmetros do valor HP-Value e do sistema HC-System que, opinam que existe uma "excessiva dependência do RQD como indicação do estado da fracturação, apesar da sua limitação em sistemas de fracturas próximos e amplamente espaçadas". Assim, os meios fissurados conceptualizados são dominados pelo papel da rede de descontinuidades e sua

interconectividade. Cahyadi et al. (2017) mostram que existe uma correlação entre os valores de HC-System e condutividade hidráulica sendo que a utilização do método necessita de um grande número de dados observacionais e dados de logs geotécnicos. Logo, a reprodutibilidade da previsão da condutividade hidráulica com os valores de HC-System é muito dependente de um grande número de dados. Por seu turno, o HC-System tem uma visão restritiva uma vez que, considera apenas o RQD juntamente com o parâmetro "Gouge Content Designation" (GCD) para estabelecer os parâmetros de fracturação do maciço rochoso. Assim, dentro de cada zona geotécnica, a classificação HC-System alcançou valores semelhantes e não incrementará a informação relativa ao sistema dos sistemas aquíferos de Paranhos-Salgueiros. Os resultados do índice do valor de HP-Value variaram num intervalo mais amplo e realista do que os obtidos através do HC-System.

O potencial geohidráulico, como referido no capítulo 2, deve ser entendido como o caudal de circulação que virtualmente poderá fluir através do maciço rochoso fissurado (Gates, 1997, 2003). Como tal, em termos de HP-Value se for > 3.0 o potencial geohidráulico será nulo e, por seu turno, se for < 3.0 o potencial geohidráulico variará consoante o valor do HP-Value (Gates, 1997, 2003), i.e., baixo a muito baixo (>2.5), moderado (2.5 – 0.5), e elevado a muito elevado (< 0.5).

As presentes investigações hidrogeomecânicas, em termos do potencial geohidraúlico, levam a esboçar o seguinte contributo para o modelo hidrogeológico conceptual do maciço de Paranhos-Salgueiros para os sistemas hidrogeológicos fissurados (dominantemente unidades graníticas):

- **Granito muito alterado a decomposto, por vezes caulinizado:** aquífero livre, nível hidrostático a baixa profundidade (4-6 m), permeabilidade muito baixa a baixa (< 0.3 m/d); caudais extremamente baixos a muito baixos (< 0.2 L/s), HP-Value (> 2.9), ou seja, com um potencial geohidráulico muito baixo;
- **Granito medianamente a pouco alterado, fracturado:** aquífero semi-confinado; nível piezométrico baixo (8-10 m), permeabilidade baixa a moderada (<0.8 m/d), caudais muito baixos a baixos (0.1 a 1.5 L/s), HP-Value no intervalo 2.5-1.4, ou seja, com um potencial geohidráulico baixo a moderado;
- **Granito são compacto:** aquífero com características confinadas, permeabilidade muito baixa a nula (< 0.01 m/d), caudais baixos a moderados (> 2.5 L/s), HP-Value no intervalo 1.3-0.5, ou seja, com um potencial geohidráulico moderado a elevado.

(página propositadamente em branco)

Capítulo V

Conclusões

(página propositadamente em branco)

5. Conclusões

Neste estudo aplicaram-se os índices hidrogeomecânicos HP-Value e HC-System para avaliar o potencial geohidráulico do maciço granítico fraturado nos mananciais de Paranhos-Salgueiros. Ambas as técnicas hidrogeomecânicas foram ensaiadas a fim de explorar a potencialidade na aplicação de cada índice (HP-Value e HC-System), bem como as possíveis correlações entre-si e os variados parâmetros geológico-geotécnicos e hidrogeológicos analisados.

Do ponto de vista teórico, existiria uma maior confiança nos resultados obtidos, tanto pelo HP-Value e como pelo HC-System, se cada descontinuidade fosse analisada individualmente, ou seja, avaliando a permeabilidade individualmente consoante as diferentes características geológico-geotécnicas e hidrogeomecânicas. Por outro lado, do ponto de vista prático seria irrealista essa abordagem, mesmo que se considerassem áreas amostrais mais restritivas. De ressalvar que o HP-Value é índice que mais considera as diferentes características das descontinuidades quando comparado com o HC-System. Assim, optou-se por uma abordagem integradora na aplicação dos índices hidrogeomecânicos.

