



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Geotecnia dos túneis do maciço de Paranhos: avaliação hidrogeomecânica exploratória

Marlene Marisa Batista Madureira



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Geotecnia dos túneis do maciço de Paranhos: avaliação
hidrogeomecânica exploratória**

Marlene Marisa Batista Madureira

1060886

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.

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques

Professor Auxiliar com Agregação, Instituto Superior Técnico

Doutora Maria José Coxito Afonso

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Maria Eugénia Oliveira Lopes

Assistente do 2º Triénio, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Dedico esta tese a meus pais...

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha gratidão para todos aqueles que contribuíram para a concretização desta dissertação, quer pelo apoio prestado como pelo incentivo e força demonstrados. Em particular, gostaria de agradecer:

- ❖ Ao meu orientador científico, Prof. Doutor Helder I. Chaminé (ISEP), pela boa disposição, pela disponibilidade, paciência e acompanhamento demonstrados nesta fase tão importante da minha vida académica e pelo contributo decisivo na realização desta investigação;
- ❖ À minha co-orientadora científica, Prof. Doutora Maria José Afonso (ISEP), pela supervisão, dedicação e apoio constantes nestes últimos meses e pela partilha do seu profundo conhecimento hidrogeológico dos subterrâneos do Porto;
- ❖ Ao Professor Helder I. Chaminé e à Professora Maria José Afonso, pela partilha da imensa documentação bibliográfica necessária à realização deste estudo, pela sinceridade e franqueza na supervisão desta dissertação e por serem exemplo e inspiração para recém-graduados;
- ❖ Aos colegas Engenheiros Ricardo Pereira e Rogério Pinheiro, pelo companheirismo, disponibilidade e importante ajuda na recolha e preparação das amostras e na realização do ensaio de resistência à carga pontual;
- ❖ À Mestre Liliana Freitas e ao Doutor José Teixeira (LABCARGA|ISEP) pelo contributo decisivo no apoio cartográfico e pela constante boa disposição;
- ❖ À equipa do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), pelo bom ambiente e excelentes condições de acolhimento proporcionados para o desenvolvimento sereno desta investigação;
- ❖ Ao Mestre André Martins, pela partilha de dados e informação incluídos na sua tese de mestrado;
- ❖ À direção do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e aos diretores dos Centros de Prestação de Serviços especializados do ISEP, Professor Helder I. Chaminé (Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada) e Professor José Augusto Fernandes (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção), por todas as facilidades na utilização dos recursos laboratoriais. Este trabalho enquadra-se no espírito do projecto GROUNDURBAN (POCI/CTE-GEX/59081/2004) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e apoio parcial do projecto HIDROURBAN – “Hidrogeologia, geomecânica e geoconservação de antigas minas de água: contribuição para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e peri-urbanas” no quadro do reequipamento do LABCARGA – IPP-ISEP|PADInv'2007/08;

- ❖ À minha família e amigos, que me apoiaram e deram força nesta jornada;
- ❖ Ao Daniel Santos, pelo carinho, paciência e compreensão;
- ❖ Ao meu Pai, que proporcionou a minha formação académica e sempre acreditou em mim;
- ❖ Aos meus Pais, que me ensinaram a lutar pelos meus objetivos e me fizeram a pessoa que sou hoje; um profundo *Obrigada!*

Palavras-chave

Maciços rochosos graníticos, Classificações geomecânicas (RMR, Q-system, GSI, HP-value), Zonamento hidrogeomecânico, Infiltrações de água subterrânea em túneis

Resumo

As classificações geomecânicas são uma das abordagens mais reconhecidas para estimar a qualidade do maciço rochoso, face à sua simplicidade e competência para gerir incertezas. As incertezas geológicas e geotécnicas podem ser avaliadas de forma eficaz usando classificações adequadas. Este estudo pretende enfatizar a importância das classificações geomecânicas e índices geomecânicos, tais como a *Rock Mass Rating (RMR)*, a *Rock Tunnelling Quality Index (Q-system)*, o *Geological Strength Index (GSI)* e o *Hydro-Potential (HP) Value*, para ajuizar a qualidade do maciço rochoso granítico das galerias subterrâneas de Paranhos (setor de Carvalhido - Burgães; área urbana do Porto). Em particular, o valor hidro-potencial (HP-value) é uma classificação semi-quantitativa aplicada a maciços rochosos que permite estimar as infiltrações de água subterrânea em escavações de terrenos rochosos. Para esta avaliação foi compilada e integrada uma extensa base de dados geológico-geotécnica e geomecânica, apoiada na técnica de amostragem linear de superfícies expostas descontinuidades. Para refinar o zonamento geotécnico do maciço rochoso granítico, previamente realizado em 2010, foram coletadas amostras de rocha em pontos-chave, com o objetivo de avaliar a sua resistência através do Ensaio de Carga Pontual (PLT). A aplicação das classificações geomecânicas foi realizada de uma forma equilibrada, estabelecendo diferentes cenários e tendo sempre em conta o conhecimento das características do maciço *in situ*. Apresenta-se uma proposta de zonamento hidrogeomecânico com o objetivo de compreender melhor a circulação geo-hidráulica do maciço rochoso granítico. Pretende-se com esta metodologia contribuir para aprofundar o conhecimento do substrato rochoso do Porto, nomeadamente no que diz respeito ao seu comportamento geomecânico.

Keywords

Granitic rock masses, Rockmass classifications (RMR, Q-system, GSI, HP-value), Hydrogeomechanical zoning, Groundwater seepage in tunnels.

Abstract

Rock mass classifications are one of the most established approaches to assess the quality of rockmass, because of their basic purpose of simplicity and ability to managing uncertainties. The geological and geotechnical uncertainties can be tackled effectively using proper classifications. This study intends to emphasize the importance of engineering rock mass classifications and geomechanical indexes, like Rock Mass Rating (RMR), Rock Tunnelling Quality Index (Q-system), Geological Strength Index (GSI) and Hydro-Potential (HP) Value, to assess the quality of the granitic rockmass of Paranhos galleries (Carvalhido – Burgães sector; Porto urban area). In particular, the HP-value is a rockmass classification semiquantitative technique employed to estimate groundwater seepage into excavations in bedrock. For this evaluation an extensive geological-geotechnical and geomechanical databases were developed. The field parameters were collected by the scanline sampling technique of free rockmass exposures. In order to improve the previous geotechnical zoning of the granitic rock mass, rock samples were collected in key targets, aiming to evaluate their strength with laboratory Point Load testing procedures. The application of geomechanical classifications was done in a very balanced way establishing different scenarios and always in relationship with the in situ rock mass features. A proposal of a hydrogeomechanical zoning is presented to achieve a better understanding of the granitic rockmass geohydraulic circulation. This approach proved to be valuable in deepening our knowledge of Porto bedrock, namely its hydrogeomechanical behavior.

Índice

1. Introdução geral	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos	4
2. Classificações geomecânicas de maciços rochosos: uma síntese.....	7
2.1. Compartimentação do maciço rochoso: descrição, parâmetros e zonamento geotécnico..	7
2.2. Métodos e técnicas “in situ” e laboratoriais	12
2.3. Classificações geomecânicas: breve revisão	25
2.3.1. Introdução geral	25
2.3.2. Rock Mass Rating (RMR).....	32
2.3.3. Rock Tunnelling Quality Index (Q-system).....	40
2.3.3.1. Correlação RMR – Q.....	49
2.3.4. Geological Strength Index (GSI).....	52
2.3.5. Hydro-Potential (HP) Value	55
2.3.6. Zonamento Geomecânico	58
3. Geotecnia e hidrogeomecânica do maciço subterrâneo de Paranhos: avaliação exploratória	63
3.1. Enquadramento regional	63
3.2. O Manancial de Paranhos no abastecimento de água à cidade do Porto	65
3.3. Geologia e geotecnia subterrânea de Paranhos.....	65
3.4. Zonamento geotécnico revisitado	67
3.4.1. Avaliação da resistência do material rochoso: ensaios PLT e UCS	67
3.4.2. Zonamento geotécnico revisitado	74
3.5. Avaliação geomecânica: apresentação e discussão	84
3.5.1. Rock Mass Rating (RMR).....	85
3.5.2. Q – System	89
3.5.3. Geological Strength Index (GSI)	94
3.5.4. Hydro-Potential Value (HP)	97
3.5.5. Análise comparativa de resultados.....	99
3.6. Zonamento geomecânico: uma proposta	101
3.7. Avaliação hidrogeomecânica: uma proposta	103
4. Conclusões:	109
5.Referências bibliográficas.....	113

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema do dispositivo para levantamento de descontinuidades pela técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço rochoso (adaptado de Singhal & Gupta, 2010). D – distância à origem da fita graduada (“scanline”); L – semi-comprimento exposto.	14
Figura 2. Ficha tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com aplicação da técnica de amostragem linear.	14
Figura 3. Exemplo de aplicação das bases de dados ScanGeoData BGD para maciços rochosos fraturados (adaptado de Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011).....	15
Figura 4. Exemplificação da aplicação do martelo Classic Schmidt, tipo L (rocha), da Proceq® (pormenores em http://www.proceq.com/).	16
Figura 5. Exemplo de uma ficha tipo de campo para o ensaio esclerométrico.....	17
Figura 6.Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão simples a partir da resistência de Schmidt (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	17
Figura 7. Ficha tipo para o registo dos dados necessários ao cálculo da resistência à carga pontual.	19
Figura 8. Equipamento para a execução do ensaio de carga pontual (PLT) e colocação do provete entre as duas ponteiras cónicas do equipamento (cortesia do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção, LGMC ISEP).	19
Figura 9. Exemplificação da tipologia dos ensaios PLT (adaptado da ISRM, 1985): a) Ensaio diametral em provetes, $L > 0,5 D$, cilíndricos; b) Ensaio axial em provetes cilíndricos.....	20
Figura 10. Relação de dimensões dos provetes (amostras regulares e irregulares) a satisfazer nos ensaios de carga pontual (adaptado da ISRM 1985).	21
Figura 11. Gráfico para o cálculo de $I_{s(50)}$ (adaptado da ISRM, 1985).....	22
Figura 12. Determinação do fator de correção F (adaptado da ISRM, 1985).....	23
Figura 13. Gráfico de correlação entre o índice de resistência à carga pontual (PLT) e a resistência à compressão uniaxial (C_o , UCS), (adaptado de ISRM, 1985).	24
Figura 14. Classificação empírica de estabilidade desenvolvida para túneis na África do Sul (adaptado de Hoek & Brown, 1980)	25
Figura 15. Exemplos de instabilidade em túneis e rotura frágil do material (assinalada em tons acinzentados) em função do grau de fracturação (RMR) e do estado de tensão, adaptado de Hoek & Brown (1980).....	28
Figura 16. Esquematisação da importância do sentido da escavação e a orientação das descontinuidades dominantes (adaptado de Hoek, 2007).....	28
Figura 17. Ilustração dos principais aspectos geológico-geotécnicos a ter em conta no estudo de um dado maciço rochoso para efeitos de uma escavação subterrânea (adaptado de Barton, 2007).	31
Figura 18. Representação gráfica da obtenção do valor de RMR (adaptado de Miranda et al., 2006).	32
Figura 19. Exemplificação do contraste entre duas caixas de sondagens que sugerem a ordem de magnitude da diferença do índice de qualidade da rocha (RQD), segundo Barton (2007).	33
Figura 20. Ábaco para a determinação da variação do RQD com o espaçamento médio das descontinuidades, através do RQD teórico (RQDt) para uma série de intervalos do valor limiar t (TRQDt – “theoretical RQD for a general threshold value t ”), adaptado de Priest & Hudson (1976) e de Priest (1993).	34
Figura 21. Módulo de deformabilidade (E_M) versus valores de RMR e de Q (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).....	39
Figura 22. Ábaco do tempo de auto-suporte (horas) versus RMR, baseado em casos históricos segundo Bieniawski (1989). A conversão de RMR em Q segundo Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).....	40
Figura 23. Representação gráfica da obtenção do valor de Q-system (adaptado de Miranda et al., 2006)...	41
Figura 24. Visão de conjunto dos parâmetros que são considerados no Q-system (adaptado de Barton, 2007).....	41
Figura 25. Ábaco para determinação do Q-system e da categoria do suporte (adaptado de Barton et al., 1974; Barton, 2000; Grimstad & Barton, 1993).	48
Figura 26. Ábaco com correlações do Q-system com o RMR, baseado nas propostas de Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).	51
Figura 27.Ábaco para estimativa do GSI baseado na inspeção das condições geológicas (Marinos & Hoek, 2000; Marinos & Hoek, 2001), cuja versão sofreu atualizações em termos de quantificação da compartimentação (parâmetros F, J_c , V_b) propostas por Cai et al. (2004). Para pormenores sobre a aplicação dos parâmetros anteriores consultar Cai et al. (2004) ou Singh & Goel (2011).	54

Figura 28. Esboço geológico regional da área urbana do Porto e envolvente (adaptado de Chaminé et al., 2003 e de Afonso, 2011).	63
Figura 29. Traçado da galeria do manancial de Paranhos (Túnel 2) e envolvente, com a referência das três secções estudadas (imagem aérea: Google Earth Pro), adaptada de Martins (2011).	67
Figura 30. Ilustração de aspetos de campo durante a recolha de amostragem da rocha granítica para os ensaios laboratoriais.	68
Figura 31. Resistência média à compressão uniaxial segundo o ensaio esclerométrico laboratorial para as amostras ensaiadas.	70
Figura 32. Ilustração das várias etapas para a realização do ensaio de carga pontual (PLT), desde a preparação e corte dos provetes até à realização do ensaio.	70
Figura 33. Resistência média à compressão uniaxial (UCS') segundo o ensaio de carga pontual para as amostras ensaiadas.	73
Figura 34. Resistência média à compressão uniaxial de acordo com os ensaios esclerométrico e PLT para as amostras ensaiadas.	73
Figura 35. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), revisto de Martins (2011).	76
Figura 36: Aspeto do maciço rochoso no setor 1 da galeria Carvalhido-Burgães.	76
Figura 37. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), revisto de Martins (2011).	79
Figura 38: Aspeto do maciço rochoso no setor 2 da galeria Carvalhido-Burgães.	79
Figura 39. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), revisto de Martins (2011).	82
Figura 40: Aspeto do maciço rochoso no setor 3 da galeria Carvalhido-Burgães.	82
Figura 41. Representação do GSI para os setores 1, 2 e 3 no ábaco de Hoek & Marinos (2000), com atualizações de Cai et al. (2004).	96
Figura 42. Proposta do zonamento geomecânico e hidrogeomecânico para o Setor 1.	104
Figura 43. Proposta do zonamento geomecânico e hidrogeomecânico para o Setor 2.	105
Figura 44. Proposta do zonamento geomecânico e hidrogeomecânico para o Setor 3.	106

Índice de Quadros

Quadro 1. Classificação de maciços rochosos quanto ao número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).....	8
Quadro 2. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice Jv (ISRM, 1978).....	9
Quadro 3. Caracterização da qualidade da rocha mediante o valor de RQD obtido (Deere et al., 1967).....	10
Quadro 4. Classificação do grau de alteração do maciço rochoso segundo a ISRM (1981).....	11
Quadro 5. Tipos de descontinuidades (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).....	12
Quadro 6. Principais parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981, 2007; GSE, 1995; Brady & Brown, 2004; Scesi & Gattinoni, 2009; Palmström, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011).....	13
Quadro 7. Classificação da resistência à compressão simples do maciço (ISRM, 1981).....	18
Quadro 8. Grau de qualidade da rocha (R0 a R6) correlacionada com a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual $I_{s(50)}$ (adaptado de ISRM 1978, 1981, 1985).....	24
Quadro 9. Descrição e pesos atribuídos ao RQD para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	33
Quadro 10. Descrição e pesos atribuídos à resistência para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	34
Quadro 11. Descrição e pesos atribuídos ao espaçamento das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	35
Quadro 12. Descrição e pesos atribuídos às condições das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	35
Quadro 13. Orientações para a classificação pormenorizada das condições geológico-geotécnicas das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	36
Quadro 14. Descrição e pesos atribuídos às condições de percolação de água para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	36
Quadro 15. Descrição da orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	37
Quadro 16. Pesos atribuídos à orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	37
Quadro 17. Classes do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais e tipos de escavação e sugestão das condições de suporte associados (adaptado de Bieniawski, 1989).....	38
Quadro 18. Parâmetros de projeto e propriedades do maciço rochoso (adaptado de Bieniawski, 1993).....	38
Quadro 19. Índice de qualidade da rocha, RQD (adaptado de Deere et al., 1967 e de Barton et al., 1974).....	42
Quadro 20. Número de famílias de descontinuidades, J_n (adaptado de Barton et al., 1974).....	43
Quadro 21. Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r (adaptado de Barton et al., 1974).....	43
Quadro 22. Índice de alteração das descontinuidades, J_a (adaptado de Barton et al., 1974).....	44
Quadro 23. Fator de redução do caudal, J_w (adaptado de Barton et al., 1974).....	44
Quadro 24. Síntese complementar dos parâmetros J_r e J_a estão claramente relacionadas com o comportamento da rocha (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).....	45
Quadro 25. Estado de tensão do maciço, SRF (adaptado de Barton et al., 1974).....	46
Quadro 26. Tipos de escavação e valores de ESR – “Excavation Support Ratio” (adaptado de Barton et al., 1974).....	47
Quadro 27. Valor de ESR a considerar para túneis TBM (Barton, 2006; Hoek, 2007). Para o caso dos túneis de tráfego dever-se-á utilizar o valor 0,5 no caso de túneis longos destinados a comboios de alta velocidade e de tráfego automóvel.....	47
Quadro 28. Cálculo do comprimento de pregagens e ancoragens a partir de B, ESR e H (adaptado de Barton et al., 1974).....	49
Quadro 29. Exemplos de correlações entre Q-system e RMR estabelecidas por diferentes autores.....	50
Quadro 30. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek, 1994, 2007).....	53
Quadro 31. Descrição e pesos para o parâmetro J_{af} (adaptado de Hencher, 1987; Harp & Noble, 1993; Gates, 1997, 2003).....	56
Quadro 32. Descrição e pesos para o parâmetro J_k (adaptado de Freeze & Cherry, 1979; Gates, 1997, 2003).....	57
Quadro 33. Descrição e pesos do parâmetro J_w (adaptado de Barton et al., 1974; Hencher, 1987; Gates, 1997).....	58

Quadro 34. Síntese de aspetos geológicos e geotécnicos básicos, bem como informações sobre a localização dos pontos de amostragem para os ensaios PLT.	68
Quadro 35. Síntese dos ensaios esclerométricos (martelo de Schmidt, tipo L) nos provetes das amostras rochosas.	69
Quadro 36. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT1 (setor 3).....	71
Quadro 37. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT2 (setor 2).....	71
Quadro 38. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT3 (setor 2).....	72
Quadro 39. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT4 (setor 1).....	72
Quadro 40. Síntese dos resultados obtidos da resistência nas superfícies das descontinuidades (“in situ”) e na matriz rochosa dos quatro pontos de amostragem.	74
Quadro 41. Descrição geral das zonas geotécnicas revisitadas do Setor 1 da galeria Carvalho – Burgães ..	75
Quadro 42. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Setor 1 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto), segundo Martins (2011).	77
Quadro 43. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 2 da galeria Carvalho–Burgães ..	78
Quadro 44. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Setor 2 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto), segundo Martins (2011).	80
Quadro 45. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 3 da galeria Carvalho – Burgães.	81
Quadro 46. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Setor 3 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto), segundo Martins (2011).	83
Quadro 47. Síntese da abordagem considerada na elaboração dos dois cenários das classificações geomecânicas.	85
Quadro 48. Aplicação da classificação geomecânica RMR ao Setor 1.	86
Quadro 49. Aplicação da classificação geomecânica RMR ao Setor 2.	87
Quadro 50. Aplicação da classificação geomecânica RMR ao Setor 3.	88
Quadro 51. Resultados finais obtidos pela aplicação da classificação RMR e intervalos classificativos para cada zona geotécnica.	89
Quadro 52. Aplicação da classificação geomecânica Q ao Setor 1.	90
Quadro 53. Aplicação da classificação geomecânica Q ao Setor 2.	91
Quadro 54. Aplicação da classificação geomecânica Q ao Setor 3.	92
Quadro 55. Resultados da aplicação da classificação Q e intervalos classificativos para cada zona geotécnica.	93
Quadro 56. Intervalos de RMR, Q e de RMR recalculados de acordo com as propostas de Bieniawski (1989) e Barton (1995).	94
Quadro 57. Intervalos classificativos de GSI para cada zona geotécnica (ZG) para a área de estudo, baseados na correlação numérica com o RMR.	95
Quadro 58. Síntese das características das Zonas Geotécnicas (ZG) nos setores de estudo e valor do GSI.	95
Quadro 59. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Setor 1.	97
Quadro 60. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Setor 2.	98
Quadro 61. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Setor 3.	98
Quadro 62. Síntese dos valores obtidos nas 4 classificações para o Setor 1.	99
Quadro 63. Síntese dos valores obtidos nas 4 classificações para o Setor 2.	100
Quadro 64. Síntese dos valores obtidos nas 4 classificações para o Setor 3.	100
Quadro 65. Proposta do zonamento geomecânico do Setor 1.	101
Quadro 66. Proposta do zonamento geomecânico do Setor 2.	102
Quadro 67. Proposta do zonamento geomecânico do Setor 3.	102
Quadro 68. Zonamento hidrogeomecânico do Setor 1.	103
Quadro 69. Zonamento hidrogeomecânico do Setor 2.	105
Quadro 70. Zonamento geomecânico do Setor 3.	106

Índice de Fórmulas

[1] Rock quality designation	9
[2] Rock quality designation a partir de J_v , com base na proposta de Palmstrom	9
[3] Rock quality designation a partir da frequência das descontinuidades	9
[4] Menor dimensão dos provetes (W)	21
[5] Resistência à carga pontual I_s	22
[6] Resistência à carga pontual corrigida $I_{s(50)}$	22
[7] Resistência à carga pontual corrigida em função do diâmetro equivalente	22
[8] Diâmetro equivalente	23
[9] Expressão que traduz o Rock Mass Rating	37
[10] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha intacta de acordo com Nicholson & Bieniawski (1990)	39
[11] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha proposta por Serafim & Pereira (1983)	39
[12] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha proposta por Bieniawski (1989)	39
[13] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha proposta por Hoek & Brown (1997)	39
[14] Expressão que traduz o Rock Tunneling Quality Index	42
[15] Dimensão equivalente da escavação	47
[16] Vão livre a partir do ESR	48
[17] Correlação empírica entre Q e modulo de deformabilidade segundo Barton et al. (1980) e Barton & Quadros (2002)	49
[18] Correlação empírica entre Q e modulo de deformabilidade segundo Barton et al. (1980) e Barton & Quadros (2002)	49
[19] Critério de Hoek & Brown (1980)	52
[20] Critério generalizado de Hoek & Brown (1980)	53
[21] Relação entre GSI e RMR de acordo com Hoek (1990)	53
[22] Expressão que traduz uma variante do valor de Q	53
[23] Expressão que traduz o Geological Strength Index	54
[24] Expressão que traduz HP value	54
[25] Expressão que traduz o potencial geo-hidráulico do maciço	58

Introdução geral

1. Introdução geral

1.1. Enquadramento

A presente dissertação insere-se na Unidade Curricular “Dissertação/Estágio/Projeto” do 2º ano do curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Politécnico do Porto.