Este estudo envolveu a compilação, integração, análise e interpretação das características geológico-geotécnicas, geomecânicas e hidrogeológicas do maciço exposto das galerias subterrâneas dos mananciais de Paranhos-Salgueiros.

Os resultados mostram que:

- os valores de HP-Value não são claramente relacionáveis aos valores de condutividade hidráulica ou de transmissividade; no entanto, nota-se um aumento nos valores de capacidade específica à medida que os valores de HP-Value diminuem;
- os valores de HC-System são correlacionáveis com os valores de condutividade hidráulica, demonstrando um aumento à medida que os valores de HC-System aumentam;
- o zonamento das descontinuidades por propriedades hidrogeomecânicas semelhantes, foi possível a caracterização do comportamento hidráulico das distintas zonas;

- a zona que representa a secção com maior potencial de circulação geohidráulica e condutividade hidráulica é a zona hidrogeomecânica nº 1 do Túnel 2, Setor 2. A zona que representa a secção com o menor potencial de circulação geohidráulica e condutividade hidráulica é a zona hidrogeomecânica nº 2 do Túnel 1.
- A investigação, ainda que exploratória, recorrendo ao índice HP-Value permitiu concluir que a aplicação deste índice é promissor para avaliação dos potenciais caudais de fluxo de água subterrânea.

Em relação aos índices HP-Value e HC-System, apontam-se duas sugestões para investigações futuras:

- o refinamento dos parâmetros de ambos os índices de forma a relacionar com a interconectividade das descontinuidades, tal como a orientação das descontinuidades, a terminação e o espaçamento entre descontinuidades;
- no HC-System, o refinamento do parâmetro Depth Index (DI) de forma que permita a sua utilização sem consideração de uma profundidade linear, mas sim, de um dado comprimento de sondagem representativo, e da adição de um parâmetro onde sejam consideradas as características das descontinuidades.

Capítulo VI

Referências bibliográficas

(página propositadamente em branco)

6. Referências bibliográficas

Afonso, M. J., Chaminé, H. I., Gomes, A., Teixeira, J., Araújo, M. A., Fonseca, P. E., Carvalho, J. M., Marques, J. M., Marques da Silva, M. A. & Rocha, F., 2004. Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente, Santiago de Compostela, 4: 101-115.

Afonso, M.J. (2011). Hidrogeologia e hidrogeoquímica da região litoral urbana do Porto, entre Vila do Conde e Vila Nova de Gaia (NW de Portugal): implicações geoambientais. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. (Tese de Doutoramento).

Afonso, M.J., Chaminé, H.I., Moreira, P.F., Marques, J.M., 2010. The role of hydrogeotechnical mapping on the sustainable management of urban groundwater. In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorran T.J., Massey C.I. (eds.), Proceedings of the 11th Congressof the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active, CRC Press: Taylor & Francis Group, Auckland, pp. 595–1602.

Afonso, M.J., Freitas, L., Devy-Vareta, N., Teixeira, J., Fontes, G. & Chaminé, H.I., 2018. Cartografia subterrânea dos antigos mananciais de Paranhos e Salgueiros para o abastecimento de água à cidade do Porto (NW de Portugal): contexto e marcos históricos. In: R. Blanco Chao, F. Castillo, M. Costa-Casáis, J.H. García, M. Valcárcel-Díaz, (eds). Xeomorfoloxía e paisaxes xeográficas: Catro décadas de investigación e ensino. Homenaxe a Augusto Pérez Alberti. Universidade de Santiago de Compostela, p. 261-292.

Afonso, M.J., Freitas, L., Marques, J.M., Carreira, P.M., Pereira, A.J.S.C., Rocha, F., Chaminé, H.I., 2020. Urban Groundwater Processes and Anthropogenic Interactions (Porto Region, NW Portugal). Afonso MJ, Freitas L, Marques JM, Carreira PM, Pereira AJ, Rocha F, Chaminé HI (2020) Urban Groundwater Processes and Anthropogenic Interactions (Porto Region, NW Portugal). Water, 12:2797 [https://doi.org/10.3390/w12102797]

Afonso, M.J., Freitas, L., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F., Guimarães, L., Guilhermino, L., Mayer, B., Rocha, F., Marques, J.M., Chaminé, H.I., 2016. Environmental groundwater vulnerability assessment in urban water mines (Porto, NW Portugal). Water 8(11):499.