Esta tese enquadra-se no espírito do projeto *GROUNDURBAN – “Urban groundwater and environmental management in the Northwest Portugal”* (POCI/CTE-GEX/59081/2004), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, integrado na linha de investigação de Recursos Hídricos Subterrâneos da área metropolitana do Porto e em desenvolvimento no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), em parceria com o Centro GeoBioTec (Grupo de Georrecursos, Geotecnia e Geomateriais) da Universidade de Aveiro e do Centro de Petrologia e Geoquímica (CEPGIST) do Instituto Superior Técnico e, ainda, no quadro de apoio de reequipamento científico LABCARGA-IPP/ISEP|PAD’2007/08 através do projeto *HYDROURBAN* (“Hidrogeologia, geomecânica e geoconservação de antigas minas de água: contribuição para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e peri-urbanas”). Esta dissertação de mestrado complementa o estudo de Moreira (2009) e integra os estudos prévios de Fernandes (2005), de Martins (2011) e de Afonso (2011), enquadrando-se, igualmente, nos trabalhos de investigação desenvolvidos nesta área pelo LABCARGA|ISEP.

O estudo envolveu, numa primeira fase, a realização do trabalho de campo, no qual se procedeu à recolha de amostra de material-rocha granítico para a realização laboratorial do ensaio de carga pontual (PLT). Numa segunda etapa, foi refinado o zonamento geológico-geotécnico realizado por Martins (2011). Por fim, procedeu-se à aplicação dos índices geomecânicos e classificações geomecânicas tais como a RMR (Rock Mass Rating), o *Q-system* (Rock Mass Quality Index), o GSI (Geological Strength Index) e o HP (Hydro-Potential Value), com o objetivo de avaliar a qualidade geomecânica e hidrogeomecânica do maciço rochoso de Paranhos. Na recolha dos parâmetros geológico-geotécnicos (BGD – Basic Geotechnical Description of Rock Masses) recorreu-se à ISRM (1981) e aos ensaios laboratoriais de carga pontual (PLT – Point Load Test) à ISRM (1985).

Nas campanhas de terreno e nos ensaios laboratoriais tive o apoio incondicional dos colegas do curso de mestrado, Eng. Ricardo Pereira e Eng. Rogério Pinheiro, sob coordenação dos orientadores Professor Helder I. Chaminé e Professora Maria José Afonso.

1.2. Objetivos

A presente dissertação visa fundamentalmente caracterizar em pormenor o maciço rochoso granítico do setor Carvalhido-Burgães dos túneis de Paranhos do ponto de vista da geomecânica de maciços. Assim, foram aplicados os principais métodos classificativos em maciços rochosos fraturados de forma a estabelecer-se uma avaliação geomecânica, bem como uma avaliação exploratória hidrogeomecânica recorrendo-se ao zonamento com o índice HP. Desta forma, pretendeu-se ainda, contribuir para um conhecimento mais apurado dos subterrâneos da cidade do Porto e para a caracterização da compartimentação de maciços rochosos fraturados, em termos da sua qualidade geotécnica, geomecânica e geo-hidráulica subterrânea.

Assim, apresentam-se como principais objetivos desta tese, os seguintes:

- Refinamento do zonamento geotécnico do maciço rochoso granítico do setor em estudo, através da integração de resultados do ensaio de resistência à carga pontual (PLT) no material-rocha das zonas geotécnicas em que o grau de alteração varia entre W_2 a W_3 . Proposta de um zonamento geotécnico revisitado da investigação prévia de Martins (2011);
- Avaliação geotécnica-geomecânica do maciço rochoso granítico, através da aplicação de índices geológico-geomecânicos (GSI) e de classificações geomecânicas (RMR, Q-system) e hidrogeomecânicas (HP);
- Proposta de um zonamento geomecânico (baseado essencialmente na integração dos parâmetros estimados, na matriz rochosa e nas superfícies de descontinuidades, do maciço rochoso: resistência à compressão uniaxial, UCS e resistência à carga pontual, PLT; tendo em linha de conta o grau de alteração e o grau de fracturação) e uma proposta exploratória do zonamento hidrogeomecânico (baseado na síntese dos parâmetros hidrogeomecânicos e hidrogeológicos);
- Tentativa de estabelecimento de uma comparação preliminar das características geológico-geotécnicas, geomecânicas e hidrogeotécnicas do presente estudo com o setor homólogo, de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Moreira 2009, Afonso 2011).

Classificações geomecânicas de maciços
rochosos: uma síntese

2. Classificações geomecânicas de maciços rochosos: uma síntese

2.1. Compartimentação do maciço rochoso: descrição, parâmetros e zonamento geotécnico

O maciço rochoso engloba os blocos de rocha intacta e as descontinuidades que os definem, sendo geralmente considerado anisotrópico, descontínuo e heterogêneo (e.g., Peres-Rodrigues, 1977; Barton, 1986; Cunha & Muralha, 1990; Hoek, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A heterogeneidade do maciço é suportada pela existência de diferentes litologias, distintos graus de alteração e de fracturação e tipos de percolação de água, que levam a um diferente comportamento mecânico. A anisotropia de um dado maciço deve-se, fundamentalmente, às feições geológicas, aos sistemas de descontinuidades e às condições geo-hidráulicas que modificam as propriedades mecânicas das rochas (e.g., Terzaghi, 1946; Hoek, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011). Assim, a caracterização petrofísica da matriz rochosa e geológico-estrutural da rede de descontinuidades (s.l.) é fundamental para a avaliação do comportamento geomecânico dos maciços rochosos (Barton, 1976, 1986; Hudson & Cosgrove, 1997). As descontinuidades têm um papel determinante, não só em termos geológico-estruturais, mas também porque constituem os principais veículos de circulação da água subterrânea (e.g., Scesi & Gattinoni, 2009).

✓ **Parâmetros de caracterização do maciço rochoso**

Para a caracterização global de um maciço rochoso a partir dos dados obtidos no estudo dos afloramentos, juntamente com a descrição petrofísica da matriz rochosa e das descontinuidades, devem ser considerados outros aspetos representativos do conjunto, tais como:

- Número e orientação das famílias de descontinuidades
- Dimensão do bloco unitário e intensidade da fracturação
- Índice de qualidade da rocha (“*Rock Quality Designation*”, RQD)
- Grau de alteração

É de extrema importância a correta quantificação destes parâmetros, possibilitando uma eficaz análise da compartimentação e da análise da estabilidade estrutural do maciço.

➤ Número e orientação das famílias de descontinuidades

Consoante a atitude geológica apresentada pelas superfícies das descontinuidades do maciço, é possível associar-las em famílias. As descontinuidades são agrupadas em famílias de acordo com a sua orientação. Podem existir várias famílias num maciço, sendo que normalmente uma é considerada como a família principal ou dominante.

O comportamento mecânico das rochas é dominado pelo número de famílias de descontinuidades que a intersejam. É desejável que sejam cartografadas entre 150 a 200 descontinuidades que posteriormente serão tratadas através de técnicas de projeção estereográfica (diagramas de rosetas e diagramas de contorno estrutural), de forma a apurar a orientação média de cada família e uma análise geológico estrutural global (ISRM, 1981).

A classificação dos maciços rochosos de acordo com o número de famílias de descontinuidades é apresentada no Quadro 1:

Quadro 1. Classificação de maciços rochosos quanto ao número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).

<u>Tipo de maciço rochoso</u>	<u>Número de famílias de descontinuidades</u>
I	Maciço compacto com a presença de descontinuidades ocasionais aleatórias
II	Uma família de descontinuidades
III	Uma família e presença de descontinuidades aleatórias
IV	Duas famílias de descontinuidades
V	Duas famílias e presença de descontinuidades aleatórias
VI	Três famílias de descontinuidades
VII	Três famílias e presença de descontinuidades aleatórias
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades
IX	Maciço de rocha muito esmagada, com o aspeto idêntico ao de um solo.

➤ Tamanho do bloco unitário e intensidade de fracturação

O tamanho do bloco é um indicador importante do comportamento do maciço rochoso em termos de resistência e deformação. Um maciço de melhor qualidade apresenta blocos de maiores dimensões e bem definidos, enquanto no caso de maciços alterados e de má qualidade, os blocos são de pequenas dimensões e irregulares.

O tamanho do bloco unitário é determinado pelo número de famílias de descontinuidades, pelo espaçamento entre descontinuidades e pela sua persistência. A sua forma é função da

orientação das mesmas, podendo variar entre formas cúbicas, romboédricas, tetraédricas, etc. (ISRM, 1981).

É possível classificar o tamanho do bloco com base no índice volumétrico, J_v , o qual representa o número total de descontinuidades que intersejam uma unidade de volume (1m^3) do maciço rochoso, conforme o Quadro 2 (ISRM, 1981). Este índice é usualmente utilizado em estudos de maciços rochosos para rocha ornamental (Dinis da Gama, 1995).

Quadro 2. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice J_v (ISRM, 1978).

<u>Descrição</u>	<u>J_v (descontinuidades/m^3)</u>
Blocos muito grandes	< 1
Blocos grandes	1-3
Blocos médios	3-10
Blocos pequenos	10-30
Blocos muito pequenos	> 30

➤ Rock Quality Designation

O RQD (“*Rock Quality Designation*”) é um índice que expressa o grau de qualidade do maciço a partir de testemunhos de sondagem, em função da sua intensidade de fracturação (e.g., Deere, 1963; Deere et al., 1967; Deere & Deere, 1988), sem considerar variáveis como a orientação, o espaçamento, o preenchimento e outras condições das descontinuidades. A obtenção deste parâmetro realiza-se através da expressão [1]:

$$RQD = \frac{\sum \text{fragmentos com comprimento} > 10\text{cm}}{\text{Comprimento total do testemunho}} * 100 \quad [1]$$

O índice RQD pode estimar-se em afloramentos a partir de correlações empíricas, tais como a proposta por Palmström (1975):

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3,3 * J_v && \text{para } J_v > 4,5 \\ RQD &= 100 && \text{para } J_v \leq 4,5 \end{aligned} \quad [2]$$

Existe também a possibilidade de obter este índice através do parâmetro λ , frequência das descontinuidades, mediante a expressão [3], que expressa o valor teórico mínimo do RQD:

$$RQD \approx 100^{(-0.1*\lambda)} * (0.1 * \lambda + 1) \quad [3]$$

onde, λ é a inversa do espaçamento médio das descontinuidades.

Segundo a proposta de Deere (1963) e atualizações em Deere et al. (1967) e Deere & Deere (1988), a qualidade da rocha pode ser avaliada da seguinte forma (Quadro 3):

Quadro 3. Caracterização da qualidade da rocha mediante o valor de RQD obtido (Deere et al., 1967).

<u>RQD (%)</u>	<u>Qualidade da rocha</u>
< 25	Muito fraca
25-50	Fraca
50-75	Razoável
75-90	Boa
> 90	Excelente

➤ Grau de alteração

A alteração implica a deterioração e mudança da condição original da rocha como resultado de processos externos, como a desintegração física, a alteração química e a atividade biológica (Bell, 2007; Price, 2009). Este conjunto de ações enfraquece a rocha, tornando-a mais friável, o que resulta numa decomposição parcial ou total da mesma. A presença de descontinuidades no maciço, favorece o acesso dos agentes de alteração à massa rochosa, sendo que os primeiros efeitos da alteração podem ser notados ao longo das superfícies destes planos intermitentes (Bell, 2007).

O grau de alteração de um determinado maciço depende não só dos agentes de alteração, mas também das características petrofísicas da matriz rochosa, que por sua vez é condicionada pela sua composição mineralógica, textura, porosidade, resistência e grau de fracturação (Bell, 2007). Geotecnicamente, esta característica afeta diretamente as propriedades mecânicas do material rocha, e o ângulo de atrito das superfícies rochosas.

O reconhecimento deste estado é realizado por observação e inspeção direta do maciço e pode variar consoante a experiência do observador. Existem alguns aspetos macroscópicos que podem ser observados na rocha e associados à alteração da mesma:

- Alteração da cor original dos minerais e do aspeto geral da rocha (descoloração ou oxidação)
- Presença de minerais secundários (e.g., argila, óxidos, carbonatos, sílica amorfa)
- Perda de coesão ou do imbricamento dos grãos
- Lixiviação do cimento original

- Aumento da porosidade e do microfissuramento
- Diminuição e dureza dos minerais

Praticamente, pode-se proceder à fragmentação de uma porção de rocha e mediante a sua facilidade em partir torna-se exequível a sua avaliação.

De acordo com a ISRM (1981) é possível classificar o grau de alteração seguindo os pressupostos apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Classificação do grau de alteração do maciço rochoso segundo a ISRM (1981).

<u>Nomenclatura</u>	<u>Estado da rocha</u>	<u>Descrição</u>
W₁	Sã ou não alterada	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa
W₂	Ligeiramente alterada	Mudanças na cor original de matriz rochosa junto às superfícies de descontinuidade (descoloração)
W₃	Moderadamente alterada	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original
W₄	Muito alterada	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável
W₅	Completamente alterada	Praticamente todo o material está muito decomposto ou é um solo residual

A *Geological Society Engineering* (GSE, 1995) considera ainda um termo **W₆**, referindo-se a um material completamente decomposto e/ou desagregado (i.e., solo residual).

✓ **Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades**

Uma descontinuidade é um plano de origem geológica ou mecânica que separa ou isola blocos de rocha intacta no maciço rochoso (González de Vallejo & Ferrer, 2011). O estudo das descontinuidades presentes no maciço refere que os planos de fraqueza pré-existentes controlam processos de deformação e de fracturação no maciço rochoso a profundidades consideráveis (e.g., Barton et al., 1985; Barton, 1986; Hoek, 2007; Price, 2009; González de Vallejo & Ferrer, 2011). É por isso de grande importância o seu correto reconhecimento e cartografia. É possível reconhecer os seguintes tipos de descontinuidades (Quadro 5):

Quadro 5. Tipos de descontinuidades (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

<u>Descontinuidades</u>	<u>Sistemáticas</u>	<u>Singulares</u>
Planares	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Planos de estratificação ✓ Planos de laminação ✓ Planos de xistosidade ✓ Diaclases e fissuras 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Falhas ✓ Filões ✓ Discordâncias
Lineares	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Interseção de descontinuidades planares ✓ Lineações 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Eixos de dobras

As descontinuidades condicionam largamente o comportamento de um maciço rochoso, desempenhando um papel fundamental na sua avaliação (Barton & Choubey, 1977). É indispensável o seu estudo aprofundado e minucioso, assim como de todas as características geológico-geotécnicas por elas influenciadas, para que seja realizada correta caracterização do maciço. Os principais parâmetros que caracterizam as descontinuidades são sintetizados no Quadro 6.

2.2. Métodos e técnicas “in situ” e laboratoriais

Para a aquisição de alguns dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos anteriormente mencionados, existe a necessidade de recorrer a técnicas e métodos especializados, com vista a que o levantamento da informação necessária seja realizado da forma mais correta e sistemática.

Técnica de amostragem linear

A técnica de amostragem linear (*Scanline Sampling Technique*) pressupõe a utilização de uma fita graduada em superfícies expostas do maciço rochoso, procedendo-se ao levantamento sistemático de todos os parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades que a intersectam (Figura 1) (e.g., Priest & Hudson, 1981; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Chaminé & Gaspar, 1995; Dinis da Gama, 1995; Peacock et al., 2003; Galiza et al., 2011). Esta técnica facilita a identificação das descontinuidades, permitindo que o estudo da compartimentação do maciço seja mais exato e realista.

Quadro 6. Principais parâmetros geológico-geotécnicos das discontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981, 2007; GSE, 1995; Brady & Brown, 2004; Scesi & Gattinoni, 2009; Palmström, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Parâmetro	Breve descrição	Equipamento e/ou Processo de avaliação	Representação e/ou Classificação	Esquema																		
Atitude geológica	A atitude geológica engloba a direção e a inclinação de uma descontinuidade. A direção é o ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético; a inclinação é o ângulo que a reta de maior declive do plano (perpendicular à direção) define com o plano horizontal.	O equipamento com o qual se regista a atitude é a bússola de Geólogo (com clínoestro).	Uma das formas de representar a atitude é: N65ºE: 48ºNW, sendo N65ºE a direção e 48ºNW a inclinação.																			
Grau de fraturação ("fracture intercept") e espaçamento	O grau de fraturação corresponde à distância média medida entre descontinuidades, independentemente da família, sucessivas seguindo a interseção com uma linha de amostragem. O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes que pertencem à mesma família. O espaçamento está indubitavelmente associado ao grau de fraturação do maciço, dado que quanto maior o seu grau de fraturação, menor o espaçamento.	A medição realiza-se com a auxilio de uma régua graduada, ao longo de um comprimento suficientemente representativo para perceber a frequência das descontinuidades.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nomenclatura</th> <th>Intervalos (cm)</th> <th>Designação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F₁</td> <td>>200</td> <td>Muito afastadas</td> </tr> <tr> <td>F₂</td> <td>60-200</td> <td>Afastadas</td> </tr> <tr> <td>F₃</td> <td>20-60</td> <td>Medianamente afastadas</td> </tr> <tr> <td>F₄</td> <td>6-20</td> <td>Próximas</td> </tr> <tr> <td>F₅</td> <td><6</td> <td>Muito próximas</td> </tr> </tbody> </table>	Nomenclatura	Intervalos (cm)	Designação	F ₁	>200	Muito afastadas	F ₂	60-200	Afastadas	F ₃	20-60	Medianamente afastadas	F ₄	6-20	Próximas	F ₅	<6	Muito próximas	
Nomenclatura	Intervalos (cm)	Designação																				
F ₁	>200	Muito afastadas																				
F ₂	60-200	Afastadas																				
F ₃	20-60	Medianamente afastadas																				
F ₄	6-20	Próximas																				
F ₅	<6	Muito próximas																				
Abertura	A abertura refere-se à medida na perpendicular entre as paredes contíguas de uma descontinuidade e tende a diminuir com a profundidade, até se tornar completamente fechada, dado o seu grau de confinamento.	A medição realiza-se com o auxilio de um régua graduada em milímetros, colocada perpendicularmente às paredes contíguas da descontinuidade.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Abertura (mm)</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><0,5</td> <td>Fechada</td> </tr> <tr> <td>0,5-10</td> <td>Aberta</td> </tr> <tr> <td>>10</td> <td>Muito Aberta</td> </tr> </tbody> </table>	Abertura (mm)	Classificação	<0,5	Fechada	0,5-10	Aberta	>10	Muito Aberta											
Abertura (mm)	Classificação																					
<0,5	Fechada																					
0,5-10	Aberta																					
>10	Muito Aberta																					
Preenchimento	O preenchimento ou enchimento corresponde ao material que se encontra entre as duas paredes de uma descontinuidade. O tipo de preenchimento pode ser composto por diversos minerais e materiais, tais como argila, quartzo, rocha esmagada, etc. As propriedades físicas e mecânicas do enchimento, tais como a resistência, deformabilidade e permeabilidade, podem variar consideravelmente e controlar o comportamento da descontinuidade.	A avaliação do enchimento é feita por inspeção visual. A medição da espessura do enchimento realiza-se 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 relacionada com as irregularidades das paredes da descontinuidade. Este parâmetro influencia diretamente a resistência ao corte do maciço: uma maior irregularidade das superfícies implica um maior atrito entre as paredes e, assim, uma possibilidade inferior de ocorrência de rotura.	A sua avaliação é feita por inspeção visual, recorrendo-se à sensibilidade do tato e por comparação com uma superfície padrão.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Forma da superfície</th> <th>Descrição</th> <th>Nomenclatura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plana</td> <td>Superfície lisa</td> <td>R₁₋₂</td> </tr> <tr> <td>Ondulada</td> <td>Superfície com pequenas rugas</td> <td>R₃</td> </tr> <tr> <td>Dentada</td> <td>Superfície com rugas profundas</td> <td>R₄</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Superfície com rugas profundas e irregulares</td> <td>R₅</td> </tr> </tbody> </table>	Forma da superfície	Descrição	Nomenclatura	Plana	Superfície lisa	R ₁₋₂	Ondulada	Superfície com pequenas rugas	R ₃	Dentada	Superfície com rugas profundas	R ₄		Superfície com rugas profundas e irregulares	R ₅				
Forma da superfície	Descrição	Nomenclatura																				
Plana	Superfície lisa	R ₁₋₂																				
Ondulada	Superfície com pequenas rugas	R ₃																				
Dentada	Superfície com rugas profundas	R ₄																				
	Superfície com rugas profundas e irregulares	R ₅																				
Continuidade ou persistência	É o comprimento superficial de uma dada descontinuidade. É um parâmetro difícil de quantificar em afloramentos pois geralmente apenas se observam dimensões aparentes. Deve-se sempre observar a extremidade da superfície, i.e., se termina em rocha ou noutra descontinuidade. Este parâmetro tem influência relevante na definição das características mecânicas que definem potenciais superfícies de rotura.	Mede-se com uma régua graduada a extensão do traço da superfície da descontinuidade.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Continuidade</th> <th>Comportamento (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muito pouco contínuas</td> <td><1</td> </tr> <tr> <td>Pouco contínuas</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>Medianamente contínuas</td> <td>3-10</td> </tr> <tr> <td>Contínuas</td> <td>10-20</td> </tr> <tr> <td>Muito contínuas</td> <td>>20</td> </tr> </tbody> </table>	Continuidade	Comportamento (m)	Muito pouco contínuas	<1	Pouco contínuas	1-3	Medianamente contínuas	3-10	Contínuas	10-20	Muito contínuas	>20							
Continuidade	Comportamento (m)																					
Muito pouco contínuas	<1																					
Pouco contínuas	1-3																					
Medianamente contínuas	3-10																					
Contínuas	10-20																					
Muito contínuas	>20																					
Resistência das paredes das descontinuidades	Corresponde à resistência à compressão uniaxial nas paredes das descontinuidades. A deformabilidade e a resistência ao corte de um maciço rochoso são influenciadas pelo grau de resistência que as paredes das descontinuidades apresentam. O fator mais condicionante da resistência num plano de descontinuidade é o tipo de material que resulta da meteorização da face exposta do maciço ou algum preenchimento que esta possa conter. Uma superfície lisa, limpa e pouco alterada terá uma resistência idêntica à resistência da própria matriz rochosa.	Regista-se por intermédio do Esdérómetro portátil ou "Mantelo de Schmitt".	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Designação</th> <th>Resistência à compressão simples (σ_c, MPa)</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S₁</td> <td>>200</td> <td>S₁₋₂ Elevada</td> </tr> <tr> <td>S₂</td> <td>60-200</td> <td>S₃ Média</td> </tr> <tr> <td>S₃</td> <td>20-60</td> <td>S₄ Média</td> </tr> <tr> <td>S₄</td> <td>6-20</td> <td>S₅ Baixa</td> </tr> <tr> <td>S₅</td> <td><6</td> <td>S₆ Baixa</td> </tr> </tbody> </table>	Designação	Resistência à compressão simples (σ _c , MPa)	Classificação	S ₁	>200	S ₁₋₂ Elevada	S ₂	60-200	S ₃ Média	S ₃	20-60	S ₄ Média	S ₄	6-20	S ₅ Baixa	S ₅	<6	S ₆ Baixa	
Designação	Resistência à compressão simples (σ _c , MPa)	Classificação																				
S ₁	>200	S ₁₋₂ Elevada																				
S ₂	60-200	S ₃ Média																				
S ₃	20-60	S ₄ Média																				
S ₄	6-20	S ₅ Baixa																				
S ₅	<6	S ₆ Baixa																				
Percolação de água	A percolação de água através do maciço rochoso resulta sobretudo do fluxo de água através da rede de descontinuidades. A previsão da posição do nível freático, assim como dos caminhos de percolação e a pressão da água nos poros e descontinuidades, proporcionam muitas vezes indicações da existência de potenciais problemas de instabilidade de um dado maciço rochoso.	A identificação da presença de água realiza-se por inspeção visual e sensibilidade ao toque.	A classificação é feita por classes, nomeadamente, seco, húmido, gotejante, etc.																			

A utilização de aplicativos informáticos relativos à compilação dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (por exemplo, *ScanGeoData/BGD* e *SchmidtData/UCS*; cf. Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011) – permite efetuar, entre outros, um cruzamento exaustivo de toda a informação e a interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos de modo a apoiar o estabelecimento da cartografia de zonamento geotécnico de um dado maciço rochoso (Figura 3).