Almeida, A., 2006. Geology and urban landscape: the granite in Oporto, NW Portugal. European Geologist Journal, 21:4–8.

Araújo, M. A.; Gomes, A. A.; Chaminé, H. I.; Fonseca, P. E.; Gama Pereira, L. C. & Pinto de Jesus, A., 2003. Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto-Espinho, (NW de Portugal): implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozóica. Cadernos Lab. Xeol. Laxe. A Coruña, 28:79-105.

Bahia Junior, J. (1909). Contribuição para a hygiene do Porto: Analyse sanitaria do seu abastecimento em agua potavel. Porto: II - Mananciais do Campo Grande, Bispo e Freiras, Cavaca, Camões, Virtudes, Fontaínhas, Praça do Marquês de Pombal e Burgal: fontes suas derivadas de nascente privativa. Escola Médico-Cirúrgica do Porto. Typ. Encyclopedia Portugueza, Porto, 112 pp. (Dissertação inaugural) [https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/17030].

Barton N. & Bieniawski Z.T., 2008. RMR and Q-setting records straight. Tunnels and Tunnelling International, pp. 26-29.

Barton N.R., Lien R. & Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6(4): 189-239.

Barton, C.C. & Hsieh, P.A., 1989. Physical and hydrologic-flow properties of fractures. In: Field Guidebook T385, 28th International Geological Congress, American Geophysical Union, Washington D.C., 36 pp.

Barton, N. & Chouvey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 1-2:1-54.

Barton, N. & Quadros, E., 2015. Anisotropy is everywhere, to see, to measure and to model. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48:1323–1339.

Barton, N. & Quadros, E.F., 2002. Engineering and Hydraulics in Jointed Rock Masses. EUROCK 2002 – Course A, ISRM, Funchal.

Barton, N., Bandis, S. & Bakhtar, K., 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geom. Abstr. 22(2):121-140.

Barton, N., Loset, F., Lien, R. & Lunde, J., 1980. Application of Q-System in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. In: Bergman M., (ed.). Proceedings, Subsurface Space, ISRM International Symposium – Rockstore'80, Stockholm. Pergamon Press Ltd., 2:553-561.

Batu, V., 1998. Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis. Wiley-Interscience. 752 p.

Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier Publication Co., New York.

Begonha, A. & Sequeira Braga, M.A., 2002. Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. Catena, 49:57-76.

Begonha, A., 2001. Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto. Coleção monografias, FEUP Edições, Porto, 2:1-445. (Tese de doutoramento).

Bense, V.F., Gleesonb, T., Loveless, S.E., Bour, O. & Scibek J., 2013. Fault zone hydrogeology. Earth Science Reviews, 127:171–192.

Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. South Afr. Inst. Civ. Engrs, 15: 335-344.

Bieniawski, Z.T., 1976. Rock mass classification in rock engineering. In: Bieniawski Z.T., ed., Proceedings of the symposium Exploration for rock engineering, Cape Town, Balkema, 1: 97-106.

Bieniawski, Z.T., 1979. The geomechanics classification in rock engineering applications. Proceedings of the 4th Congress Int. Soc. Rock Mech., Montreux, 2: 41-48.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications. Wiley, New York. 251 pp.

Bourbon e Noronha, T., 1885. As aguas do Porto. Escola Médico-Cirúrgica do Porto. Typ. Occidental, Porto, 89 p. (Dissertação inaugural) [https://repositorioaberto.up.pt/handle/10216/16634].

Brady, B.H.G. & Brown, E.T., 2004. Rock mechanics for underground mining. 3rd Edition.

Butscher, C. (2012). Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. Tunneling and Underground Space Technology 32: 158-167.

Cahyadi, T.A., Widodo, L.E., Iskandar, I., Suyono, S., 2015. Modeling spatial distribution of 3d isotropic hydraulic conductivity based on HC-system for fractured groundwater flow media using neural network case study grasberg open pit of PTFI. In: Proceedings of the International Symposium on Earth Science and Technology, p. 59-64.

Cahyadi, T.A., Widodo, L.E., Syihab, Z., Notosiswoyo, S., & Widijanto, E., 2017. Hydraulic Conductivity Modeling of Fractured Rock at Grasberg Surface Mine, Papua-Indonesia. Journal of Engineering and Technological Sciences, 49:37-56.