Ensaio esclerométrico

O ensaio esclerométrico realiza-se “in situ” com recurso ao esclerómetro portátil ou martelo *Schmidt*. Este equipamento foi desenvolvido em 1948 sendo um ensaio de natureza não-destrutiva do betão (Schmidt, 1951), tendo sido aplicado posteriormente em rochas, para a estimativa da sua resistência (Cargill & Shakoore, 1990). É um método expedito e recorrente nos domínios das geociências de engenharia, da geotecnia e da geomorfologia aplicada pela sua simplicidade e portabilidade (e.g., Day & Godie, 1977; Kolaiti & Papadopoulos, 1993; Goudie, 2006; Cargill & Shakoore, 1990; Katz et al., 2000; Kahraman, 2001; Yasar & Erdogan, 2004; Aydin & Basu, 2005; Aydin, 2008).

O martelo de Schmidt permite estimar a dureza do material-rocha através da medição do ressalto (“Rebound”, R) de uma massa de aço quando percutida sobre a superfície da rocha, que sofre maior ou menor ressalto mediante a dureza que a rocha apresentar. O valor do ressalto fica registado no aparelho, podendo variar entre 10 e 100 numa escala adimensional. O esclerómetro é colocado perpendicularmente à superfície exposta da rocha, que deve estar limpa e fresca, sem camadas de detritos ou películas que possam desvirtuar os ensaios (Figura 4). Na Figura 5 está exemplificada uma ficha-tipo de registo do ensaio esclerométrico.



Figura 4. Exemplificação da aplicação do martelo Classic Schmidt, tipo L (rocha), da Proceq® (pormenores em <http://www.proceq.com/>).

Para estudos de mecânica de rochas ou de geologia de engenharia, a ISRM (1978) aconselha a realização de 10 percussões por cada estação de ensaio, sendo os cinco menores resultados excluídos, e considerado o valor médio dos cinco ensaios restantes como resultado final do ensaio. Desta forma, a ISRM (1981) propõe a classificação da resistência à compressão simples apresentada no Quadro 7.

Quadro 7. Classificação da resistência à compressão simples do maciço (ISRM, 1981).

<u>Designação</u>	<u>Resistência à compressão simples (σ_c, MPa)</u>	<u>Classificação</u>	
S ₁	> 200	Muito elevada	S ₁₋₂ Elevada
S ₂	60 a 200	Elevada	
S ₃	20 a 60	Média	S ₃ Média
S ₄	6 a 20	Baixa	S ₄₋₅ Baixa
S ₅	<6	Muito baixa	

Ensaio de Carga Pontual

O ensaio de carga pontual ou *Point Load Test* (PLT) – também conhecido como Ensaio de Franklin – foi desenvolvido em 1972 com o objetivo de avaliar a resistência das rochas sob o efeito de uma carga pontual (e.g., Broch & Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Gunsallus & Kullhawy, 1984; ISRM, 1985; Norbury, 1986). Este ensaio permite aferir a resistência à compressão simples da rocha através da determinação do índice de resistência de carga pontual. Este ensaio apresenta um procedimento simples que pode ser realizado no campo durante a execução de sondagens, ou em laboratório. Os dados necessários ao cálculo da resistência à carga pontual devem ser registados numa ficha tipo (ISRM, 1985), Figura 7.

Este método consiste em levar uma porção de rocha à rotura, pela aplicação de uma carga concentrada entre duas ponteiros cónicas (Figura 8), conduzindo à determinação de dois índices, o de carga pontual, $I_{s(50)}$, e o de anisotropia, $I_{a(50)}$.

O equipamento de ensaio deve ser robusto, de modo a que as ponteiros cónicas indeformáveis se mantenham corretamente alinhadas durante o ensaio. O equipamento de ensaio é constituído por três sistemas: um de aplicação da carga, um de medição da força e outro de medição da distância entre as ponteiros (onde é aplicada a carga).

De um modo sucinto, poderemos referir que existem três tipos de ensaios (ISRM, 1985): ensaio diametral, ensaio axial e ensaio em blocos e em fragmentos irregulares. A escolha do tipo de ensaio depende do eixo do provete escolhido para aplicação da força, do tipo de rocha a ensaiar, e da maior ou menor anisotropia evidenciada pela rocha.

➤ **Ensaio diametral**

O ensaio diametral aplica-se a provetes cilíndricos, em que a relação comprimento (L)/diâmetro (D) é superior a 1. Ao colocar o provete na máquina, o operador deve ter em consideração que a distância entre os pontos de contacto e a extremidade livre mais próxima deve ser superior a 0.5 vezes o diâmetro do provete (Figura 9a).

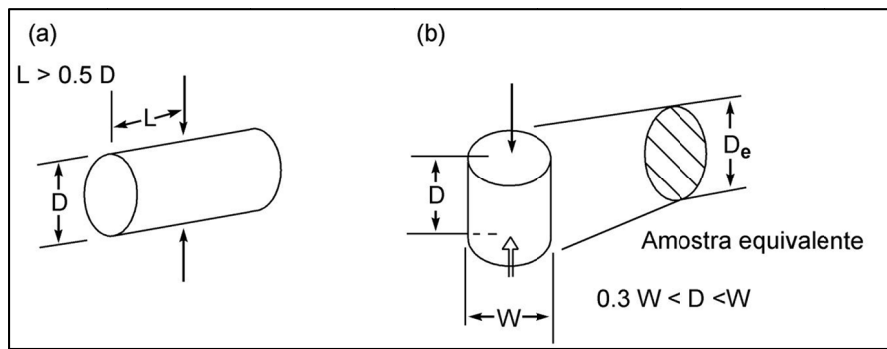


Figura 9. Exemplificação da tipologia dos ensaios PLT (adaptado da ISRM, 1985): a) Ensaio diametral em provetes, $L > 0,5 D$, cilíndricos; b) Ensaio axial em provetes cilíndricos.

São registados os valores da distância entre ponteiras D, e da carga de rotura P. São considerados válidos somente os resultados dos ensaios cuja superfície de rotura contenha os pontos de aplicação da carga. Se a superfície de rotura passa apenas por um ponto de carga, o ensaio deve ser rejeitado.

➤ **Ensaio Axial**

O ensaio axial, tal como o anterior, é igualmente realizado em provetes cilíndricos, em que a relação comprimento/diâmetro varia entre 0.3 e 1.0. Os provetes compridos podem ser ensaiados diametralmente de forma a produzirem novos provetes com as dimensões ideais para serem testados axialmente (figura 9b).

O provete deve ser colocado na máquina de ensaio, para que o eixo do ensaio coincida com o eixo perpendicular às faces planas da amostra. Em amostras isotrópicas o eixo de ensaio coincide com o eixo do cilindro e em amostras anisotrópicas é perpendicular aos planos de descontinuidade.

Regista-se a grandeza da distância entre ponteiras D , da largura do provete W , perpendicular à direção de carga (com uma precisão de mais ou menos 5%) e do valor da carga P . Similarmente ao ensaio diametral, existem ensaios válidos e inválidos.

➤ **Ensaio em blocos irregulares**

A relação entre a distância entre ponteiras/largura do provete deve variar entre 0.3 e 1.0, preferencialmente próximo da unidade. A carga deve ser aplicada a uma distância superior a 0.5 vezes a largura do provete (Figura 10).

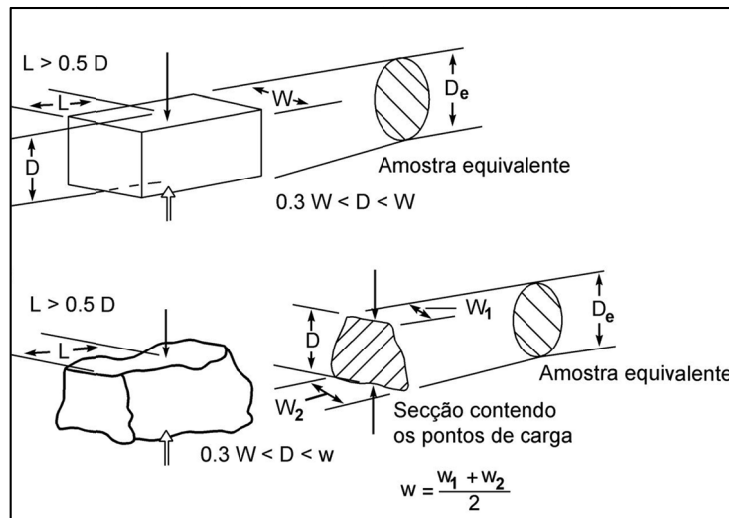


Figura 10. Relação de dimensões dos provetes (amostras regulares e irregulares) a satisfazer nos ensaios de carga pontual (adaptado da ISRM 1985).

O provete deve ser colocado no equipamento devidamente centrado, anotando-se a distância entre ponteiras D , a menor dimensão do provete W , perpendicular ao eixo de ensaio e a carga de rotura P . Se os lados do provete não forem paralelos, a menor dimensão do provete W , é calculada através da expressão [4]:

$$W = \frac{W_1 + W_2}{2} \quad [4]$$

Tal como nos ensaios anteriores, apenas são considerados válidos os resultados dos ensaios cuja superfície de rotura contenha os pontos de aplicação da carga.

Independentemente do tipo de ensaio, deverão ser realizados pelo menos 10 testes em rochas homogêneas e mais de 10 em rochas anisotrópicas ou heterogêneas.

A resistência à carga pontual, I_s , calcula-se através da seguinte expressão [5]:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad [5]$$

Em que,

P - carga de rotura

D - distância entre ponteiras (diâmetro do provete ou altura da amostra ensaiada)

Este valor deve ser corrigido para $I_{s(50)}$, ou seja, para o valor correspondente a um D de 50 mm, o que se pode obter através do gráfico representado na Figura 11.

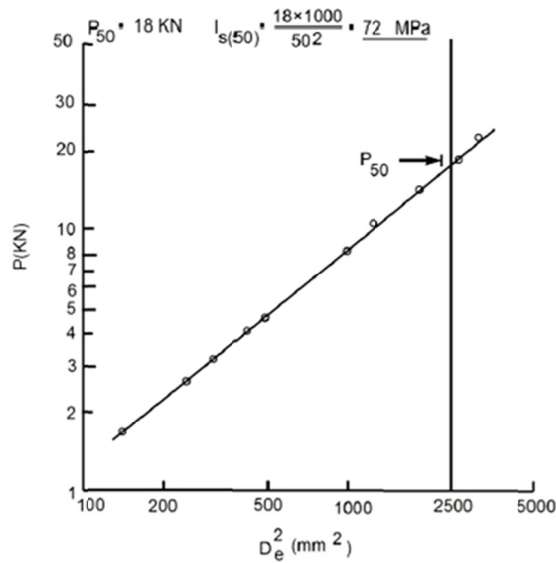


Figura 11. Gráfico para o cálculo de $I_{s(50)}$ (adaptado da ISRM, 1985).

Projetam-se os valores da carga de rotura P, e do quadrado da distância entre ponteiras, D_e^2 , obtido num ensaio log-log, em que a reta a partir da qual é possível extrapolar o valor da carga de rotura P, correspondente a $D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$. A partir dos valores estimados, calcula-se o $I_{s(50)}$ através da expressão [6]:

$$I_{s(50)} = \frac{P(50)}{2500} \quad [6]$$

Para amostras com tamanhos únicos, o melhor método é determinar $I_{s(50)}$ numericamente a partir da seguinte expressão [7]:

$$I_{s(50)} = F * I_s \quad [7]$$

Sendo F o fator de correção obtido através da expressão: $F = (D_e/50)^{0.45} \approx \sqrt{D_e}/50$, ou ainda por intermédio do ábaco apresentado na Figura 12

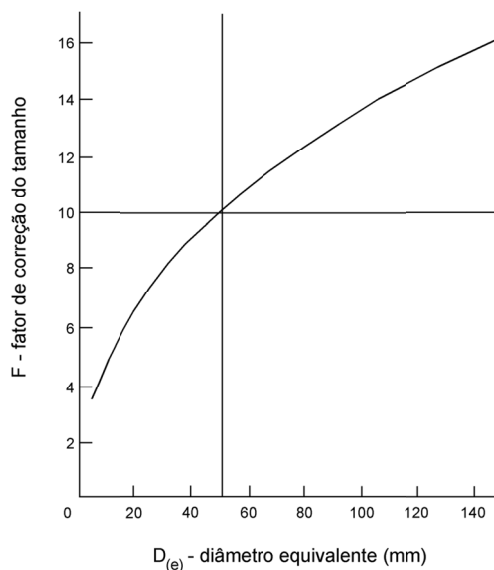


Figura 12. Determinação do fator de correção F (adaptado da ISRM, 1985).

Em ensaios axiais, em blocos ou em fragmentos irregulares, o diâmetro equivalente, D_e , é determinado através da expressão [8]:

$$D_e = 4 * \left(\frac{A}{\pi}\right) \quad [8]$$

em que A é o produto da distância entre ponteiros (D) pela menor dimensão do provete (W).

Para os ensaios diametrais, o diâmetro do provete (D) é igual ao diâmetro equivalente (D_e). Para o cálculo dos valores médios de $I_{s(50)}$ dever-se-á ter em conta o índice de resistência pontual e a anisotropia. O valor médio de $I_{s(50)}$ deve ser calculado retirando os dois valores mais altos e os dois valores mais baixos, fazendo-se a média dos restantes valores.

O índice de anisotropia $I_{a(50)}$ é calculado pela razão entre as medianas dos índice calculados para tensões normais e paralelas aos planos de debilidade. Assim, $I_{a(50)}$ toma valores próximos da unidade para rochas isotrópicas e valores mais elevados para rochas anisotrópicas.

O valor $I_{s(50)}$ deve ser utilizado diretamente na classificação das rochas, enquanto que correlações com a resistência a compressão uniaxial são apenas aproximações. A resistência à compressão uniaxial é cerca de 20 a 25 vezes a resistência a carga pontual, como se pode verificar na Figura 13.

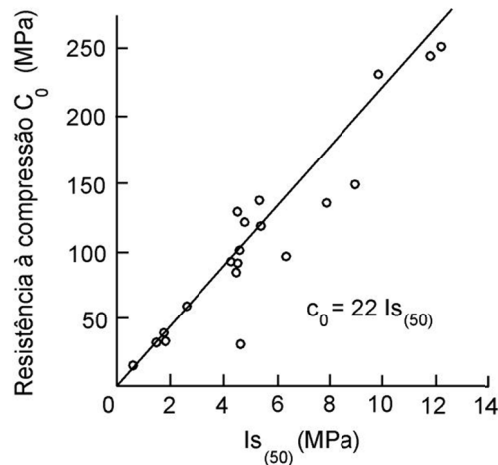


Figura 13. Gráfico de correlação entre o índice de resistência à carga pontual (PLT) e a resistência à compressão uniaxial (C_0 , UCS), (adaptado de ISRM, 1985).

É possível através de ensaios expeditos realizados com o recurso ao martelo de geólogo, estimar os valores da resistência à compressão do maciço rochoso. Para tal, bastará recorrer à classificação proposta pela ISRM (1978, 1981, 1985) a qual, em função do grau de qualidade da rocha, correlaciona a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual ($I_{S(50)}$), com o comportamento do material pétreo face àquelas análises expeditas (Quadro 8).

Quadro 8. Grau de qualidade da rocha (R0 a R6) correlacionada com a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual $I_{S(50)}$ (adaptado de ISRM 1978, 1981, 1985).

<u>Grau</u>	<u>Designação</u>	<u>σ_c (Mpa)</u>	<u>$I_{S(50)}$ (Mpa)</u>	<u>Análise expedita</u>
R6	Extremamente elevada	>250	>10	A rocha lasca depois de sucessivos golpes de martelo e ressoa quando batida.
R5	Muito elevada	100-250	4-10	Requer muitos golpes de martelo para partir espécimes intactos de rocha.
R4	Elevada	50-100	2-4	Pedaços pequenos de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo.
R3	Razoável	25-60	1-2	Um golpe firme e com o pico do martelo de geólogo faz identações até 5mm; com a faca consegue-se raspar a superfície.
R2	Branda	5-25	(*)	Com a faca é possível cortar o material, mas este é demasiado duro para lhe dar forma de provete para o ensaio triaxial.
R1	Muito branda	1-5	(*)	O material desagrega-se com o golpe firme do pico do martelo de geólogo.
R0	Extremamente branda	0,25-1	(*)	Consegue marcar-se com a unha.

(*) Não são considerados minimamente fiáveis as correlações com a resistência à compressão simples.

2.3. Classificações geomecânicas: breve revisão

2.3.1. Introdução geral

Os maciços rochosos apresentam nos domínios da geoengenharia, interessantes desafios ao nível de caracterização/prospecção, de projeto e de dimensionamento dada a sua natural heterogeneidade e complexidade. Desta forma, a sua avaliação comportamental é de extrema importância para fins de engenharia e surge a necessidade de recorrer a métodos baseados na mecânica das rochas (Rocha, 1981; Brown, 1991). A avaliação e correlação de resultados obtidos por diferentes classificações geomecânicas, baseadas numa caracterização prévia do maciço rochoso, possibilitam o acesso a informação relativamente detalhada sobre o estado de tensão “in situ”, a qualidade do maciço, etc., e permitem prever o comportamento mecânico do mesmo face às condições a serem impostas aquando de uma dada escavação (Singh & Goel, 1999, 2011). A caracterização geológico-geomecânica de maciços rochosos corresponde ao conjunto de informações obtidas através de investigações geotécnicas e de ensaios mecânicos dos maciços rochosos (Monticeli, 1984), as quais servirão de base para a aplicação das classificações geomecânicas dada a instabilidade natural dos maciços (Figura 14).

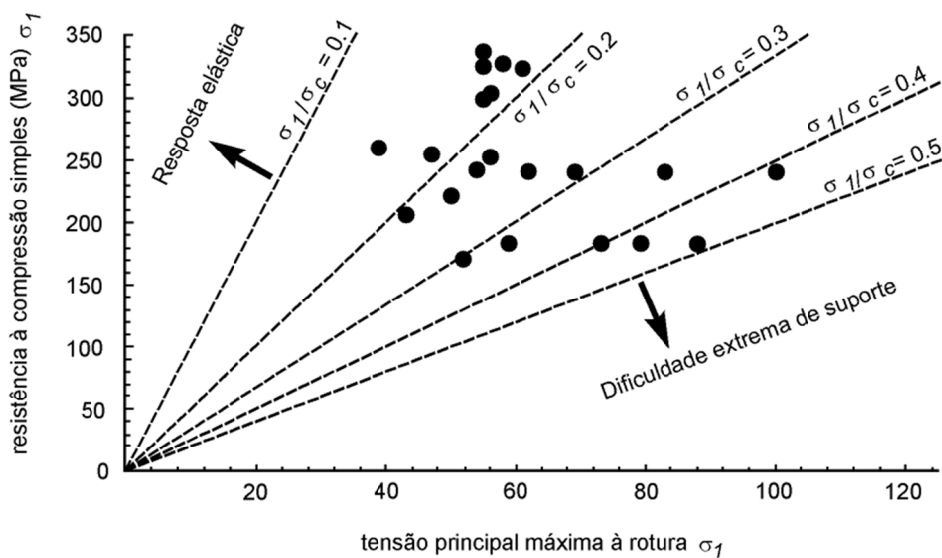


Figura 14. Classificação empírica de estabilidade desenvolvida para túneis na África do Sul (adaptado de Hoek & Brown, 1980)

Nas últimas décadas, as classificações geomecânicas de maciços rochosos surgiram como importantes ferramentas auxiliares de projetos nas áreas da engenharia geotécnica, da engenharia civil, da engenharia de minas e da geologia (e.g., Terzaghi, 1946; Hoek & Brown, 1980;

Bieniawski, 1989; López Jimeno & Díaz Méndez, 1997; Barton, 2000, 2006, 2007). A experiência tem demonstrado que estas classificações podem ser uma ferramenta poderosa, quando usadas corretamente (Barton & Bieniawski, 2008). Aliás, em vários projetos, a abordagem classificativa é a única base prática para o dimensionamento e apoio à construção de estruturas subterrâneas complexas (Singh & Goel, 1999, 2011). De acordo com Bieniawski (1989), para o uso das classificações pressupõe atingir os seguintes objetivos:

- ✓ Identificar os parâmetros mais significantes que influenciam o comportamento do maciço;
- ✓ Dividir uma formação rochosa em particular em grupos de comportamento geotécnico semelhante, ou seja, em classes de qualidade;
- ✓ Fornecer uma base para compreender as características das diferentes classes de maciços;
- ✓ Relacionar as diferentes condições geológico-geotécnicas encontradas em locais distintos;
- ✓ Obter dados quantitativos e diretrizes para a engenharia de projeto;
- ✓ Fornecer uma base comum de comunicação entre os diferentes geo-profissionais (engenheiros e geólogos; Bock, 2006).

Como vantagens da sua utilização, enunciam-se as seguintes reflexões (*e.g.*, Terzaghi 1946; Wickham et al., 1972, 1974; Bieniawski, 1973, 1979, 1989; Barton et al., 1974, 1980; Skinner, 1988; Singh & Goel, 1999, 2011; Barton, 2006):

- ✓ Proporciona melhor comunicação entre todos os agentes envolvidos, nomeadamente, geo-profissionais, projetistas e donos de obra;
- ✓ As observações, a experiência e a decisão em engenharia são melhor correlacionadas e consolidadas através de um sistema de classificação quantitativo;
- ✓ A engenharia valoriza uma abordagem numérica, conseqüentemente, um sistema classificativo quantitativo tem uma aplicação considerável numa avaliação global da qualidade da rocha;
- ✓ As abordagens classificativas apoiam uma melhor sistematização e a organização do conhecimento.

Apesar do uso destas ferramentas ser bastante atrativo, é de referir que as classificações geomecânicas devem ser aplicadas de forma interdisciplinar, e usadas em conjunto com métodos observacionais e estudos analíticos para formular uma lógica de conceção global compatível com os objetivos de projeto e da geologia local (Bieniawski, 1989; Bastos, 1998; Medley, 1999; Riedmuller & Schubert, 1999):

- ✓ Universalidade dos pesos e parâmetros classificativos sem considerar as características singulares do maciço e do projeto;

- ✓ A anisotropia assim como o seu comportamento ao longo do tempo, não podem ser descritos num só valor;
- ✓ Não existe inter-relação entre os parâmetros que traduzam a influência da variação de um parâmetro nos demais;
- ✓ Existem inúmeras combinações possíveis para cada sistema para obtenção de um índice geomecânico;
- ✓ Nem sempre são contabilizados mecanismos de rotura, deformação e interação entre rocha e suporte;
- ✓ Os parâmetros de avaliação não são suficientes para selecionar parâmetros de projeto e de suporte;
- ✓ Não promovem a análise e a correta apreciação das condições do maciço rochoso, em particular a aplicação em meios heterogêneos, o que pode resultar num dimensionamento inadequado.

As propriedades do maciço rochoso que são avaliadas e consideradas, em regra, nas classificações geomecânicas são em termos genéricos as seguintes (Barton & Bieniawski, 2008):

- Heterogeneidade litológica, estrutura e grau alteração
- Resistência do material-rocha e das superfícies estruturais do maciço
- Índice “Rock Quality Designation” (RQD)
- Espaçamento das descontinuidades
- Atitude das descontinuidades e sua relação com o sentido da escavação
- Condições e características geológico-geotécnicas das descontinuidades
- Condições hidrogeológicas e geo-hidráulicas
- Estado de tensão

Um método de classificação rigoroso torna-se mais fiável se a maioria dos parâmetros geológico-geotécnicos forem devidamente avaliados “in situ” ou em laboratório (Singh & Goel, 1999, 2011). Em qualquer sistema classificativo, o menor valor corresponde ao maciço que se apresenta de má qualidade e o valor máximo corresponde a um maciço de excelente qualidade geomecânica (Figura 15 e 16).

Os maciços rochosos são um meio por excelência, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico que induzirá um comportamento geomecânico complexo dos materiais pétreos nas diferentes escalas da rocha intacta (e.g., Peres-Rodrigues, 1977; Rocha, 1981; Cunha & Muralha, 1990; Miranda et al., 2006). Os maciços heterogêneos são de natureza mais complexa, pelo que, para a sua caracterização, se utilizam metodologias que combinam ensaios geotécnicos e classificações geomecânicas com ferramentas probabilísticas e/ou determinísticas.

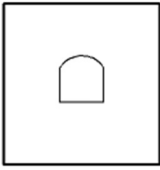
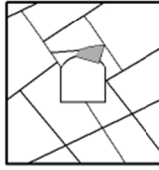
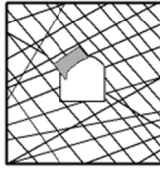
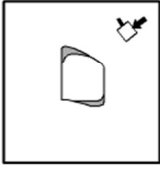
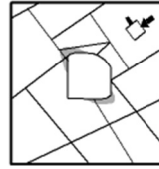
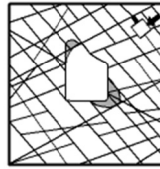

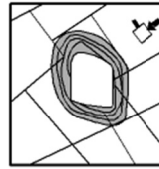
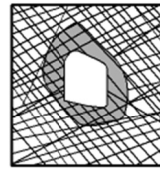
	Maciça (RMR>75)	Moderadamente fracturada (50>RMR<75)	Muito fracturada (RMR<50)
Tensão in situ baixa ($\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$)	 Comportamento elástico-linear	 Escorregamento de blocos e cunhas	 Destaque de blocos da superfície da escavação
Tensão in situ intermédia ($0.15 > \sigma_1 / \sigma_c < 0.4$)	 Ruptura frágil adjacente ao limite da escavação	 Ruptura frágil localizada da rocha intacta e movimento de blocos	 Ruptura frágil localizada da rocha intacta e destaque ao longo das descontinuidades
Tensão in situ elevada ($\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$)	 Ruptura frágil em torno da escavação	 Ruptura frágil da rocha intacta em torno da escavação e movimento de blocos	 Rochas deformáveis e expansíveis. Contínuo elástico/plástico

Figura 15. Exemplos de instabilidade em túneis e rotura frágil do material (assinalada em tons acinzentados) em função do grau de fracturação (RMR) e do estado de tensão, adaptado de Hoek & Brown (1980).

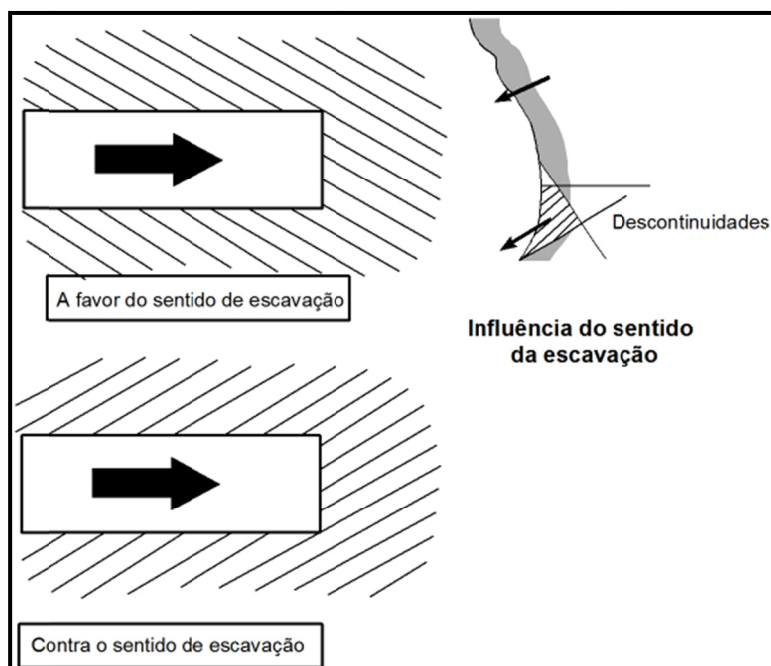


Figura 16. Esquematisação da importância do sentido da escavação e a orientação das descontinuidades dominantes (adaptado de Hoek, 2007).

Pela importância na prática da geoengenharia, foi rapidamente reconhecido, que com as classificações geomecânicas (ou classificações de maciços rochosos) foram melhoradas as primeiras abordagens descritivas, passando então a incluir elementos quantitativos de caráter geológico-estrutural, petrofísico, geotécnico, geohidráulico e geomecânico. Todavia, esta melhoria confinou o caráter empírico intrínseco, mas definitivamente colocou as classificações geomecânicas na prática de geoengenharia como uma poderosa ferramenta de análise diagnóstica das condições básicas geotécnico-geomecânicas. Estas classificações contribuem assim para apoiar o estudo comportamental de um dado maciço rochoso, aliada com a modelação baseada em modelos numéricos probabilísticos e/ou determinísticos. Assim, a seleção dos valores característicos dos parâmetros geotécnicos é um dos aspetos cruciais das metodologias probabilísticas de avaliação da segurança, como é o caso das preconizadas no Eurocódigo (EC), (Matos Fernandes, 2000). O EC7 estabelece que a escolha dos valores característicos das propriedades dos materiais geológicos deve basear-se nos resultados de ensaios de laboratório e de campo. A modelação e a segurança constituem, assim, as bases do dimensionamento, o que pressupõe a elaboração de modelos, a análise das ações e a avaliação das propriedades dos materiais e do risco associado à construção da obra, de onde decorre a formulação de critérios de segurança (Maranha das Neves, 1994; Silva Cardoso, 2004; Caldeira, 2005). Estão reportados vários acidentes estruturais ocorridos ou patologias associadas, de modo súbito, nos maciços rochosos durante os trabalhos de escavação de obras (e.g., Dinis da Gama, 1991; Ribeiro e Sousa, 2004).

O domínio da caracterização geológico-geotécnica dos maciços experimentou progressos notáveis nos últimos três decénios. Em parte, houve uma mudança progressiva na forma como as geociências de engenharia contribuem para as investigações e a caracterização dos terrenos (e.g., Terzaghi, 1965; Barton & Choubey, 1977; Barton, 1986; Einstein, 1991; Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Hudson & Cosgrove, 1997; Mandl, 2005; Price, 2009; Freitas, 2009; Galiza et al., 2011), bem como houve uma evolução das ferramentas informáticas e de cálculo. Foi, por isso, determinante, as recomendações e as normalizações no domínio da mecânica das rochas propostas pela “*International Society for Rock Mechanics*”, especialmente nos documentos ISRM (1978, 1981) e, mais recentemente, a compilação normativa do “*Blue Book*” da ISRM (2007).

Uma das primeiras propostas de sistematização empírica para a determinação dos sistemas de suporte em galerias mineiras de carvão deve-se a Ritter (1879). Outro marco na literatura internacional sobre túneis é o artigo “*rock defects and loads on tunnel supports*” de Terzaghi (1946) que apresenta as bases racionais da primeira classificação com um certo grau de formalismo designada por “*Rock Load Mass Classification System*” (RLM-system). Surgiram posteriormente, entre outras, a “*Stand-up time classification*” (Laufer, 1958), a “*RQD – Rock*

Quality Designation” (Deere, 1963; Deere et al., 1967), o “NATM – New Austrian Tunnelling Method” (Rabcewicz, 1964/1965, Rabcewicz & Golser, 1973; Müller, 1990) e o “dimensionamento empírico de suporte” (Rocha, 1976). Todavia, as classificações com uma base multi-paramétrica dadas à estampa, nomeadamente, por Wickham et al. (1972, 1974), Bieniawski, (1973, 1976), Barton et al. (1974, 1980) são, geralmente, consideradas como as sistematizações fundadoras das classificações numéricas em escavações subterrâneas. Atualmente, as classificações mais utilizadas são a RMR – “Rock Mass Rating” e o Q-system – “Rock Tunnelling Quality Index” (Barton & Bieniawski, 2008). Ambas se aplicam na caracterização dos maciços rochosos direcionada para a construção de escavações subterrâneas (túneis) e minas. De salientar que a classificação Wickham et al. (1972, 1974) não teve grande adesão na comunidade técnica e apenas há reportado uma atualização do RSR – “Rock Structure Rating” por parte de Skinner (1988). Porém, há outras classificações que são derivações das anteriores pela especificidade geomecânica da sua aplicação, como por exemplo, a “RME – Rock Mass Excavability” (Bieniawski et al., 2006, 2007), a “MRMR – Mining Rock Mass Rating” (Laubscher, 1977, 1990; Laubscher & Jakubec, 2000), a “MBR – modified basic RMR” (Kendorski et al., 1983), a “SRC – Surface Rock Classification” (González de Vallejo, 1983, 2003), a “SMR – Slope Mass Rating” (Romana, 1985, 1993, 1995), a “RMi – Rock Mass index” (Palmström, 1996, 2006, 2009), a “QTBM – Q-system for tunnel boring machine” (Barton, 2000, 2006), a “DMR – Dam Mass Rating” (Romana, 2003, 2004), o “HP – Hydro-Potential Value” (Gates, 1997, 2003) e o “GSI – Geological Strength Index” (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005).

De ressaltar que não se deve manipular as classificações anteriores em termos de adulterar os seus pesos ou introduzir e/ou suprimir parâmetros, tal como refere Hudson & Harrison, (2000): “(...) *The two main classification systems-those of RMR and Q-utilize six main parameters which are not the same. The developers of these systems have decided on which parameters are most important for tunnel design, and designed their classifications accordingly. Both proponents of the systems have warned users not to attempt to extrapolate the classification methods without modification and not to make predictions outside the original subjects for which the classification schemes were intended.*”. Todavia, uma alternativa pragmática para se adequar uma classificação ao nosso problema é como propõe Hudson (1992) a adoção do “Rock Engineering System” (RES) segundo o qual, em função da obra de engenharia e dos seus objetivos, devem ser selecionados, de entre os parâmetros geotécnico-geomecânicos, aqueles que influenciarão decisivamente no comportamento da obra, atribuindo-lhes para tal, posteriormente, diferentes pesos consoante a sua importância prática para o caso em análise.

Na presente dissertação irão ser apresentadas em traços gerais as principais classificações geomecânicas utilizados na atualidade pela comunidade técnico-científica e dois índices geológico-geomecânicos de particular interesse nas nossas investigações, a saber:

- *Rock Mass Rating (RMR)*, de Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989)
- *Rock Tunnelling Quality Index (Q-system)*, de Barton et al. (1974, 1980) e Barton (2006)
- *Geological Strength Index (GSI)*, de Hoek & Brown (1997), Hoek et al. (1998), Marinos & Hoek (2000), Marinos et al. (2005)
- *Hydro-Potential Value (HP)*, de Gates (1995, 1997, 2003)

A maioria dos dados de base das classificações geomecânicas assenta numa série de parâmetros geológico-geotécnicos que podem ser adquiridos recorrendo à “*Basic Geotechnical Description of Rock Masses*” (BGD) da ISRM (1981), aliada à técnica de amostragem linear aplicada a superfícies expostas dos maciços rochosos, bem como complementarmente a todos os ensaios geomecânicos “in situ” e/ou em laboratório, previstos pela ISRM (2007), Figura 17.

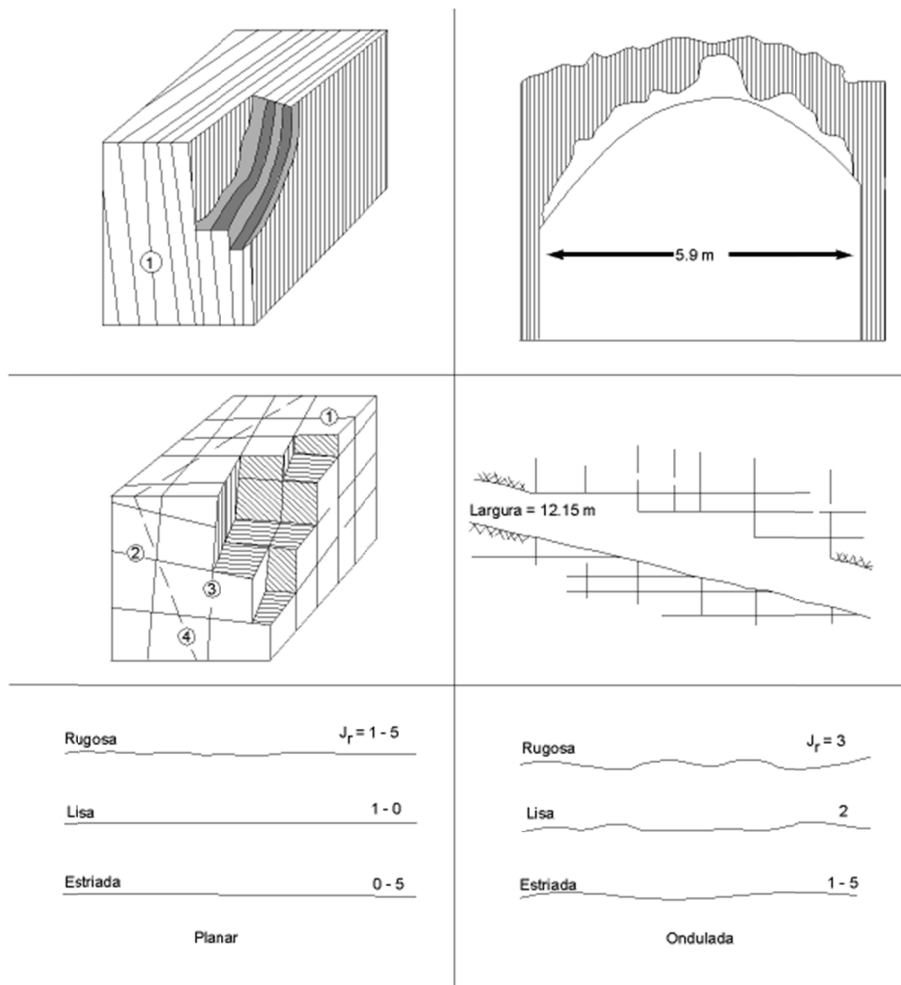


Figura 17. Ilustração dos principais aspectos geológico-geotécnicos a ter em conta no estudo de um dado maciço rochoso para efeitos de uma escavação subterrânea (adaptado de Barton, 2007).

2.3.2. Rock Mass Rating (RMR)

A classificação enunciada foi na sua essência desenvolvida por Bieniawski (1973, 1976, 1979) na década de 70 do século passado, utilizando dados obtidos em escavações realizadas em rochas da África do Sul (Brady & Brown, 2004). Em 1989, a classificação geomecânica RMR desenvolveu-se com base em cerca de 350 casos de estudo, beneficiando assim de ajustes e propostas de modificações por parte de vários investigadores e geo-profissionais, refinando-a e adaptando-a a diversas aplicações de engenharia (Bieniawski, 1989; Vardakos, 2004). O trabalho de Serafim & Pereira (1983) foi uma importante achega para a aplicação no RMR das condições geo-hidráulicas dos maciços e o cálculo do módulo de deformabilidade.

A classificação do maciço é aplicada dividindo-o em zonas estruturais com características geológico-geotécnicas semelhantes. O resultado do índice RMR para um determinado maciço pode variar entre 0 e 100 e é obtido através da soma algébrica de pesos relativos. Existem seis parâmetros (Pi) classificativos a definir para cada unidade, nos quais se irá basear a classificação geomecânica RMR (Bieniawski, 1989), Figura 18:

- 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
- P4: Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades
- P5: Condições de percolação de água
- P6: Correção da orientação das descontinuidades relativamente ao sentido de escavação

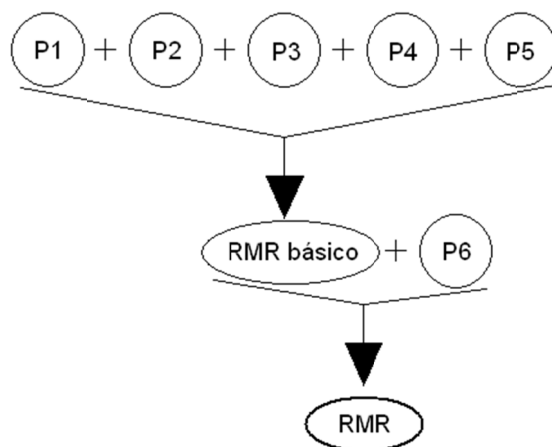


Figura 18. Representação gráfica da obtenção do valor de RMR (adaptado de Miranda et al., 2006).

A cada variável corresponderá um dado peso, não sendo as variáveis contabilizadas de igual forma. Quanto maior for o índice, melhores serão, à partida, as condições do maciço rochoso. A partir do valor obtido para o RMR, o maciço rochoso é então enquadrado numa de cinco classes, para as quais estão estabelecidos os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb (coesão e ângulo de atrito), período de tempo sem suporte (“stand-up-time”) e informações genéricas sobre a qualidade do maciço (Bieniawski, 1989).

❖ P1: Índice de qualidade da rocha (RQD)

Na determinação do índice de qualidade da rocha recorre-se ao RQD – “Rock Quality Designation” (Deere et al., 1967) que é, em regra, determinado a partir da avaliação de sondagens com recuperação de rocha. Os pesos correspondentes aos valores de RQD são os que se apresentam no Quadro 9. A Figura 19 exemplifica dois casos extremos do RQD e a Figura 20 apresenta um gráfico, comumente, usado para a determinação do RQDt em função do espaçamento médio das descontinuidades, sendo também conhecido pelo ábaco de Priest & Hudson (1976).

Quadro 9. Descrição e pesos atribuídos ao RQD para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

<u>Descrição</u>	<u>RQD (%)</u>	<u>Pesos</u>
Excelente	90-100	20
Boa	75-90	17
Razoável	50-75	13
Fraca	25-50	8
Muito fraca	< 25	3

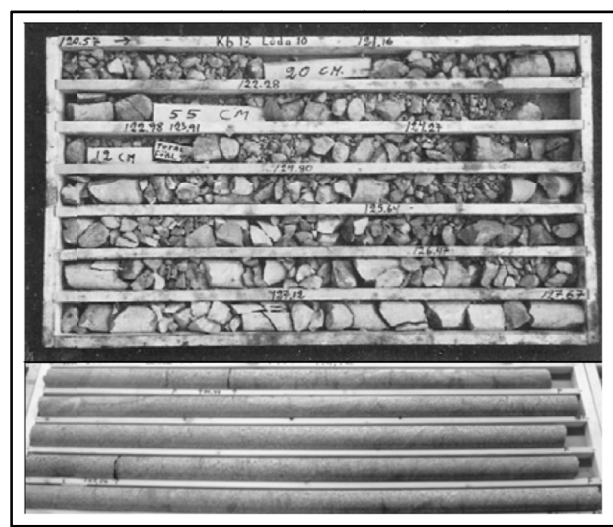


Figura 19. Exemplificação do contraste entre duas caixas de sondagens que sugerem a ordem de magnitude da diferença do índice de qualidade da rocha (RQD), segundo Barton (2007).

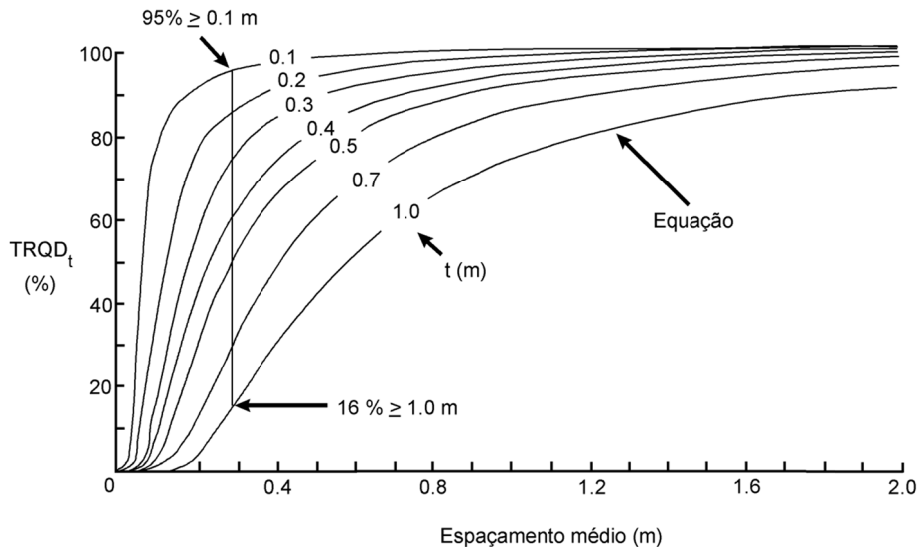


Figura 20. Ábaco para a determinação da variação do RQD com o espaçamento médio das descontinuidades, através do RQD teórico (RQDt) para uma série de intervalos do valor limiar t (TRQDt – “theoretical RQD for a general threshold value t ”), adaptado de Priest & Hudson (1976) e de Priest (1993).

❖ P2: Resistência

A avaliação da resistência deve ser obtida, preferencialmente, a partir de sondagens com recuperação de testemunhos de material-rocha, de acordo com as condições do local, recorrendo ao índice de carga pontual ou, alternativamente, ao índice de resistência de compressão uniaxial através de execução de ensaios esclerométricos no material rochoso. No Quadro 10 apresenta-se a descrição e os pesos deste parâmetro.

Quadro 10. Descrição e pesos atribuídos à resistência para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

<u>Descrição</u>	<u>Resistência à compressão uniaxial, (σ_c, UCS (MPa)</u>	<u>Resistência à carga pontual, (I_{s50}, PLT (MPa)</u>	<u>Pesos</u>
Excepcionalmente resistente	>250	8	15
Muito resistente	100-250	4-8	12
Medianamente resistente	50-100	2-4	7
Resistente	25-50	1-2	4
Pouco resistente	10-25	Para esta gama baixa de valores, é preferível o recurso ao ensaio à compressão uniaxial	2
Muito pouco resistente	2-10		1
Muitíssimo pouco resistente	1-2		0

❖ P3: Espaçamento entre as descontinuidades

A distância entre duas descontinuidades adjacentes deve ser medida para a rede de descontinuidades baseada numa amostragem linear (considerar na análise, o espaçamento médio das famílias de descontinuidades e o “*fracture intercept*”, i.e., o espaçamento médio independentemente das famílias; ISRM, 1981) e o peso a considerar na classificação RMR deve corresponder ao espaçamento mais determinante. No Quadro 11 apresentam-se os pesos relativos a este parâmetro.

Quadro 11. Descrição e pesos atribuídos ao espaçamento das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

<u>Descrição</u>	<u>Espaçamento (m)</u>	<u>Pesos</u>
Muito afastado	>2	20
Moderadamente afastado	0,6-2	15
Afastado	0,2-0,6	10
Próximo	0,06-0,2	8
Muito próximo	<0,06	5

❖ P4: Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades

Este parâmetro inclui na sua classificação a continuidade, a abertura, a rugosidade, o preenchimento e o grau de alteração das paredes das descontinuidades. Para aquisição dever-se-á seguir as recomendações propostas pela ISRM (1978, 1981). Os pesos relativos a este parâmetro apresentam-se no Quadro 12. Para apoiar a descrição das condições das descontinuidades Bieniawski (1989) propôs algumas orientações sintetizadas no Quadro 13.

Quadro 12. Descrição e pesos atribuídos às condições das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

<u>Descrição</u>	<u>Pesos</u>
Superfícies muito rugosas, pouco contínuas, fechadas e não alteradas	30
Superfícies ligeiramente rugosas, com aberturas < 1mm e ligeiramente alteradas	25
Superfícies ligeiramente rugosas, com aberturas < 1mm e muito alteradas	20
Superfícies lisas ou com preenchimento < 5mm ou com aberturas entre 1-5 mm, contínuas	10
Superfícies com enchimento mole com espessuras > 5mm ou aberturas >5mm, contínuas	0

Quadro 13 Orientações para a classificação pormenorizada das condições geológico-geotécnicas das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

Comprimento (continuidade)	< 1m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Pesos	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm
Pesos	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Lisa	Estriada
Pesos	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Enchimento duro < 5 mm	Enchimento duro > 5 mm	Enchimento mole < 5 mm	Enchimento mole > 5 mm
Pesos	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta
Pesos	6	5	3	1	0

P5: Condições de percolação de água

Em escavações subterrâneas (túneis) deve ser determinado o fluxo de água em litros/minuto, por cada 10 m de extensão; noutros casos pode ser considerado a partir duma denominação geral, tal como seco, húmido, etc. (CFCFF, 1996). No Quadro 14 apresentam-se os pesos relativos a este parâmetro.