Carríngton da Costa J., 1938. O porto: geografia-geologia. In: Bastos C. (org.). Nova Monografia do Porto, Companhia Portuguesa do Porto, pp. 3-32.

Carríngton da Costa, J. & Teixeira, C., 1957. Notícia explicativa da Carta Goelógica de Portugal, na escala de 1/50000, Folha 9-C (Porto): Serviçoes Geológicos de Portugal, Lisboa.

Carteado Mena, J., 1908. Contribuição para o estudo da Hygiene do Porto: analyse sanitária do seu abastecimento em água potável. III. Estudo sobre os poços do Porto. Laboratórios de Bacteriologia e Hygiene do Porto.Typographia da Encyclopedia Portugueza, Porto, 270 pp. (Relatório inédito)

Celada, B. & Bieniawski, Z.T., 2020. Ground characterisation and structural analyses for tunnel design. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.

CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, 1996. Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. National Research Council, National Academy Press, 568 p.

Chaminé H.I., Gaspar A.F., 1995. Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear: aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde. Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min., 37: 97-111.

Chaminé, H. I., Gama Pereira, L.C., Fonseca, P.E., Noronha, F. & Lemos de Sousa M. J., 2003. Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena, (Maciço Ibérico, W de Portugal). Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña, 28: 37-78.

Chaminé, H. I.; Afonso, M. J-; Robalo, P. M.; Rodriques, P.; Cortez, C.; Santos, F. M.; Plancha, J.P.; Fonseca, P.E., Gomes, A.; Devy-Vareta, N.F.; Marques, J.M.; Lopes, M.E.; Fontes, G; Pires, A. & Rocha F., 2010. Urban speleology applied to groundwater and geo-engineering studies: underground topographic surveying of the ancient Arca D'Água galleries catchworks (Porto, NW Portugal). International Journal of Speleology, 39(1): 1-14.

Chaminé, H.I., 2016. Técnicas de amostragem em estudos de maciços rochosos fracturados: importância na prática da geologia estrutural, geociências de engenharia e mecânica das rochas. In: Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Galiza, A.C. (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor – Uma Homenagem. Colecção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 297-343.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Freitas, L., 2014. From historical hydrogeological inventory through GIS mapping to problem solving in urban groundwater systems. European Geologist Journal, 38:33–39.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Ramos, L., Pinheiro, R., 2015. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects, IAEG, Springer, 6: 357-361.

Chaminé, H.I., Pinheiro, R., Meirinhos, J., Santa, C., Pereira, R., Silva, R.S., Moreira, P., Madureira, M.M., Martins, A., Fonseca, L., Ramos, L., 2016. Aplicativos informáticos para análise e avaliação de dados de campo em geociências de engenharia, geotecnia e hidrogeomecânica de maciços rochosos fracturados: MGC-RocDesign|Calc e GeoTech|CalcTools. In: Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Galiza, A.C. (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor – Uma Homenagem. Colecção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 345-377.

Chen, Y.F. & Zhou, C.B., 2011. Stress/strain-dependent properties of hydraulic conductivity for fractured rocks. In: Dikinya O (ed.) Developments in Hydraulic Conductivity Research, InTech, Rijeka, Croatia, pp. 3-48.

COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, SA, 2003. Notícia explicativa da Carta Geotécnica do Porto. 2ª edição, COBA/FCUP e Câmara Municipal do Porto, 230 pp. (+ anexos).

D'Andrade Junior, A., 1895. Breves apontamentos sobre aguas de poços do Porto. Escola Médico-Cirúrgica do Porto, Typografia Gandra, Porto, 65 pp. (Dissertação inaugural) [https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/18271].

Deere, D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology / Felsmechanik und Ingenieugeologie, 1(1): 16-22.

Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. & Cording, E.J., 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In: C. Fairhurst, (ed.). Failure and breakage of rock, proceeding 8th U. S. symposium rock mechanics. Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs., pp. 237-302.

Evans, J.P., Forster, C.B. & Goddard J.V., 1997. Permeability of fault-related rocks and implications for hydraulic structure of fault zones. Journal of Structural Geology, 19(11):1393-1404.

Fetter, C.W., 2014. Applied hydrogeology. 4th Edition, Pearson new international edition, London.