Quadro 14. Descrição e pesos atribuídos às condições de percolação de água para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

Fluxo de água por cada 10 m de extensão (L/min)	Nenhum	<10	10-25	25-125	>125
Pressão de água nas descontinuidades/tensão principal máxima	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
Descrição geral	Seco	Algo Húmido	Húmido	Gotejante	Fluxo
Pesos	15	10	7	4	0

❖ *P6: Orientação das descontinuidades*

A influência da orientação das descontinuidades é considerada relativamente ao sentido do túnel, e quanto ao declive face ao alinhamento da escavação. Como podem existir várias famílias de descontinuidades, a família dominante será o principal alvo desta classificação, mas ter-se-á que fazer uma análise geológico-estrutural global dos restantes sistemas de descontinuidades para a ponderação final na correção deste parâmetro. No Quadro 15 apresenta-se a descrição deste parâmetro e no Quadro 16, os pesos correspondentes para três situações: túneis/minas, fundações e taludes.

Quadro 15. Descrição da orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

<u>Direção perpendicular ao eixo do túnel</u>	
Inclinação 45°-90°, a favor da escavação Muito favorável	Inclinação 20°-45°, a favor da escavação Favorável
Inclinação, 45°-90° contra a escavação Razoável	Inclinação, 20°-45° contra a escavação Desfavorável
<u>Direção paralela do eixo do túnel</u>	
Inclinação 45°-90° Muito desfavorável	Inclinação 20°-45° Favorável
Inclinação 0-20°, independente da direção Favorável	

Quadro 16. Pesos atribuídos à orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

<u>Orientação das descontinuidades</u>	<u>Muito favorável</u>	<u>Favorável</u>	<u>Medianamente favorável</u>	<u>Desfavorável</u>	<u>Muito desfavorável</u>
Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

O valor final do índice RMR resulta do somatório dos pesos parciais (P1 a P5 + P6) anteriormente apresentados, expresso na expressão [9].

$$RMR = \sum (\text{parâmetros classificativos}) + \text{ajuste da orientação das descontinuidades} \quad [9]$$

O resultado obtido após a aplicação da expressão [9] vai permitir associar uma classe ao maciço em estudo de acordo com o Quadro 17 e Quadro 18, e concluir os procedimentos a impôr em obra.

Quadro 17. Classes do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais e tipos de escavação e sugestão das condições de suporte associados (adaptado de Bieniawski, 1989).

Classes	Escavação	Suporte		
		<u>Pregagens</u> (20 mm diâmetro envolvidas em betão)	<u>Betão projetado</u>	<u>Cimbres</u>
RMR 81-100				
Classe I	Secção total, 3 m de avanço.	Geralmente não requer suporte, com exceção de pregagens ocasionais.		
Muito bom				
RMR 61-80				
Classe II	Secção total, 1.0 a 1.5 m de avanço. Suporte completo a 20 m da frente.	Pregagens de 3 m de comprimento, espaçadas 2.5 m, ocasionalmente com malha de aço em certas zonas do teto.	50 mm no teto quando necessário.	Nenhum.
Bom				
RMR 41-60				
Classe III	Secção parcial (frente e baixo), avanço 1.5-3 m. Início do suporte após cada desmonte. Suporte completo a 10m.	Pregagens sistemáticas com 4 m de comprimento, espaçadas de 2 m nos hasteais e teto, com malha de aço no teto.	50-100 mm no teto; 30 mm nos hasteais.	Nenhum.
Razoável				
RMR 21-40				
Classe IV	Secção parcial (frente e baixo), avanço 1.0-1.5 m. Instalação do suporte concomitantemente com a escavação.	Pregagens sistemáticas com 4-5 m de comprimento, espaçadas de 1.0-1.5 m com malha de aço no teto e hasteais.	100-150 mm no teto; 100 mm nos hasteais.	Cimbres leves a médios espaçados de 1.5 m.
Fraco				
RMR < 20				
Classe V	Secções múltiplas, avanço de 0.5-1.5 m. Instalação do suporte com a escavação. Betão projetado logo após o desmonte.	Pregagens sistemáticas com 5-6 m de comprimento, espaçadas de 1.0-1.5 m com malha de aço no teto e hasteais. Pregagem na soleira.	150-200 mm no teto; 150 mm nos hasteais; 50 mm na soleira.	Cimbres médios e pesados espaçados de 0.75 m. Fecho da soleira.
Muito fraco				

Quadro 18. Parâmetros de projeto e propriedades do maciço rochoso (adaptado de Bieniawski, 1993)

Parâmetros/Propriedades do maciço rochoso	RMR (classes)				
	100-81 (I)	80-61 (II)	60-41 (III)	40-21 (IV)	< 20 (V)
Classificação do maciço rochoso	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco
Tempo médio sem sustimento	20 anos para 15 m de vão livre	1 ano para 10 m de vão livre	1 semana para 5 m de vão livre	10 horas para 2,5 m de vão livre	30 minutos para 1 m de vão livre
Coesão do maciço rochoso (MPa)*	> 0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	< 0,1
Ângulo de atrito interno do maciço rochoso	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	< 15°
Carga admissível (T/m²)	600-440	440-280	280-135	135-45	45-30
Ângulo seguro de corte do talude (°) (Walthman, 2002)	> 70	65	55	45	< 40

*Estes valores aplicam-se apenas a taludes em maciços rochosos saturados e alterados.

Elaboraram-se adaptações desta classificação para outros fins (por exemplo, para a classificação SMR, classificação SRC, classificação DMR, etc.), casos esses que não serão tratados neste documento visto não se enquadrarem no objetivo desta tese.

Existem ainda propostas de correlações entre o valor do RMR e o módulo de deformabilidade (E_M) do maciço rochoso. Nicholson & Bieniawski (1990) desenvolveram uma

expressão empírica ([10]) para correlacionar o fator de redução do módulo de deformabilidade da rocha intacta (MRF) com o valor do RMR.

$$MRF = \frac{E_M}{E_r} = 0.0028 * RMR^2 + 0.9 * e^{\left(\frac{RMR}{22.28}\right)} \quad [10]$$

Em que,

E_M – módulo de deformabilidade do maciço rochoso

E_r – módulo de deformabilidade da rocha intacta

São ainda de referir as correlações apresentadas por (Figura 21):

- Serafim & Pereira (1983):

$$E_M(GPa) = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad [11]$$

- Bieniawski (1989):

$$E_M(GPa) = 2 * RMR - 10; RMR > 50 \text{ e } \sigma_c > 100MPa \quad [12]$$

- Hoek & Brown (1997)

$$E_M(GPa) = \frac{\sqrt{\sigma_c}}{10} * 10^{\left(RMR - \frac{10}{40}\right)}; \sigma_c \leq 100MPa \quad [13]$$

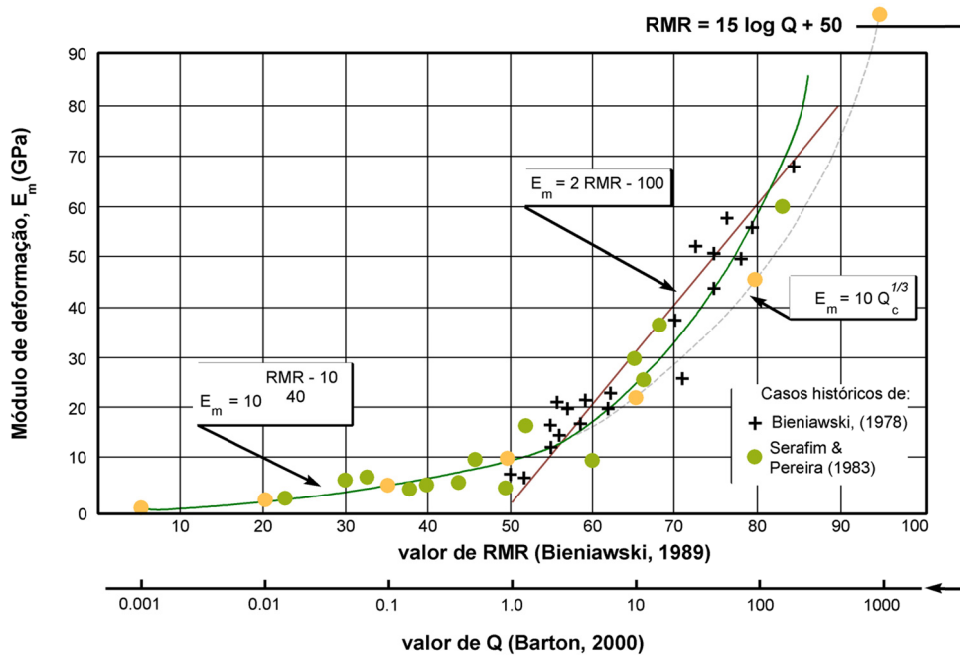


Figura 21. Módulo de deformabilidade (E_M) versus valores de RMR e de Q (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

O tempo médio de auto-suporte para túneis com teto em arco, pode ser obtido através do ábaco de Bieniawski (1989), Figura 22. Lauffer (1988) observou que o tempo de auto-suporte aumenta em túneis escavados com recurso à tuneladora TBM. Este aumento pode ser tido em consideração, aumentando uma classe ao resultado final do RMR.

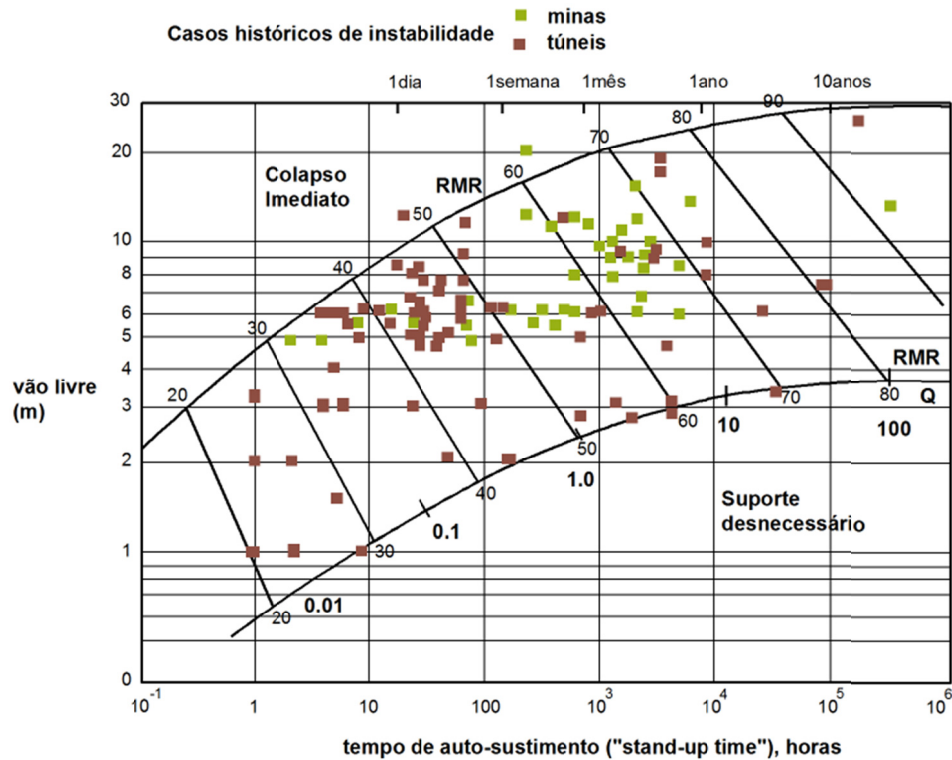


Figura 22. Ábaco do tempo de auto-suporte (horas) versus RMR, baseado em casos históricos segundo Bieniawski (1989). A conversão de RMR em Q segundo Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

2.3.3. Rock Tunnelling Quality Index (Q-system)

A classificação *Q-system* foi desenvolvida por Barton et al. (1974) no Instituto Geotécnico Norueguês, para a avaliação geomecânica do maciço rochoso e os requisitos para o suporte de túneis, tendo tido origem na análise de 212 casos de estudo de túneis na Escandinávia. A aplicação desta classificação é especialmente recomendado para túneis e cavernas com teto em forma de abóboda (Singh & Goel, 1999, 2011). O valor numérico do Q varia numa escala logarítmica entre 0,001 (para maciços de qualidade muito fraca) a 1.000 (para maciços de qualidade excepcional). Quando a qualidade do maciço varia marcadamente de local para local, é desejável classificar as zonas geotécnicas separadamente (Barton et al., 1974, 1980).

Este sistema é fundamentado em seis parâmetros classificativos da qualidade do maciço rochoso, estimados a partir da análise da superfície rochosa, podendo ser atualizado durante a execução da obra (Barton et al., 1974), Figuras 23 e 24:

- ✓ P1: Índice de qualidade (*RQD*)
- ✓ P2: Número de famílias de descontinuidades (J_n)
- ✓ P3: Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r)
- ✓ P4: Índice de alteração das descontinuidades (J_a)
- ✓ P5: Fator de redução do caudal (J_w)
- ✓ P6: Estado de tensão do maciço (*SRF*)

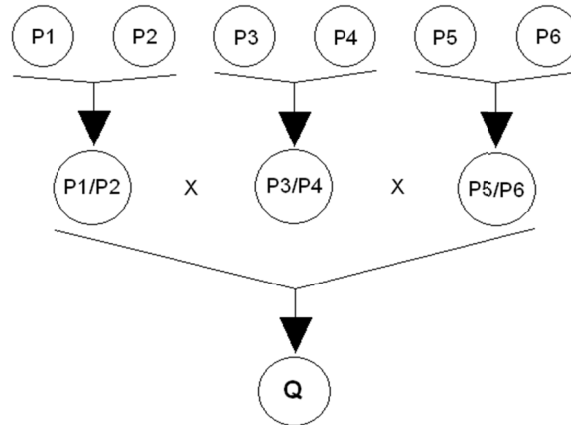


Figura 23. Representação gráfica da obtenção do valor de Q-system (adaptado de Miranda et al., 2006).

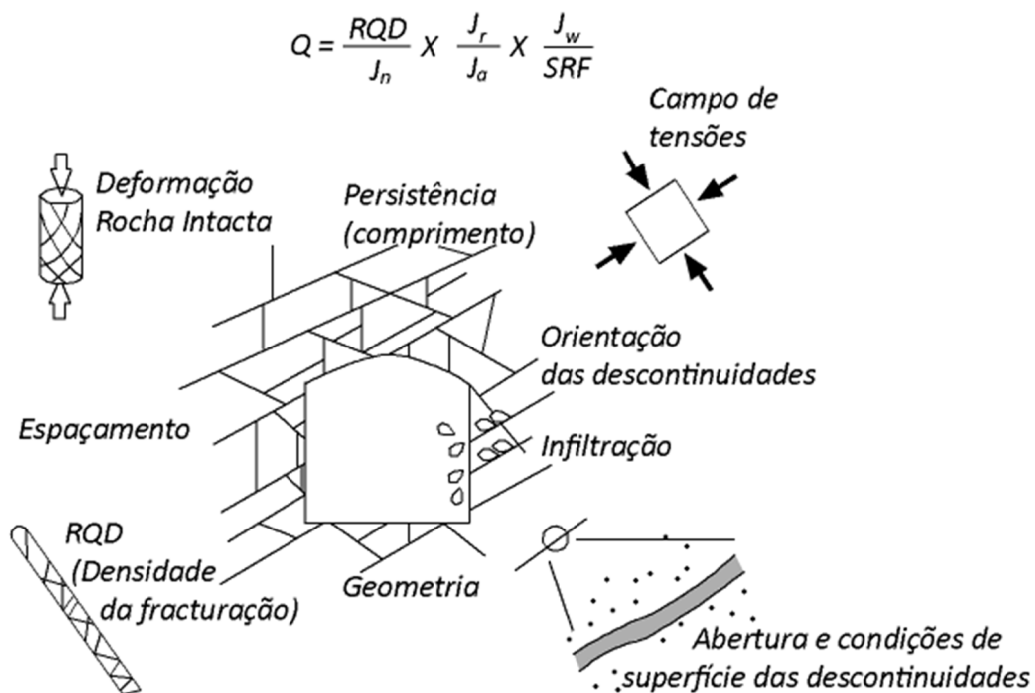


Figura 24. Visão de conjunto dos parâmetros que são considerados no Q-system (adaptado de Barton, 2007).

A expressão [14] traduz o cálculo do índice Q, a qual pode ser definida pela multiplicação de três parâmetros: compartimentação do maciço (RQD/J_n), resistência ao corte (J_r/J_a) e tensão ativa (J_w/SRF).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad [14]$$

O primeiro quociente representa a estrutura da massa rochosa e a medida do bloco-unitário. O valor de J_n aumenta a par do aumento do tamanho do túnel, caso sejam encontradas novas famílias de descontinuidades. O segundo quociente representa as características de rugosidade e o atrito das paredes das descontinuidades e materiais nelas contidas. Este valor aumenta com a rugosidade e diminui com a alteração da superfície das descontinuidades. O terceiro quociente traduz um fator empírico que descreve o estado de tensão do maciço (Barton et al., 1974, 1980).

Cada parâmetro que compõe os elementos, irá corresponder a um valor tabelado consoante a sua avaliação. Nos Quadros 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam-se os seis parâmetros intervenientes na classificação Q-system.

Quadro 19 Índice de qualidade da rocha, RQD (adaptado de Deere et al., 1967 e de Barton et al., 1974).

<u>Qualidade da rocha</u>	<u>RQD (%)</u>	<u>Notas</u>
A. Muito fraca	0-25	
B. Fraca	25-50	<i>i) Quando RQD é ≤ 10 (incluindo 0), o valor a adoptar é 10.</i>
C. Razoável	50-75	
D. Boa	75-90	<i>ii) A adoção de valores com intervalos de 5 é suficientemente adequada.</i>
E. Excelente	90-100	

Quadro 20. Número de famílias de descontinuidades, J_n (adaptado de Barton et al., 1974).

<u>Número de famílias de descontinuidades</u>	<u>J_n</u>	<u>Notas</u>
A. Nenhuma, ou poucas descontinuidades	0,5-1,0	
B. Uma família	2	
C. Uma família e uma aleatória	3	
D. Duas famílias	4	i) Para interseções utilizar $3 \times J_n$
E. Duas famílias e uma aleatória	6	
F. Três famílias	9	ii) Para as bocas de entrada dos túneis utilizar $2 \times J_n$
G. Três famílias e uma aleatória	12	
H. Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços altamente fraturados	15	
I. Rochas esmagada, tipo solo	20	

Quadro 21. Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r (adaptado de Barton et al., 1974).

<u>Índice de rugosidade das descontinuidades</u>	<u>J_r</u>	<u>Notas</u>
a. Contacto das superfícies das descontinuidades		
b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento		
A. Descontinuidades descontínuas	4	i) As descrições referentes às alíneas a. e b. referem-se a escalas de amostragem de dimensões pequena e média, respetivamente
B. Rugosas e irregulares, onduladas	3	ii) Somar 1,0 se o espaçamento da família principal for maior que 3 m
C. Lisas onduladas	2	iii) $J_r = 0,5$ pode ser utilizado para descontinuidades estriadas contendo lineações, se estas estão orientadas de acordo com menor resistência
D. Estriadas onduladas	1,5	iv) Os valores de J_r e J_a devem ser obtidos aplicando-se à família de descontinuidades que for mais desfavorável para a estabilidade do ponto de vista da orientação e da resistência ao corte, τ (onde $\tau \approx \sigma_n \text{tg}(J_r/J_a)$)
E. Rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F. lisas, planas	1	
G. Estriadas, planas	0,5	
c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas		
H. Zonas contendo minerais argilosos com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1	
I. Zonas esmagadas, arenosas ou cascalhentas com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1	

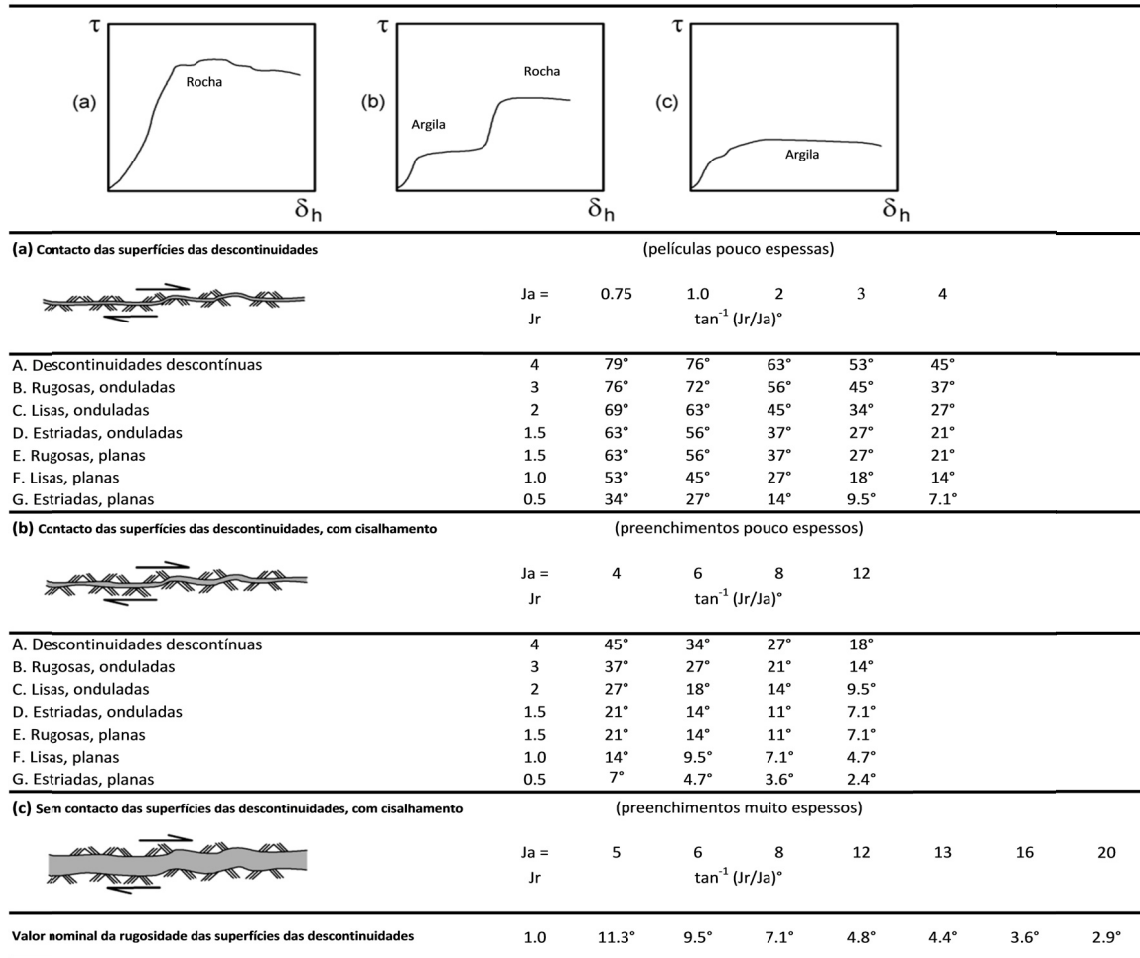
Quadro 22. Índice de alteração das descontinuidades, J_a (adaptado de Barton et al., 1974).

<u>Índice de alteração das descontinuidades</u>	<u>J_a</u>	<u>$\phi_r(^{\circ})$</u>	<u>Notas</u>
a. Contacto das superfícies das descontinuidades			
A. Paredes duras e compactas, enchimento impermeável	0,75	-	
B. Paredes não alteradas, somente com descoloração superficial	1,0	25-35	i) Os valores ϕ_r , ângulo de atrito residual, são entendidos como uma aproximação às propriedades mineralógicas dos produtos de alteração, se existentes
C. Paredes ligeiramente alteradas, películas minerais não brandas, partículas arenosas, etc	2,0	25-30	
D. Películas silto-arenosas ou silto-argilosas, pequena fração argilosa (não branda)	3,0	20-25	
E. Películas argilosas moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc. e pequenas quantidades de argilas expansivas.	4,0	8-16	
b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento			
F. Partículas arenosas, sem argila, rocha desintegrada, etc.	4,0	25-30	
G. Preenchimentos argilosos não brandos, sobreconsolidados (contínuo, espessura <5mm)	6,0	16-24	
H. Preenchimentos argilosos subconsolidado (contínuo, espessura <5mm)	8,0	12-16	
J. Preenchimentos argilosos expansivos, i.e., montmorilonite (contínuo, espessura <5mm)	8,0-12,0	6-12	
c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas			
K., L. Zonas ou bandas com M. rochas desintegradas ou esmagadas e argila (ver G, H e J para as condições argilosas)	6,0, 8,0 ou 8,0-12,0	6-24	
N. Zonas ou bandas de argilas siltosas ou arenosas, pequena fração argilosa, não brandas	5,0		
O. Zonas contínuas espessas ou bandas argilosas	10,0 – 13,0		
P. & R. (ver G, H e J. para condições argilosas)	6,0 – 24,0		

Quadro 23. Fator de redução do caudal, J_w (adaptado de Barton et al., 1974).

<u>Fator de redução do caudal</u>	<u>Pressão de água aproximada (MPa)</u>	<u>J_w</u>	<u>Notas</u>
A. Escavações secas ou caudal muito baixo, i.e., localmente <5L/min	< 0,1	1,0	
B. Caudal ou pressão médios que ocasionalmente arrastam o enchimento das descontinuidades	0,1-0,25	0,66	i) Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais; aumentar J_w se forem efetuadas drenagens
C. Caudal elevado ou pressão elevada em rochas competentes com descontinuidades sem preenchimento	0,25-1,0	0,5	
D. Caudal elevado ou pressão elevada	0,25-1,0	0,33	
E. Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	>1,0	0,2-0,1	ii) Problemas especiais originados pela formação de gelo não são considerados
F. Caudal ou pressão excepcionalmente elevados	>1,0	0,1-0,05	

Quadro 24. Síntese complementar dos parâmetros J_r e J_a estão claramente relacionadas com o comportamento da rocha (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).



Quadro 25. Estado de tensão do maciço, SRF (adaptado de Barton et al., 1974).

<u>Estado de tensão do maciço</u>	<u>SRF</u>	<u>Notas</u>		
a. Zonas de fraqueza interretando a escavação, o que pode causar perdas no maciço rochoso quando o túnel for escavado				
A. Ocorrências múltiplas de zonas de baixa resistência, contendo argilas ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (a qualquer profundidade)	10,0	i) Para a situação A. reduzir os valores de SRF de 25- 50%, apenas se as zonas de cisalhamento relevantes não interretarem a escavação.		
B. Zonas de baixa resistência, contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (profundidade <50m)	5,0			
C. Zonas de baixa resistência, contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (profundidade >50m)	2,5			
D. Zonas múltiplas de cisalhamento em rocha competente (sem argila), com rocha desintegrada na vizinhança (qualquer profundidade)	7,5			
E. Zona singular de cisalhamento em rocha competente (sem argila); (profundidade de escavação <50m)	5,0			
F. Zona singular de cisalhamento em rocha competente (sem argila); (profundidade de escavação >50m)	2,5			
G. Descontinuidades abertas, fracturação muito intensa (qualquer profundidade)	5,0			
<u>Estado de tensão do maciço</u>	<u>σ_c/σ_t</u>	<u>σ_1/σ_3</u>	<u>SRF</u>	<u>Notas</u>
b. Rocha competente, problemas de tensão na rocha				
H. Tensões baixas, próximo da superfície	>200	> 13	2,5	ii) Para campos de tensões virgens fortemente anisotrópicas (se medidas): quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduzir σ_c para $0,8\sigma_c$. Quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduzir σ_c e σ_t para $0,6\sigma_c$ e $0,6\sigma_t$, onde σ_c = resistência à compressão não confinada, σ_t = resistência de carga pontual (σ_1 e σ_3 são a tensão principal máxima e mínima, respetivamente)
J. Tensões médias	200-10	13 – 0,66	1,0	
K. Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	10-5	0,66-0,33	0,5-2	
L. Explosões moderadas de rochas maciças	5-2,5	0,33-0,16	5-10	iii) Sugere-se aumentar SRF de 2,5 a 5 para os casos em que a profundidade do coroamento é inferior à largura do vão (ver H.)
M. Explosões intensas de rochas maciças	<2,5	< 0,16	10-20	
<u>Estado de Tensão do maciço</u>	<u>SRF</u>	<u>Notas</u>		
c. Rocha esmagada, fluxo plástico de rocha incompetente sob influência de elevada pressão rochosa				
N. Pressão moderada de esmagamento	5-10			
O. Pressão elevada de esmagamento	10-20			
d. Rochas expansivas, atividade química expansiva devida à presença de água				
P. Pressão de expansão moderada	5-10			
Q. Pressão de expansão elevada	10-15			

O valor do *Q-system* relaciona-se com o comportamento da escavação e o suporte requerido, através da definição de um parâmetro adicional designado por *dimensão equivalente* (D_e) da escavação (Barton et al., 1974). A dimensão equivalente, que é função do tamanho e do propósito da escavação, é obtida pela razão apresentada na expressão [15] entre o vão livre (ou o diâmetro ou a altura da escavação), por um índice de segurança, o ESR – “*Excavation Support Ratio*”.

$$D_e = \frac{\text{Vão livre, diâmetro ou altura (m)}}{ESR} \quad [15]$$

O valor de ESR está relacionado com a finalidade de cada escavação e com o grau de segurança exigido pelo sistema de suporte instalado para manter a estabilidade da mesma. Barton et al. (1974) propõem os valores apresentados no Quadro 26.

Quadro 26. Tipos de escavação e valores de ESR – “Excavation Support Ratio” (adaptado de Barton et al., 1974).

<u>Classe</u>	<u>Tipo de escavação</u>	<u>ESR</u>
A	Cavidades mineiras temporárias	2,0-5,0
B	Cavidades mineiras definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos, túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades	1,6-2,0
C	Cavernas de armazenamento, estações de tratamento de águas, pequenos túneis rodoferroviários, túneis de acesso	1,2-1,3
D	Centrais elétricas, túneis rodoferroviários de grande dimensão, abrigos de defesa, bocas de entrada, interseções	0,9-1,1
E	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos-de-ferro, equipamentos de desporto ou públicos, fábricas, túneis para oleodutos de grandes dimensões	0,5-1,8

No caso de túneis escavados com recurso a tuneladora (tipo TBM), estes valores sofrem algumas alterações, devendo ser utilizados os do Quadro 27.

Quadro 27. Valor de ESR a considerar para túneis TBM (Barton, 2006; Hoek, 2007). Para o caso dos túneis de tráfego dever-se-á utilizar o valor 0,5 no caso de túneis longos destinados a comboios de alta velocidade e de tráfego automóvel.

<u>Tipo de Escavação</u>	<u>ESR</u>
Túneis piloto	2
Túneis para água e esgotos	1,5
Túneis de tráfego	0,5 a 1,0

Utilizando os valores de *Q*-system e da dimensão equivalente no ábaco da Figura 25 é possível determinar a categoria do suporte definitivo requerido.

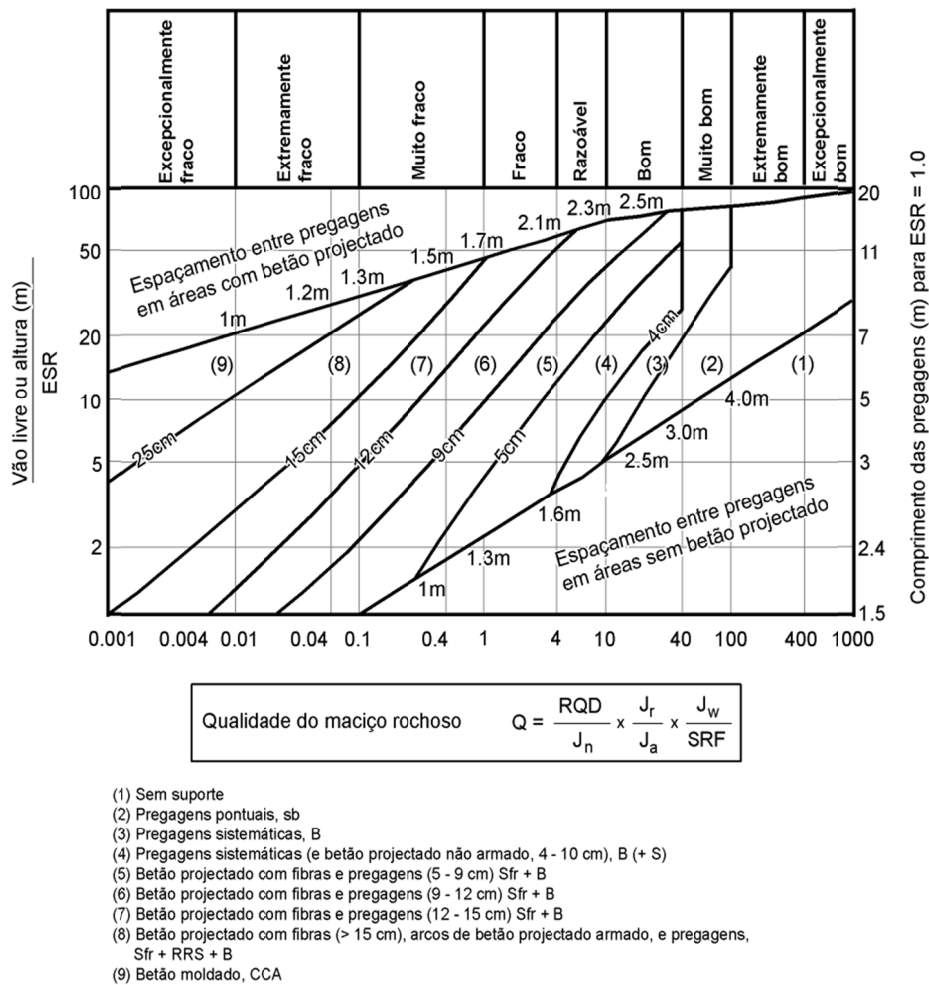


Figura 25. Ábaco para determinação do *Q*-system e da categoria do suporte (adaptado de Barton et al., 1974; Barton, 2000; Grimstad & Barton, 1993).

O valor de ESR permite também a obtenção de outros parâmetros. Barton et al. (1974) propuseram a relação apresentada na expressão [16] para a determinação do vão máximo (auto-portante), *L*:

$$L = 2 * ESR * Q^{0.4} \quad [16]$$

É ainda possível estimar o comprimento das pregagens/ancoragens a aplicar, através da largura da escavação (*B*), do valor de ESR e da altura da escavação (*H*) (Quadro 28).

Quadro 28. Cálculo do comprimento de pregagens e ancoragens a partir de B, ESR e H (adaptado de Barton et al., 1974).

	<u>Pregagens</u>	<u>Ancoragens</u>
Teto	$L(m) = 2 + \frac{0.15 * B}{ESR}$	$L(m) = \frac{0.40 * B}{ESR}$
Hasteal	$L(m) = 2 + \frac{0.15 * H}{ESR}$	$L(m) = \frac{0.35 * B}{ESR}$

Tal como na classificação RMR, existe uma correlação entre o índice Q e o módulo de deformabilidade (E_m) do maciço rochoso (Barton et al., 1980; Barton & Quadros, 2002), que se apresentam nas expressões [17] e [18]:

$$E_M(GPa) = 25 * \log(Q); \quad Q > 1 \quad [17]$$

$$E_M(GPa) = 10 * Q^{0.36} \quad [18]$$

2.3.3.1. Correlação RMR – Q

As classificações RMR e *Q-system* foram desenvolvidas com um propósito comum da avaliação dos maciços rochosos com base numa caracterização geotécnica qualitativa e semi-quantitativa e ensaios geomecânicos quantitativos (Bieniawski, 1989; Barton, 2006; ISRM, 2007). A sua aplicação é igualmente eficaz, quer em rochas de boa qualidade geotécnica, quer em rochas de má qualidade.

Os sistemas de classificação referidos encontram-se bem adaptados para a fase de projeto de escavações subterrâneas, apoiado como avaliação prévia do túnel assente, entre outros, em estudos de campo de geociências de engenharia, de geofísica aplicada, de ensaios geomecânicos e de sondagens com recuperação de rocha. Estes sistemas, apesar de empíricos, fornecem estimativas realistas para fins de modelação geomecânica, apoiada por geofísica (em particular, métodos sísmicos) que poderá auxiliar na caracterização das zonas geotécnicas de qualidade mais fraca. Tal como destacam Barton & Bieniawski (2008) “(...) after 35 years of use throughout the world in tunnelling and mining, the record of the RMR and Q systems in geological and engineering practice speaks for itself. These two systems have become entrenched as the most effective empirical design tools for determination of rock mass quality and estimating rock mass properties and tunnel support measures”. Não obstante, é essencial que o seu uso prossiga durante a execução da obra sendo indispensável a monitorização e o registo através da aplicação de, pelo menos, uma das classificações durante a obra, de forma a quantificar as novas condições

encontradas e a adequar os métodos de suporte ao maciço (Bieniawski, 1989; Barton, 2007; Barton & Bieniawski, 2008).

A similaridade existente entre as duas classificações acima mencionadas, dever-se-á ao uso de parâmetros análogos no cálculo da qualidade do maciço rochoso. Ambas consideram o fluxo de água e incluem a componente da resistência. A geologia e a geometria são igualmente contabilizadas, apesar de a abordagem ser ligeiramente diferente (Barton & Bieniawski, 2008). A grande dissemelhança entre o sistema Q e o RMR fundamenta-se na adoção de diferentes pesos para os mesmos parâmetros e no uso de um ou outro fator desigual. O método RMR utiliza diretamente a resistência à compressão uniaxial do material-rocha enquanto o sistema Q considera a resistência em relação à tensão *in situ* da rocha competente.

A comparação e correlação entre estes dois sistemas de classificação, estabeleceram-se a partir do estudo de 111 casos provenientes de diferentes continentes (Bieniawski, 1989). Desta forma, foram desenvolvidas diversas expressões ao longo dos anos, por diferentes autores, tal como consta no Quadro 29.

Quadro 29. Exemplos de correlações entre Q-system e RMR estabelecidas por diferentes autores.

<u>Proposta correlação RMR vs. Q</u>	<u>Autores</u>
RMR = 5,9.lnQ + 43	Rutledge & Preston (1978)
RMR = 5,4.lnQ + 55,2	Moreni (1980)
RMR = 5.lnQ + 60,8	Cameron-Clarke & Budavari (1981)
RMR = 10,5.lnQ + 41,8	Abad et al. (1984)
RMR = 9.lnQ + 44	Bieniawski (1989)
RMR = 15.logQ + 50	Barton (1995)

Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000) propuseram um ábaco que uniformiza os resultados para as correlações propostas por Barton (1989) e Bieniawski (1995), possibilitando uma consulta direta do ábaco da classificação Q, a partir do valor do RMR (Figura 26).

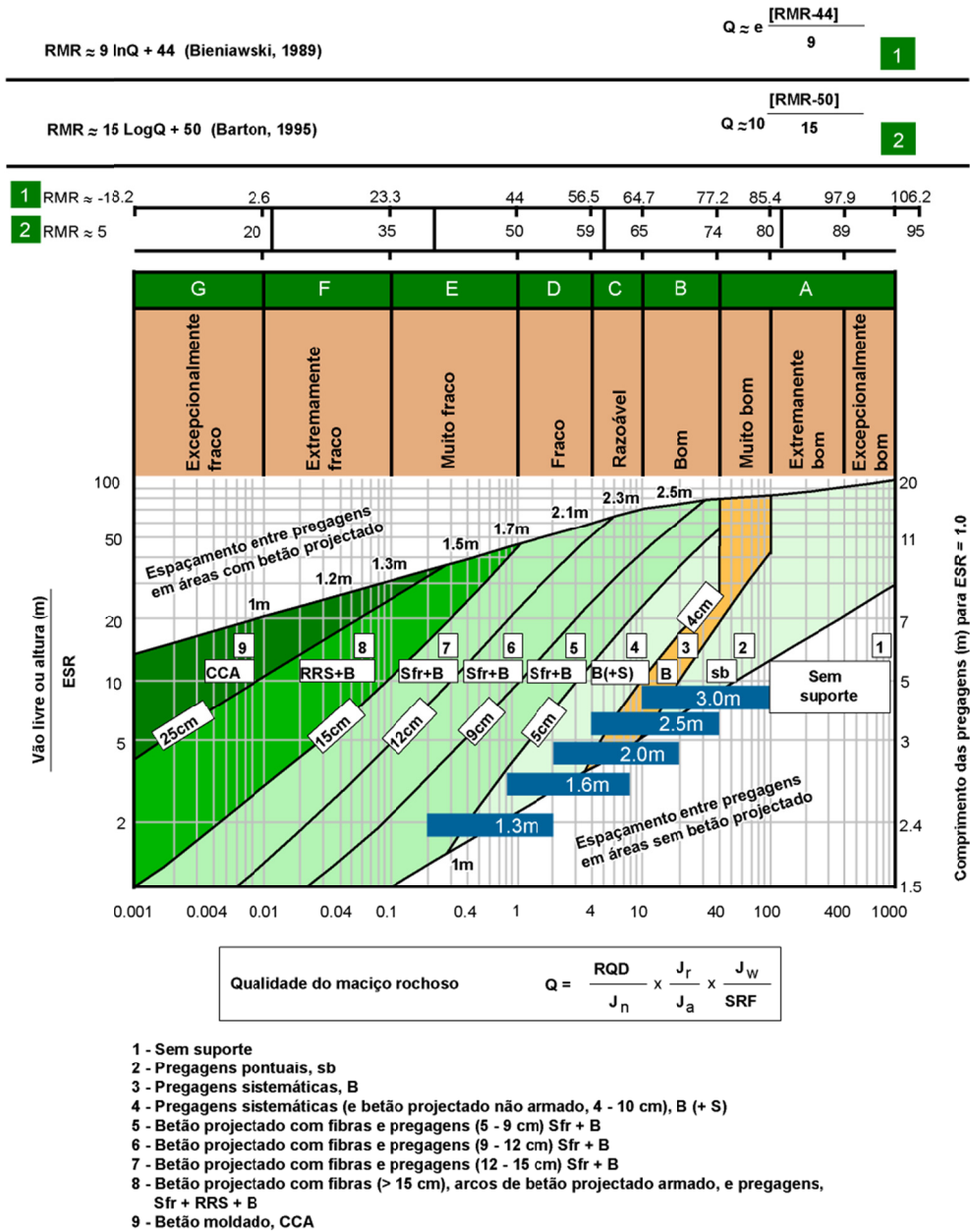


Figura 26. Ábaco com correlações do Q-system com o RMR, baseado nas propostas de Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

Para que esta correlação seja corretamente aplicada é impreterível que se alcance os seguintes pontos (Barton & Bieniawski, 2008):

- Assegurar que a recolha dos parâmetros classificativos seja fiável, através da execução de ensaios normalizados, da análise de amostras, do reconhecimento geológico e caracterização geotécnica, estudos de campo e de geofísica.
- Seguir os procedimentos estabelecidos pelas classificações Q-system e RMR e determinar corretamente os seus valores médios.

- Utilizar ambos os sistemas e confirmar com pelo menos duas correlações publicadas por Bieniawski e Barton.
- Estimar o suporte e os requisitos de reforço do maciço rochoso.
- Executar modelação numérica em casos apropriados e assegurar que a informação disponibilizada é suficiente.
- Ter em conta o processo construtivo e estimar a taxa de avanço no caso do uso da TBM.

2.3.4. Geological Strength Index (GSI)

O GSI – “Geological Strength Index” (*Índice Geológico de Resistência*) foi desenvolvido para complementar a aplicação do critério de rotura de Hoek & Brown (1980a,b, 1997) em materiais rochosos (competentes ou brandos). Tal como refere Singh & Goel (2011) os engenheiros e geólogos experientes geralmente mostram apetências por índices ou classificações simples, expeditas e confiáveis baseadas na inspeção visual das condições geológicas (Hoek, 1999; Bock, 2006). Neste índice, há seis classes principais qualitativas relacionadas com a geoestrutura, a maioria adaptada da classificação de Terzaghi (1946). O GSI pretende, assim, traduzir a qualidade geológico-geotécnica do maciço. Este valor desempenha, assim, um papel importante na definição das constantes intervenientes no critério de rotura de Hoek & Brown (1980a, 1997).

Em meados da década de 80, do século passado, foi desenvolvido um critério com intuito de fornecer informação para apoiar a análise geotécnica em projetos de escavações subterrâneas (Hoek & Brown, 1980a,b; Hoek et al., 1992, 2002; Hoek & Marinos, 2007 e referências nos trabalhos citados). Este traduz-se numa equação que apresenta um valor prático por estar formulada a partir de parâmetros estimados através de estudos geológicos de campo. O critério original de Hoek & Brown (1980a,b) traduz-se, então pela expressão [19] e pressupõe que a rotura da massa rochosa é controlada por processos dinâmicos (seja de translação e/ou de rotação) nos blocos de rocha intacta separados por descontinuidades.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c * \left(m_i * \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{1/2} \quad [19]$$

onde:

σ'_1 - tensão efetiva principal máxima à rotura

σ'_3 - tensão efetiva mínima à rotura

m_i, s - constantes do material; $s = 1$, para o material rochoso

σ_c - resistência à compressão simples da rocha intacta

Ao longo destes últimos decénios, o critério de Hoek & Brown (1980a,b) sofreu adaptações e melhoramentos, generalizando-se a expressão anterior na seguinte expressão [20], que se denomina por critério generalizado de Hoek & Brown (Hoek et al., 2002):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c * \left(m_b * \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [20]$$

onde:

m_b – valor reduzido do parâmetro m_i

s, a – constantes que dependem do material-rocha

Enquanto os valores apresentados na expressão [19] podem ser obtidos a partir de ensaios, os valores de m_b, s, a , são constantes aferidas através de correlações, a partir do valor do GSI, que varia entre 0 e 100. A qualidade do maciço rochoso a partir deste parâmetro pode ser avaliada da seguinte forma (Quadro 30).

Quadro 30. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek, 1994, 2007).

<u>GSI</u>	> 75	55-75	35-55	20-35	< 20
<u>Qualidade do maciço rochoso</u>	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco

Este índice é alcançado pela correlação com as classificações anteriormente descritas: RMR e *Q-system*. À exceção de maciços rochosos de má qualidade (RMR < 23), o valor do GSI pode ser estimado através do valor do RMR (considerando que a orientação das descontinuidades não influencia a escavação ou seja muito favorável, e que o peso relativo à presença de água seja de 15, i.e. seco), Hoek (2007). Deste modo, a relação entre os dois índices faz-se através da expressão [21]:

$$GSI = RMR - 5 \quad [21]$$

A utilização do valor do *Q* para obter o valor de GSI, também é condicionada, dado que é desprezado o efeito da tensão no maciço, sendo por isso calculado uma variante do seu valor, Q' , pela expressão [22] (Singh & Goel, 2011):

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} \quad [22]$$

2.3.5. *Hydro-Potential (HP) Value*

Em maciços rochosos fraturados o volume e o caudal de fluxo da água subterrânea dependem, entre outros, da abertura das fraturas e da sua rugosidade (e.g., Snow, 1969; Black, 1987; CFCFF, 1996; Wang, 2000; Hamm et al., 2007; Hsu et al., 2011). A abertura, estando relacionada com a porosidade, irá influenciar o volume. Por seu turno, a rugosidade irá determinar o caudal através do maciço rochoso. Estes parâmetros, abertura e rugosidade, são usados, como se viu anteriormente, em classificações geomecânicas para fins de escavações subterrâneas (Price, 2009; Scesi & Gattinoni, 2009). O fluxo de água subterrânea através dos maciços rochosos fraturados é controlado por diversas características físicas do maciço rochoso que se interrelacionam, nomeadamente, a heterogeneidade litológica, a qualidade da rocha, bem como diversos parâmetros hidrogeotécnicos relacionados com as descontinuidades (i.e., número, densidade, rugosidade, condutividade hidráulica, abertura, conectividade), (Gates, 1997, 2003).