Fontes, A., 1908. Contribuição para a higiene do Porto: Analise Sanitária do seu abastecimento em água potável. I. Estudo dos Mananciais de Paranhos e Salgueiros. Escola Médico-Cirúrgica do Porto, Typ. Enciclopédia Portuguesa, Porto, 172 pp. (Dissertação inaugural) [https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/17066]

Freeze, A.R. & Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 604 p.

Freitas, L., Afonso, M.J., Devy-Vareta, N., Marques, J.M., Gomes, A., Chaminé, H.I., 2014. Coupling hydrotoponymy and GIS cartography: a case study of hydrohistorical issues in urban groundwater systems, Porto, NW Portugal. Geographical Research, 52(2):182–197.

Gates, W.C.B., 1995. The hydro-potential (HP) value: a proposed rock classification technique for evaluation of the groundwater potential in fractured bedrock. In: Abstracts from the 1st symposium on the hydrogeology of Washington State: Washington Department of Ecology, pp. 142.

Gates, W.C.B., 1997. The Hydro-Potential (HP) Value: A Rock Classification Technique for Evaluation of the Groundwater Potential in Bedrock. Environmental & Engineering Geoscience, 3(2), p. 251-267.

Gates, W.C.B., 2003. The Hydro-Potential (HP) Value: a rock classification technique for estimating seepage into excavations. In: Culligan P.J.; Einstein H.H. & Whittle A.J., eds, Proceedings, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1283-1290.

González de Vallejo, L.I. & Ferrer, M. (2011). Geological engineering. CRC Press, Taylor-Francis group, London.

GSE – Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28 (3): 207-242.

Gustafson, G., 2012. Hydrogeology for rock Engineers. BeFo and ISRM Edition, Stockholm, Sweden, 173 pp.

Hamm, S., Kim, M., Cheong, J., Kim, J., Son, M., Kim, T., 2007. Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite. Engineering Geology, 92: 73-87.

Harp, E.L. & Noble, M.A., 1993. An engineering rock classification to evaluate seismic rock-fall susceptibility and its application to the Wasatch front. Bulletin of the Engineering Geology and the Environment, 30(3): 293-319.

Hencher, S.R., 1987. The implications of joints and structures for slope stability. Slope Stability - Geotechnical Engineering and Geomorphology, John Wiley & Sons, New York, NY, p. 146 - 155.

Hoek, E., 2007. Practical rock engineering. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.

Hsu, S.-M., Chung, M.C., Ku, C.-Y., Tan, C.H. & Chi, S.-Y., 2008. A rock mass classification scheme for estimating hydraulic conductivity of fractured rocks. In: Alshawabkeh A.N., Reddy K.R., Khire M.V., (eds.). Proceedings of the selected sessions of GeoCongress 2008, New Orleans, Louisiana, ASCE Geotechnical Special Publication, 179: 452-459.

Hsu, S.-M., Lo, H.-C., Chi, S.-Y., & Ku, C.-Y., 2011. Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models. Dikinya O. (ed.), Developments in Hydraulic Conductivity Research, InTech, Rijeka, Croatia, pp. 133-158.

Huntley, D., Nommensen, R., & Steffey, D., 1992. The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifers. Ground water, 30(3): 396-402.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 15(6): 319-368.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1980. Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods. In: Brown E.T. (ed.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Pergamon Press, 211 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 18: 85-110.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1985. Suggested method for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 22: 51-60.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay R. & Hudson J.A. (eds.), suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2015. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. In: Ulusay R. (ed.), suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Springer, Cham, Heidelberg. 293 p.

Jembere, D. & Yihdego, Y., 2019. An empirical model to correlate rock mass classification and hydraulic conductivity, geotechnical engineering data acquisition and reduction perspective. In:

Proceedings of the Conference: Innovations in Geotechnical Construction & Design, The Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, p. 66-77.

Kirkaldie L., 1988. Rock classification systems for engineering purposes. American Society for Testing and Materials, STP 984, Ann Arbor, Michigan. 167 p.

Lee, C.H. & Farmer, I., 1993. Fluid flow in discontinuous rocks. Chapman & Hall, London, UK.

Lencastre, A., & Franco, F.M., 2003. Lições de Hidrologia. 3º Edição. Fundação Armando Lencastre, Caparica, Portugal, 451 p.

Logan, J., 1964. Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. Hydrogeology Journal, 8:177–187.

Louis, C. (1969). A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. Imperial College Rock Mechanics Research Report 10, Imperial College of London, UK.

Madureira, M.M.B., 2012. Geotecnia dos túneis do maciço de Paranhos: avaliação hidrogeomecânica exploratória. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 123 p. (Dissertação de Mestrado).

Martins, A.P., 2011. Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (setor de Carvalhido-Burgães): implicações para o modelo geomecânico comportamental. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 157 p. (Dissertação de Mestrado).

Mayer, J.M., Allen D.M., H.D., Gibson, H.D. & Mackie, D.C., 2014. Application of statistical approaches to analyze geological, geotechnical and hydrogeological data at a fractured-rock mine site in Northern Canada. Hydrogeology Journal, 22:1707–1723.

Meinzer, O. E., 1923. The occurrence of groundwater in the United States, with a discussion of principles. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 489.

Meirinhos, J.M.F., 2015. Hydrogeomechanics for rock engineering: coupling subsurface hydrogeomechanical assessment and hydrogeotechnical mapping on fractured rock masses. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 140 p. (Dissertação de Mestrado).

Moreira, P.F.S., 2009. Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos): implicações para o modelo geomecânico comportamental. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 141 pp. (Dissertação de Mestrado).

Moreira, P.F.S., 2012. Estudo geotécnico e geomecânico de uma galeria subterrânea em meio urbano. Relatório de estágio nº 8375. Ordem dos Engenheiros, Região Norte, Colégio de Engenharia Geológica e de Minas, 65 p. (Relatório Inédito).

NGI – Norwegian Geotechnical Institute, 2015. Using the Q-system: rock mass classification and support design. Handbook Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

Oliveira Ramos, L.A., 2000. História do Porto. 3ª edição, Porto Editora, 720 p.

Orr T.L.L. & Farrell, E.R., 1999. Geotechnical design to Eurocode 7. Springer, 161 p.

Palmström, A., 2005. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling Underground Space Technology, 20(4):362–377.

Palmström, A., Stille H., 2014. Rock engineering. 2nd revised edition. ICE, London.

Palmström, A., 1995. RMi: a rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo, 400 p. (Tese de Doutoramento).

Pinheiro, R., 2013. Classificações geomecânicas mineiras para o dimensionamento de maciços rochosos: o aplicativo MGC-RocDesign|Calc. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 186 pp. (Dissertação de Mestrado).

Priest, S.D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering. Kluwer Academic Publishers. 473 p.

Ribeiro, A.; Munhá, J.; Dias, R.; Mateus, A.; Pereira, E.; Ribeiro, L.; Fonseca, P.E.; Araújo, A.; Oliveira, J.T.; Romão, J.; Chaminé, H.I.; Coke, C. & Pedro J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. Tectonics, 26:TC6009.

Rosas da Silva, D.J., 1936. Granitos do Porto. Universidade do Porto, 63 p. (Relatório das provas de Agregação).

Sanchez-Moral S., Fernandez-Cortes A., Cuezva S., Cañaveras J.C., Correcher V., Miller A.Z., Dionisio A., Marques J.M., Saiz-Jimenez C., Afonso M.J., Chaminé H.I., Furio M. & Garcia-Guinea J., 2011. Uranyl groups coupled to evansite granite vein infills in the Porto undergrounds (NW Portugal). Spectroscopy Letters, 44:511–515.

Scesi, L. & Gattinoni, P., 2009. Water circulation in rocks. Springer, Dordrecht, 165 pp.

Serafim, J.L. & Pereira, J.P., 1983. Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. In: Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions, pp. 1133-1144.

Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P., 2010. Applied hydrogeology of fractured rocks. 2ª Edition (Revised edition). Springer, 429 p.

Spitz, K. & Moreno, J., 1996. A practical guide to groundwater and solute transport modeling, John Wiley, New York, 480 p.

Tang, Y., Yan, J., Yang, P., Zhou, J., & Zhou, N., 2017. Groundwater engineering. 2nd Edition. Springer, Shanghai, China, 420 p.

Widodo, L.E., Cahyadi, T.A., Notosiswoyo, S., & Widijanto, E., 2016. Application of clustering system to analyze geological, geotechnical and hydrogeological data base according to HC-System approach. In: Proceedings of the 9th Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS9, Bali, Indonesia. p. 1-9.

Younger, P.L., 2007. Groundwater in the Environment: an introduction. Blackwell Publishing, Oxford, United Kingdom, 318 p.