Gates (1995, 1997, 2003) propôs o *Hydro-Potential (HP) value* como um índice hidrogeomecânico assente numa técnica semi-quantitativa aplicada para avaliar o potencial hidráulico em maciços rochosos, podendo ser adaptada para estimar infiltrações de água em escavações subterrâneas. O valor HP é o potencial para um maciço rochoso transmitir hidráulicamente água subterrânea. O método constitui uma técnica simples e rápida usada para avaliar o potencial geohidráulico nas vizinhanças de afloramentos rochosos e ainda os maciços intervencionados para efeitos construtivos de túneis (Gates, 1997; Price, 2009).

Esta técnica resulta de uma modificação do *Q-system* proposto por Barton et al. (1974) – e atualizações em Barton et al. (1980), Barton (2000, 2006) –, já descrita anteriormente. O método descreve seis características das descontinuidades, atribuindo um valor numérico a cada parâmetro com base em várias tabelas, que se apresentam mais adiante. O *Hydro-Potential value* (ou, simplesmente, *HP-value*) é dado pela expressão [24], (Gates, 1997, 2003):

$$HP_{value} = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) * \left(\frac{J_r}{J_k * J_{af}} \right) * J_w \quad [24]$$

Onde:

RQD - índice de qualidade da rocha

J_n - número de famílias de descontinuidades

J_r - índice de rugosidade das descontinuidades

J_{af} - fator de abertura e forma das descontinuidades

J_k - fator de condutividade hidráulica das descontinuidades

J_w - fator de percolação de água nas descontinuidades

Os valores numéricos de HP variam entre 1.33×10^{-3} , para maciços de muito fraca qualidade, e 800, para maciços de qualidade excelente. Descrevem-se seguidamente os seis parâmetros das descontinuidades que são considerados no cálculo do *HP-value*.

Relativamente ao *RQD*, o valor a utilizar poderá ser obtido quer a partir da classificação de Deere et al. (1967), apresentada no Quadro 3, quer por intermédio da correlação empírica [2] de Palmström (1975), ambas descritas no ponto 2.1.

No que diz respeito ao parâmetro J_n , número de famílias de descontinuidades, a sua avaliação é igual à proposta por Barton et al. (1974, 1980), pelo que a remetemos para o Quadro 20. Quanto ao índice de rugosidade das descontinuidades, o parâmetro J_r , a sua avaliação é, similarmente ao parâmetro J_n , igual à proposta por Barton et al. (1974, 1980), pelo que se remete esta para o Quadro 21.

No que toca ao fator de abertura e forma das descontinuidades, J_{af} , estas características são de extrema importância na avaliação do fluxo ao longo das descontinuidades. Gates (1997, 2003) adaptou as propostas de Hencher (1987) e Harp & Noble (1993) e propõe uma nova tabela que inclui as descontinuidades com aberturas no intervalo 0.1 mm a 20 mm, justificando que é tipicamente neste intervalo que se situam os túneis com elevados caudais e descontinuidades pouco abertas. De acordo com Gates (1997, 2003), o registo do percentil 90 da média das aberturas é suficiente. No Quadro 31 apresentam-se as descrições e os pesos propostos por Gates (1997, 2003) para o parâmetro J_{af} .

Quadro 31. Descrição e pesos para o parâmetro J_{af} (adaptado de Hencher, 1987; Harp & Noble, 1993; Gates, 1997, 2003).

Descrição	Pesos
Descontinuidades todas fechadas, < 0,1 mm	1,0
0,1 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 1,0 mm	1,2
1,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 5,0mm	1,4
5,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 10,0mm	1,8
10,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 20,0mm	2,5
20,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 50,0mm	5,0
50,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 100,0mm	7,5
100,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 200,0mm	10,0
Abertura de 90% das descontinuidades > 200,0mm	15,0

Relativamente ao J_k , fator de condutividade hidráulica das discontinuidades, este é importante, uma vez que a condutividade hidráulica das discontinuidades é função da presença ou ausência de preenchimento. As discontinuidades seladas com matéria mineral terão uma condutividade hidráulica muito baixa. Por outro lado, discontinuidades abertas e sem preenchimento terão um fluxo importante, devido à alta condutividade hidráulica (Gates, 1997, 2003). O Quadro 32 sintetiza as descrições e os pesos atribuídos ao parâmetro J_k . Os valores de condutividade hidráulica apresentados foram compilados de Freeze & Cherry (1979).

Quadro 32. Descrição e pesos para o parâmetro J_k (adaptado de Freeze & Cherry, 1979; Gates, 1997, 2003).

<u>Descrição</u>	<u>Pesos</u>	<u>Condutividade hidráulica (m/d)</u>
Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1,0	$< 10^{-5}$
90% das discontinuidades com preenchimento argiloso; baixo fluxo	2,0	$10^{-3} - 10^{-2}$
90% das discontinuidades com preenchimento silto-arenoso; fluxo moderado	3,0	$10^{-2} - 10^{-1}$
90% das discontinuidades preenchidas por areia ou cascalho; fluxo moderado a abundante	3,5	$10^{-1} - 10^3$
90% das discontinuidades sem preenchimento; fluxo abundante	4,0	$10^3 - 10^5$
90% das discontinuidades abertas e sem preenchimento; fluxo muito abundante	5,0	$> 10^5$

Por último, o fator de percolação de água nas discontinuidades, J_w , é uma medida da água que sai das discontinuidades e é inversamente proporcional à pressão da água nas discontinuidades (Barton et al., 1974, 1980). No Quadro 33 apresentam-se as descrições e os pesos atribuídos ao parâmetro J_w , tendo Gates (1997, 2003) adaptado e complementado as propostas de Barton et al. (1974, 1980) e Hencher (1987).

Quadro 33. Descrição e pesos do parâmetro J_w (adaptado de Barton et al., 1974; Hencher, 1987; Gates, 1997).

<u>Descrição</u>	<u>Gotas/min*</u>	<u>L/s</u>	<u>Pesos</u>
Seco	< 1	< 1×10^{-6}	1,0
Húmido	1 - 10	1×10^{-6} a 1×10^{-5}	0,94
Gotas	10 - 100	1×10^{-5} a 1×10^{-4}	0,86
Gotejante	>100	1×10^{-4} a 1×10^{-3}	0,76
Escorrência	-	1×10^{-3} a 1×10^{-2}	0,66
Fluxo ligeiro	-	1×10^{-2} a 1×10^{-1}	0,50
Fluxo moderado	-	1×10^{-1} a 1	0,33
Fluxo elevado	-	> 1	0,20

*Uma gota tem uma capacidade de, no mínimo, 1×10^{-6} litros.

De acordo com Gates (1997, 2003), esta classificação hidrogeomecânica pode ser usada para estimar caudais de água subterrânea, em meio fraturado, em túneis. De acordo com Gates (1997, 2003) e Scesi & Gattinoni (2009), se o *HP-value* for superior a 3, não são previsíveis fenômenos relevantes de circulação geohidráulica; por outro lado, se o *HP-value* for inferior a 3, o maciço rochoso terá, potencialmente, circulação geohidráulica, sendo o caudal, Q , estimado de acordo com a expressão [25].

$$Q (L/min) = 3,785 * (919,71e^{-2,314HP}) \quad [25]$$

2.3.6. Zonamento Geomecânico

A investigação integrativa de um dado maciço rochoso culmina, geralmente, com a proposta do zonamento geotécnico e, por fim, o estabelecimento de um modelo geotécnico concetual (e.g., Oliveira, 1986; Zuquette & Gandolfi, 2004; Galiza et al., 2011). Na primeira fase efetua-se um reconhecimento de campo para se definir os constrangimentos cartográficos e geológico-estruturais do maciço em estudo e área envolvente (especialmente, a caracterização das unidades geológicas regionais e/ou locais, a descrição e caracterização das litologias, a cartografia das macro e meso-estruturas, a identificação das zonas alteradas e cartografia das suas espessuras, a localização das exurgências/infiltrações de água, etc.). Complementa-se esta informação com a realização de uma série de ensaios “in situ” e laboratoriais para se definirem, com maior rigor, os valores dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso. Na fase seguinte procede-se à recolha, tratamento, análise e interpretação dos dados geológicos,

geotécnicos e geomecânicos do maciço. Recorre-se, como referido, a bases de dados geológico-geomecânicas (por exemplo: ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS; Galiza et al., 2011), as quais permitem efetuar cruzamentos sistemáticos de toda a informação e, assim, apoiar a interpretação de todos os geo-dados para o estabelecimento da cartografia de zonamento geotécnico. Esta abordagem integrativa permite estabelecer o modelo geotécnico do maciço em estudo.

A elaboração do zonamento geomecânico pretende avaliar a qualidade global do maciço recorrendo a uma síntese integrada: por um lado, com base, especialmente, nas feições geológicas, no zonamento geotécnico (ISRM, 2007) e nas propriedades geomecânicas (resistência, coesão, ângulo de atrito, deformabilidade, etc.) e, por outro lado, com a determinação baseada em sistemas multiparamétricos de índices geológico-geomecânicos (GSI), de classificações geomecânicas generalistas (RMR, *Q-system*, etc.) e de classificações geomecânicas específicas (e.g., *HP-value*, SMR, SRC, RME, QTBM, etc.). Assim, a partir desta síntese e da análise ponderada com base na similitude paramétrica dos resultados geomecânicos será possível uma divisão e sistematização em unidades geomecânicas que esboçam as zonas geomecânicas de um dado maciço rochoso.

A etapa seguinte será o estabelecimento de modelos geomecânicos comportamentais do maciço (antes e depois da obra), apoiados em modelos numéricos (e, se possível, calibrados) e, ainda, estudos de retro-análise (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Geotecnia e hidrogeomecânica do maciço
subterrâneo de Paranhos:
avaliação exploratória

3. Geotecnia e hidrogeomecânica do maciço subterrâneo de Paranhos: avaliação exploratória

3.1. Enquadramento regional

A região do Porto (Figura 28) situa-se num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (Chaminé et al., 2003). A área em estudo circunscreve-se ao longo da faixa de cisalhamento de Porto-Coimbra-Tomar, com direção geral NNW-SSE (Ribeiro et al., 2007).

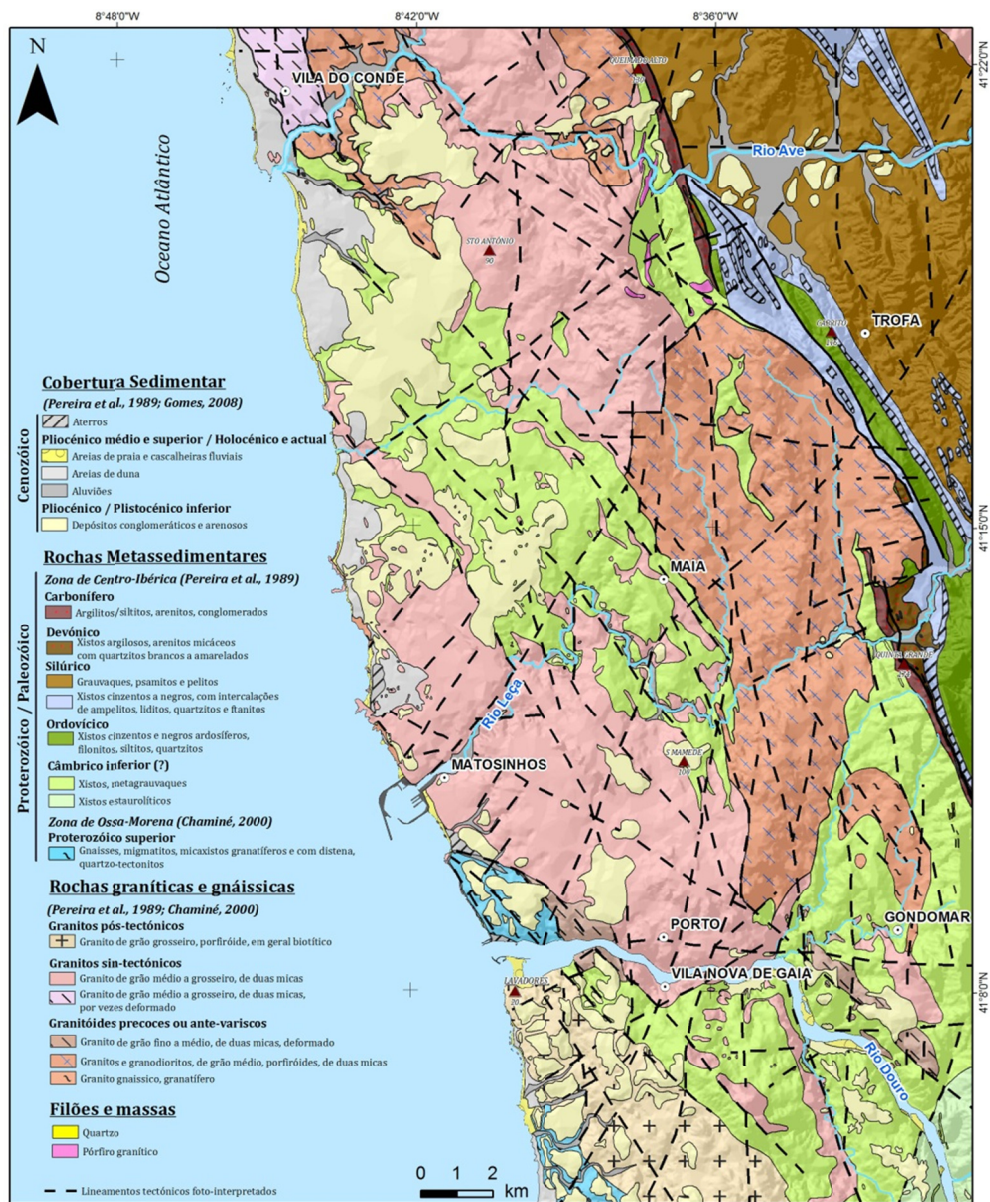


Figura 28. Esboço geológico regional da área urbana do Porto e envolvente (adaptado de Chaminé et al., 2003 e de Afonso, 2011).

De uma forma geral, a região do Porto é caracterizada pela preponderância 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 presença do granito do Porto emerge em grande parte na cidade do Porto, abrangendo ainda os concelhos de Vila Nova de Gaia, Matosinhos e Maia. Quanto à fracturação regional, revelam-se como dominantes as direções NW-SE e NE-SW, prevalecendo em termos de inclinação, as descontinuidades verticais e subverticais. Através da avaliação do estado de alteração, é exequível reconhecer que a consequência da meteorização das rochas graníticas da região é frequentemente comprovada pela arenização e/ou decomposição do maciço (cf. Begonha & Sequeira Braga, 1995, 2002; Begonha, 2001), podendo atingir profundidades na ordem dos 40 m.

Quanto à geomorfologia regional corresponde a uma extensa área aplanada – Plataforma Litoral - que se desenvolve a partir de cotas inferiores a 125 m, subindo ligeiramente para Sul do Porto (Araújo et al., 2003). A organização da rede de drenagem testemunha a tectónica da área, nomeadamente dos sistemas de fracturação regional (NW-SE a NNW-SSE, NE-SW a NNE-SSW e W-E; cf. Chaminé et al., 2003; Araújo et al., 2003), conferindo os traços morfoestruturais à região. Deste modo, estas estruturas maiores geram uma compartimentação tectónica que, por sua vez, condiciona a disposição das linhas de água, e consoante a litologia e a estrutura criam-se as redes hidrográficas, em geral, do tipo retangular e/ou dentítrico (Araújo et al., 2003). A linha de água que mais se destaca na região portuense é o rio Douro, que adota no seu troço terminal (ca. 7 Km) um orientação aproximada W-E, rodando para NNW-SSE na zona de confluência deste com o seu afluente da margem direita, o rio Tinto. Este apresenta uma orientação geral NNE-SSW.

A presença de recursos hídricos subterrâneos na região em estudo está condicionada, entre outras, pelas condições geológicas, morfoestruturais, tectónicas e hidroclimatológicas (Afonso, 2003, 2011). As unidades hidrogeológicas fundamentais correspondem às maiores unidades geológicas definidas, a saber (Afonso, 2011): i) *Depósitos de cobertura*, onde estão incluídos as aluviões e os depósitos de praias antigas e de terraços fluviais; ii) *Rochas metassedimentares*, das quais fazem parte os xistos, metagrauvaques e quartzitos; e iii) *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.

3.2. O Manancial de Paranhos no abastecimento de água à cidade do Porto

O abastecimento de água à cidade do Porto foi, durante pelo menos seis séculos, realizado à custa de numerosos cursos de água, nascentes, minas de água e/ou poços. 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., Rebelo da Costa, 1788; Bourbon e Noronha, 1885; Carteador Mena, 1908; Fontes, 1908; Carrington da Costa, 1938, Afonso et al., 2009; Chaminé et al., 2010; Afonso, 2011; e referências citadas nestes trabalhos). Esta brevíssima síntese e a descrição hidro-histórica das águas subterrâneas do manancial de Paranhos foi retomada de Afonso (2011).

O Manancial de Paranhos (da Arca d'Água ou das Três Fontes) constituiu uma das fontes mais importantes de abastecimento de água à cidade do Porto. A primeira obra de encanamento que permitiu conduzir a água deste manancial para o abastecimento de toda a cidade só foi possível a partir do alvará concedido pelo Rei Filipe I em 20 de Novembro de 1579, tendo sido esta obra concluída apenas em 1669. Contudo, são já conhecidas referências à localização deste manancial desde 1120 (Bourbon e Noronha, 1885; Fontes, 1908). As águas eram conduzidas a partir destas arcas em caleiras abertas sobre o granito, ou em tubos de ferro ou chumbo, indo alimentar várias fontes e chafarizes ao longo do percurso.

No ano de 1790 foram iniciados os trabalhos do aqueduto do Manancial de Salgueiros, o qual se viria a interseccionar com o novo traçado do aqueduto do Manancial de Paranhos, de modo a que as águas dos dois mananciais se juntassem para abastecer a cidade, o que só aconteceu em 1838 (Fontes, 1908).

A necessidade de colmatar a escassez de água face ao progressivo crescimento populacional, bem como de melhorar a sua qualidade, suscitou diversos pedidos de concessão para o abastecimento domiciliário de água (Marçal 1968, Cordeiro 1993). Assim, surge em 1880 a Compagnie Générale des Eaux pour l'Étranger, a qual foi responsável durante quarenta 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. Neste ano os SMAS deram lugar à empresa municipal Águas do Porto, EM, a qual é responsável até à data pela distribuição de água ao município do Porto.

3.3. Geologia e geotecnia subterrânea de Paranhos

O maciço granítico do Porto é muito heterogéneo no que diz respeito ao seu grau de alteração, podendo variar de rocha sã a decomposta (Begonha & Sequeira Braga, 2002; Gaj et al.,

2003). O maciço em que se encontram as galerias subterrâneas de Paranhos apresenta-se muito fraturado, com a possibilidade de preenchimento argiloso entre os planos de descontinuidade e um regime de percolação de água condicionado pelas características geológico-estruturais (Afonso, 2011).

Ao longo do traçado do túnel é possível identificar duas unidades geológicas distintas (Afonso, 2011; Martins, 2011): i) o *granito de duas micas*, de grão médio, por vezes ligeiramente deformado, com um grau de alteração global W_{1-2} a W_3 . Em alguns locais do traçado subterrâneo o granitóide encontra-se muito a completamente alterado (W_{4-5}). Foram observados locais onde existe intensa feldspatização e caulinição, apresentando o granito uma tonalidade esbranquiçada-amarelada. Na proximidade das descontinuidades e em zonas mais fraturadas ou até esmagadas, a alteração denota-se pela ocorrência de pontuações ferruginosas, o que confere um tom amarelo-acastanhado ao material. Existem descontinuidades que apresentam impregnações de sulfuretos o que confere as suas superfícies um aspeto amarelado. Refira-se, ainda, a ocorrência do mineral evansite (fosfato de alumínio hidratado), muito abundante, em especial, no preenchimento de diaclases e falhas, que exhibe um bandado pouco espesso com estrutura pisolítica ou estalagmítica, de cor branco-creme ou amarelo avermelhado (Rosas da Silva, 1936; Sanchez-Moral et al., 2011) e ii) *filões e/ou filonetes de quartzo leitoso*, com possanças que não ultrapassam os 30 cm, muito tectonizados.

As galerias subterrâneas de Paranhos perfazem uma extensão de 2200 m e dividem-se em dois túneis principais: o túnel 1, que se inicia na Rua de Costa e Almeida, junto ao Jardim de Arca d'Água (ou Praça 9 de Abril) e termina na Rua Nova do Regado; e o túnel 2, que se inicia na Rua de São Dinis e termina junto à estação de metro da Lapa.

A galeria subterrânea na qual se centrará esta dissertação será o túnel 2, a qual tem uma extensão de 1227 m (Figura 29), tendo sido objeto de estudos geológico-geotécnicos preliminares por Fernandes (2005) e Martins (2011). Nesta dissertação retomou-se os dados originais de Martins (2011) que resultaram de um levantamento geológico-geotécnico "in situ" de 1223 descontinuidades e da realização de 217 estações de ensaios à resistência à compressão uniaxial (UCS). Foi efetuada, em 4 pontos de amostragem pré-selecionados, no âmbito desta dissertação a colheita de amostras de granitóide representativas do maciço de Paranhos para se proceder a ensaios de resistência à carga pontual (PLT). Para o efeito, procedeu-se à recolha, em cada ponto de amostragem, mais de 30 Kg de material rochoso.

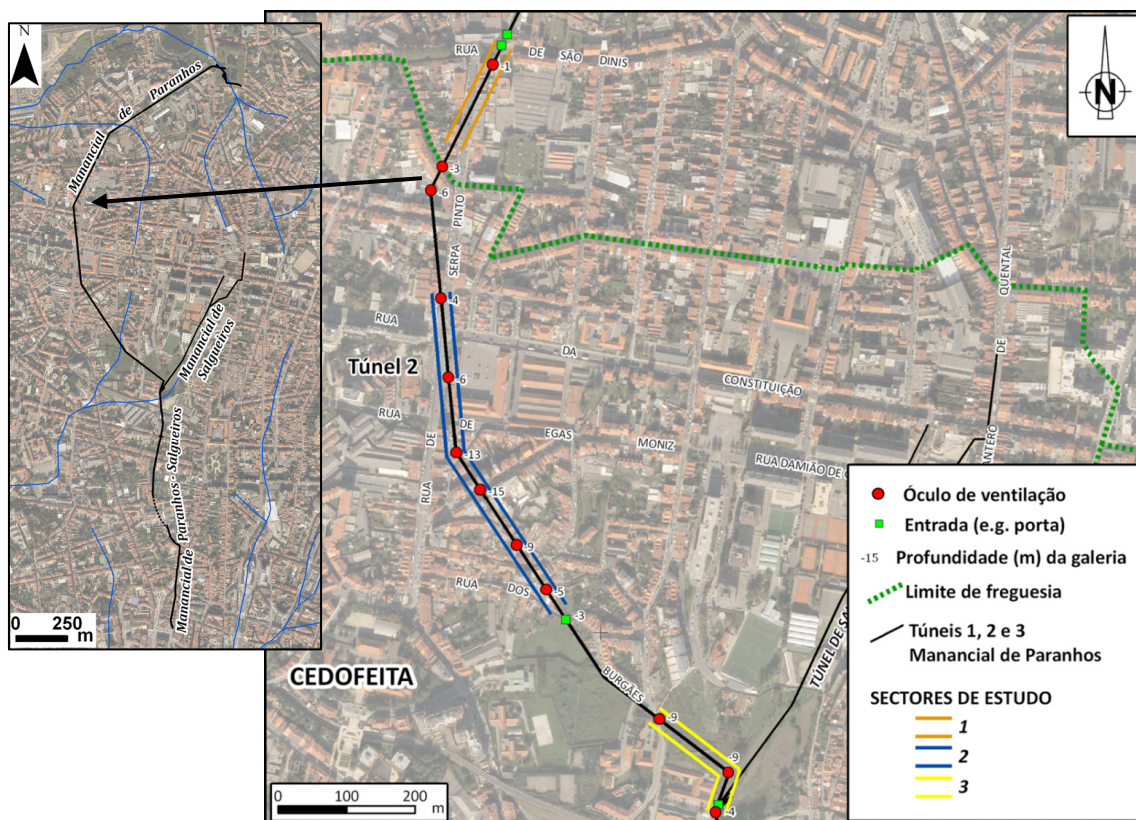


Figura 29. Traçado da galeria do manancial de Paranhos (Túnel 2) e envolvente, com a referência das três secções estudadas (imagem aérea: Google Earth Pro), adaptada de Martins (2011).

3.4. Zonamento geotécnico revisitado

Neste tópico apresentar-se-ão novos elementos geomecânicos, especialmente os resultados sobre a resistência à carga pontual, que permitiram refinar o zonamento geotécnico proposto por Martins (2011). Assim, serão inicialmente apresentados e discutidos os resultados provenientes de quatro amostras de material rochoso granítico representativo do túnel 2 e, seguidamente, será efetuada uma atualização e integração desses dados que permitiram propor um zonamento geotécnico revisitado.

3.4.1. Avaliação da resistência do material rochoso: ensaios PLT e UCS

A avaliação da resistência do material-rocha foi realizada por intermédio de dois ensaios, ambos executados em laboratório: o ensaio esclerométrico (UCS – Uniaxial Compressive Strength) e o ensaio de carga pontual (PLT – Point Load Test). Para tal, foi exaustivamente analisada toda a informação prévia, efetuados reconhecimentos “in situ” e, posteriormente, selecionados em pontos-chave quatro (4) pontos de amostragem para a recolha de rocha granítica no túnel 2, ou seja, um no setor 1, dois no setor 2 e um no setor 3, contemplando-se assim as zonas geotécnicas

definidas por Martins (2011), (Figura 30, Quadro 34). Os ensaios de carga pontual foram efetuados no Laboratório de Mecânica das Rochas do centro de prestação de serviços especializado Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do ISEP.



Figura 30. Ilustração de aspetos de campo durante a recolha de amostragem da rocha granítica para os ensaios laboratoriais.

Quadro 34. Síntese de aspetos geológicos e geotécnicos básicos, bem como informações sobre a localização dos pontos de amostragem para os ensaios PLT.

<u>ID</u>	<u>Data colheita</u>	<u>Galeria/Setor</u>	<u>Localização (m)</u>	<u>Zona Geotécnica</u>	<u>Litologia</u>	<u>Estrutura</u>	<u>Composição mineralógica (análise macroscópica)</u>	<u>Grau de alteração</u>
PLT 1		Túnel 2 - Setor 3	45-48	ZG3	Granito de grão médio a fino	Maciça	Quartzo, feldspato, micas (moscovite e biotite)	W ₁₋₂
PLT 2	07-05-2012	Túnel 2 - Setor 2	388	ZG1	Granito de grão médio a fino	Maciça	Quartzo, feldspato, micas (moscovite e biotite)	W ₃
PLT 3		Túnel 2 - Setor 2	135-145	ZG1	Granito de grão médio a fino	Maciça	Quartzo, feldspato, micas (moscovite e biotite)	W ₃
PLT 4		Túnel 2 - Setor 1	90	ZG2	Granito de grão médio a fino	Maciça	Quartzo, feldspato, micas (moscovite e biotite)	W ₃

Nota: As metragens indicadas na localização são relativas ao início de cada setor

Previamente à preparação dos blocos para o corte em provetes para a realização do ensaio de carga pontual (PLT), foi efetuado o ensaio esclerométrico expedito para se ter uma ideia do valor da resistência à compressão uniaxial da matriz rochosa. Assim, foram ensaiadas várias superfícies dos blocos, tendo-se realizado, para cada superfície, com exceção do ponto PLT1, 4 séries de 10 medições com o martelo de Schmidt, tipo L (Figura 32).

Quadro 35. Síntese dos ensaios esclerométricos (martelo de Schmidt, tipo L) nos provetes das amostras rochosas.

Ensaio esclerométrico nas amostras recolhidas para a realização do ensaio PLT																											
Data	ID	Superfície ensaiada	Orientação do martelo	Valores do ressoato (R)										Cinco maiores valores do ressoato (R)					Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Média da Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)						
22-05-2012	PLT1	2	↘	33	37	28	30	40	36	36	36	37	36	40	37	37	36	36	90	78	72	72	78	Elevada	S ₂		
		3	↘	30	37	35	39	34	40	40	44	43	37	44	43	40	43	40	39	110	108	90	84	96,4	Elevada	S ₂	
		8	↘	22	37	36	37	41	44	41	40	41	43	44	43	41	41	41	110	108	95	95	100,6	Elevada	S ₂		
	PLT2	1	↘	28	20	22	26	20	28	24	29	26	27	29	28	28	27	26	43	41	41	40	38	40,6	Média	S ₃	
		1	↘	25	28	27	32	26	26	21	25	24	25	32	28	27	26	26	50	43	40	38	38	41,8	Média	S ₃	
		1	↘	32	26	31	36	28	26	28	30	30	27	36	32	31	30	30	70	58	54	50	50	56,4	Média	S ₃	
		1	↘	28	24	22	26	32	23	26	34	26	26	34	32	28	26	26	64	58	46	42	42	50,4	Média	S ₃	
		2	↘	20	20	20	23	22	21	28	23	21	29	29	29	28	23	23	22	36	33	26	26	24	29	Média	S ₃
		2	↘	29	34	28	29	24	26	32	31	32	29	34	32	32	31	29	62	58	58	54	48	56	Média	S ₃	
		2	↘	25	28	24	26	22	32	26	24	24	32	32	32	28	26	26	58	58	46	42	42	49,2	Média	S ₃	
2		↘	28	28	27	26	25	30	30	30	30	26	32	32	30	30	28	50	45	45	45	41	45,2	Média	S ₃		
10-05-2012		PLT3	1	↘	38	40	50	38	44	38	30	44	38	36	50	44	44	40	38	130	98	98	79	71	95,2	Elevada	S ₂
			1	↘	39	28	34	31	32	32	30	24	35	36	36	35	34	32	39	63	60	55	50	78	61,2	Elevada	S ₂
	1		↘	31	32	30	37	38	31	29	30	36	37	38	37	37	36	32	71	68	68	63	50	64	Elevada	S ₂	
	1		↘	28	28	30	36	48	34	42	40	40	28	48	42	40	40	36	110	78	68	69	55	76	Elevada	S ₂	
	2		↘	30	24	30	36	22	34	20	40	32	32	40	36	34	32	32	90	70	62	58	58	67,6	Elevada	S ₂	
	2		↘	38	36	46	40	42	30	39	42	40	43	43	42	42	46	40	95	90	90	118	79	94,4	Elevada	S ₂	
	2		↘	32	28	39	31	34	32	31	30	35	33	39	35	34	33	32	78	60	55	52	50	59	Média	S ₃	
	2		↘	28	38	37	43	28	35	30	36	38	45	38	38	37	43	45	80	80	77	105	118	92	Elevada	S ₃	
	3		↘	44	38	32	39	43	36	36	41	44	44	44	44	44	44	43	41	98	98	98	95	84	94,6	Elevada	S ₂
	3		↘	44	39	39	52	46	44	32	46	32	40	52	44	44	46	46	150	98	98	118	118	116,4	Elevada	S ₂	
PLT4	3	↘	34	36	36	40	32	36	33	35	36	40	40	40	36	36	36	90	90	70	70	70	78	Elevada	S ₂		
	3	↘	31	27	30	34	30	30	36	28	31	33	36	34	33	31	70	62	59	54	54	59,8	Média	S ₃			
	4	↘	30	37	32	36	34	38	42	31	35	35	42	38	37	36	35	98	80	77	70	66	78,2	Elevada	S ₂		
	4	↘	32	26	26	32	26	36	28	34	28	30	36	34	32	32	30	70	62	58	58	50	59,6	Média	S ₃		
	4	↘	40	28	34	38	40	32	32	37	28	38	40	40	38	38	37	90	90	80	80	77	83,4	Elevada	S ₂		
	4	↘	29	34	38	20	28	28	31	33	35	36	38	36	35	34	33	80	70	66	62	59	67,4	Elevada	S ₂		
	1	↘	38	47	33	40	38	40	42	44	44	28	47	44	44	42	40	127	110	110	98	90	107	Elevada	S ₂		
	1	↘	32	38	44	34	50	38	37	32	46	35	50	46	44	38	38	145	120	110	80	80	107	Elevada	S ₂		
	1	↘	37	26	40	32	36	38	30	30	44	44	40	38	36	110	80	80	80	80	80	70	86	Elevada	S ₂		
	1	↘	48	26	39	42	38	34	41	38	36	35	48	42	41	39	38	130	98	90	82	80	96	Elevada	S ₂		
2	↘	26	32	46	31	30	38	37	37	34	28	46	38	37	37	34	120	80	77	77	62	83,2	Elevada	S ₂			
2	↘	38	49	42	39	40	30	40	32	56	38	56	49	45	40	40	180	130	105	79	79	114,6	Elevada	S ₂			
2	↘	36	44	26	30	40	32	28	42	32	26	44	42	40	36	32	110	98	90	70	58	85,2	Elevada	S ₂			
2	↘	32	33	44	34	32	44	38	38	47	45	44	44	44	47	45	38	110	110	130	105	80	107	Elevada	S ₂		

Os resultados obtidos permitem constatar que o material-rocha correspondente às amostras PLT1, PLT3 e PLT4 classifica-se na classe S_2 (resistência elevada; ISRM, 1981), com valores médios compreendidos entre 77,9 e 98,3 MPa. Por outro lado, o material-rocha da amostra PLT2 classifica-se na classe S_3 (resistência média; ISRM, 1981), com um valor médio de 46,1 MPa (Figura 31).

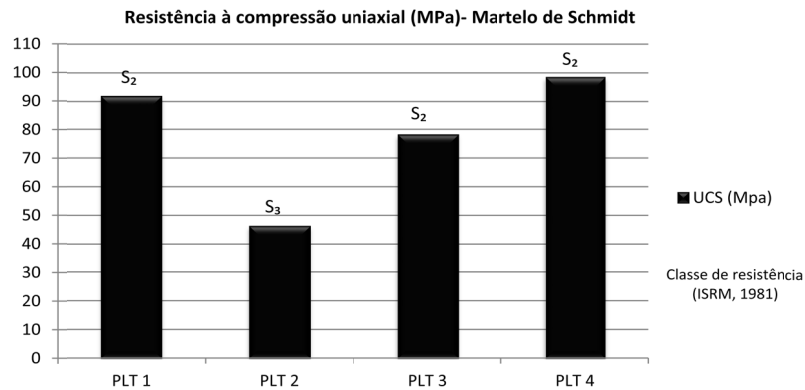


Figura 31. Resistência média à compressão uniaxial segundo o ensaio esclerométrico laboratorial para as amostras ensaiadas.

Para a avaliação da resistência por intermédio do ensaio de carga pontual (PLT), os blocos foram previamente lavados e secos e, posteriormente, transformados em 60 provetes de forma prismática com as dimensões aproximadas de 100x50x50 mm, as quais foram medidas com um paquímetro digital eletrónico *Controls*, modelo 82-C0109/1, tal como consta do procedimento previsto pela ISRM (1985) e como referido anteriormente (Figura 32).



Figura 32. Ilustração das várias etapas para a realização do ensaio de carga pontual (PLT), desde a preparação e corte dos provetes até à realização do ensaio.

Dos 60 provetes apenas seis (6) apresentaram fissuras pouco relevantes, sendo que os restantes demonstraram possuir uma estrutura maciça e regular. Para cada amostra ensaiaram-se 15 provetes, os quais foram colocados entre duas ponteiras de aço cónicas e comprimidos até atingirem a rotura. Houve o cuidado de escolher as faces mais regulares dos blocos para a execução do ensaio, tendo sempre em consideração a relação $W/D \leq 1$, tal como preconiza a norma ISRM (1985). Não foram registados ensaios nulos (quadros 36, 37,38 e 39).

Quadro 36. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT1 (setor 3).

LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (LGMCI ISEP)														
Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test)														
Local: Túnel 2 (Rua Nova do Regado - Rua de Burgães), Setor 3, 45-48m											Data: Maio de 2012			
Litologia: Granito de grão médio a fino, de duas micas											Oper.: MM			
Ensaio: provetes prismáticos											Verif.: HIC / MJA			
Amostra	Localização (m)	Provete # ID	Dimensões			De (mm)	P(KN)	Is (MPa)	F (mm)	IS ₍₅₀₎ (MPa)	Valor médio de IS ₍₅₀₎ (MPa)	Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	Classe de resistência, S (ISRM, 1981)	Observações
			L (mm)	W (mm)	D (mm)									
PLT 1		1	100,21	48,78	51,97	56,83	8,50	2,63	1,06	2,79	3,86	84,85	S2	
		2	98,74	50,43	47,54	55,26	9,00	2,95	1,05	3,08				
		3	101,70	52,70	44,13	54,43	16,00	5,40	1,04	5,61				
		4	98,23	50,32	46,26	54,46	9,50	3,20	1,04	3,33				fissura diagonal
		5	101,08	51,80	51,83	58,48	18,00	5,26	1,07	5,65				
		6	100,44	51,58	51,34	58,08	11,00	3,26	1,07	3,49				
		7	99,55	51,29	45,55	54,55	16,50	5,54	1,04	5,77				
		8	103,76	56,33	44,75	56,67	15,50	4,83	1,06	5,11				
		9	105,40	48,67	48,10	54,61	10,50	3,52	1,04	3,66				
		10	101,19	52,80	46,34	55,83	10,00	3,21	1,05	3,37				
		11	99,39	50,07	50,31	56,65	9,00	2,80	1,06	2,97				fissura paralela a face maior
		12	101,54	50,39	52,83	58,23	12,00	3,54	1,07	3,79				
		13	100,71	45,01	46,57	51,67	9,00	3,37	1,01	3,42				fissura paralela a face menor
		14	100,64	50,73	49,73	56,69	10,50	3,27	1,06	3,46				
		15	100,82	51,08	50,31	57,22	10,50	3,21	1,06	3,41				
Nota explicativa:														
L	comprimento do provete					Fórmulas (ISRM):				P	carga de rotura			
W	largura do provete					$De = (4 * W * D) / \pi$				F	fator de correção obtido			
D	altura do provete									Is				índice de resistência à carga pontual
De	diâmetro equivalente da amostra					IS ₍₅₀₎				valor corrigido				
											$Is = \frac{P}{De^2}$		$F = \left(\frac{De^{0.45}}{50}\right) \approx \sqrt{\frac{De}{50}}$	
											$IS_{(50)} = F \times Is$			

Quadro 37. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT2 (setor 2).

LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (LGMCI ISEP)														
Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test)														
Local: Túnel 2 (Rua Nova do Regado - Rua de Burgães), Setor 2, 388m											Data: Maio de 2012			
Litologia: Granito de grão médio a fino, de duas micas											Oper.: MM			
Ensaio: provetes prismáticos											Verif.: HIC / MJA			
Amostra	Localização (m)	Provete # ID	Dimensões			De (mm)	P(KN)	Is (MPa)	F (mm)	IS ₍₅₀₎ (MPa)	Valor médio de IS ₍₅₀₎ (MPa)	Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	Classe de resistência, S (ISRM, 1981)	Observações
			L (mm)	W (mm)	D (mm)									
PLT 2		1	99,51	50,57	50,70	57,15	6,00	1,84	1,06	1,95	2,13	46,92	S3	
		2	100,39	50,67	52,76	58,36	8,00	2,35	1,07	2,52				
		3	102,50	53,99	49,60	58,41	7,00	2,05	1,07	2,20				
		4	100,73	54,86	50,33	59,31	3,00	0,85	1,08	0,92				
		5	96,06	48,78	51,70	56,68	6,00	1,87	1,06	1,98				
		6	98,60	49,30	49,65	55,84	4,00	1,28	1,05	1,35				
		7	103,38	50,94	52,13	58,16	8,00	2,36	1,07	2,53				
		8	101,86	50,45	46,65	54,75	7,50	2,50	1,04	2,61				
		9	98,76	51,95	49,41	57,18	10,00	3,06	1,06	3,25				
		10	102,04	50,76	43,47	53,02	5,00	1,78	1,03	1,83				
		11	100,74	50,79	48,84	56,21	7,00	2,22	1,05	2,34				
		12	100,40	51,33	50,03	57,20	7,00	2,14	1,06	2,27				
		13	102,40	48,64	48,40	54,76	5,00	1,67	1,04	1,74				
		14	103,08	48,87	47,42	54,33	8,00	2,71	1,04	2,81				
		15	101,35	55,62	50,97	60,09	5,00	1,38	1,09	1,50				
Nota explicativa:														
L	comprimento do provete					Fórmulas (ISRM):				P	carga de rotura			
W	largura do provete					$De = (4 * W * D) / \pi$				F	fator de correção obtido			
D	altura do provete									Is				índice de resistência à carga pontual
De	diâmetro equivalente da amostra					IS ₍₅₀₎				valor corrigido				
											$Is = \frac{P}{De^2}$		$F = \left(\frac{De^{0.45}}{50}\right) \approx \sqrt{\frac{De}{50}}$	
											$IS_{(50)} = F \times Is$			

Quadro 38. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT3 (setor 2).

LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (LGMC ISEP)														
Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test)														
Local: Túnel 2 (Rua Nova do Regado - Rua de Burgães), Setor 2, 135-145m											Data: Maio de 2012			
Litologia: Granito de grão médio a fino, de duas micas											Oper.: MM			
Ensaio: provetes prismáticos											Verif.: HIC / MJA			
Amostra	Localização (m)	Provete # ID	Dimensões			De (mm)	P(KN)	Is (MPa)	F (mm)	Is(50) (MPa)	Valor médio de Is(50) (MPa)	Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	Classe de resistência, S (ISRM, 1981)	Observações
			L (mm)	W (mm)	D (mm)									
PLT 3		1	98,24	52,44	47,90	56,57	14,50	4,53	1,06	4,79	2,77	60,84	S2	Fissura oblíqua
		2	99,14	49,40	48,95	55,50	4,00	1,30	1,05	1,36				
		3	98,11	53,70	48,53	57,62	12,50	3,77	1,07	4,01				
		4	101,17	50,89	48,39	56,01	13,00	4,14	1,05	4,36				
		5	99,80	47,55	47,28	53,52	9,00	3,14	1,03	3,24				
		6	98,18	49,95	46,25	54,25	12,00	4,08	1,04	4,23				
		7	98,59	51,60	50,02	57,34	9,50	2,89	1,06	3,07				
		8	94,97	54,54	53,76	61,12	6,50	1,74	1,09	1,90				
		9	97,32	48,57	46,28	53,51	5,00	1,75	1,03	1,80				
		10	98,19	51,89	49,91	57,44	9,00	2,73	1,06	2,90				
		11	101,03	51,42	50,60	57,57	8,00	2,41	1,07	2,57				
		12	97,23	50,24	48,39	55,65	8,00	2,58	1,05	2,71				
		13	102,61	51,48	47,65	55,90	5,00	1,60	1,05	1,68				
		14	100,22	50,13	51,57	57,39	5,50	1,67	1,06	1,78				
		15	99,87	54,33	50,53	59,14	7,50	2,14	1,08	2,31				

Nota explicativa:													
L	comprimento do provete			Fórmulas (ISRM):				P	carga de rotura		$Is = \frac{P}{De^2}$ $F = \left(\frac{De^{0,665}}{50}\right) \approx \sqrt{\frac{De}{50}}$		
W	largura do provete			$De = (4 * W * D) / \pi$				F	fator de correção obtido				
D	altura do provete							Is		índice de resistência à carga pontual		$Is_{(50)} = F \times Is$	
De	diâmetro equivalente da amostra			Is(50)		valor corrigido							

Quadro 39. Ficha de laboratório para o ensaio PLT, amostra PLT4 (setor 1).

LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (LGMC ISEP)														
Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test)														
Local: Túnel 2 (Rua Nova do Regado - Rua de Burgães), Setor 1, 90m											Data: Maio de 2012			
Litologia: Granito de grão médio a fino, de duas micas											Oper.: MM			
Ensaio: provetes prismáticos											Verif.: HIC / MJA			
Amostra	Localização (m)	Provete # ID	Dimensões			De (mm)	P(KN)	Is (MPa)	F (mm)	Is(50) (MPa)	Valor médio de Is(50) (MPa)	Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	Classe de resistência, S (ISRM, 1981)	Observações
			L (mm)	W (mm)	D (mm)									
PLT 4		1	99,97	54,84	50,00	59,10	20,00	5,73	1,08	6,17	5,85	128,70	S2	
		2	95,59	51,70	47,00	55,64	15,50	5,01	1,05	5,25				
		3	101,42	51,38	51,09	57,83	16,00	4,78	1,07	5,11				
		4	97,62	49,29	49,25	55,61	17,00	5,50	1,05	5,77				
		5	97,72	51,22	55,60	60,23	18,00	4,96	1,09	5,40				
		6	101,12	48,42	51,00	56,09	18,00	5,72	1,05	6,03				
		7	96,54	49,08	49,16	55,44	17,00	5,53	1,05	5,79				
		8	100,16	52,28	50,54	58,02	18,50	5,50	1,07	5,88				
		9	97,77	52,86	47,15	56,35	16,00	5,04	1,06	5,32				
		10	102,18	51,53	52,28	58,58	20,00	5,83	1,07	6,26				
		11	103,00	44,68	44,99	50,60	14,00	5,47	1,01	5,50				
		12	101,57	52,03	51,26	58,29	19,00	5,59	1,07	5,99				
		13	93,99	51,63	50,85	57,83	17,50	5,23	1,07	5,59				
		14	98,35	50,85	50,91	57,43	21,00	6,37	1,06	6,78				
		15	93,48	48,44	51,46	56,35	21,00	6,61	1,06	6,98				

Nota explicativa:													
L	comprimento do provete			Fórmulas (ISRM):				P	carga de rotura		$Is = \frac{P}{De^2}$ $F = \left(\frac{De^{0,665}}{50}\right) \approx \sqrt{\frac{De}{50}}$		
W	largura do provete			$De = (4 * W * D) / \pi$				F	fator de correção obtido				
D	altura do provete							Is		índice de resistência à carga pontual		$Is_{(50)} = F \times Is$	
De	diâmetro equivalente da amostra			Is(50)		valor corrigido							

Para o cálculo do $Is_{(50)}$ (índice de carga pontual) foram excluídos dos resultados, tal como referido pela ISRM (1985), os dois valores mais elevados e dois valores mais baixos. Para avaliar o valor da resistência à compressão uniaxial (UCS') através de $Is_{(50)}$, utilizou-se as propostas pela ISRM (1985), i.e., pela via analítica ou algébrica (ver capítulo 2).

Os resultados obtidos permitem concluir que o material-rocha correspondente às amostras PLT1, PLT3 e PLT4 classifica-se na classe S_2 (resistência elevada; ISRM, 1981), com valores médios compreendidos entre 84,9 e 128,7 MPa. Contudo, a amostra PLT3 apresenta um valor médio de 60,8 MPa, colocando-a assim na fronteira entre as classes de resistência S_2 e S_3 . Por outro lado, o material-rocha da amostra PLT2 classifica-se na classe S_3 (resistência média; ISRM, 1981), com um valor médio de 46,9 MPa (Figura 33).

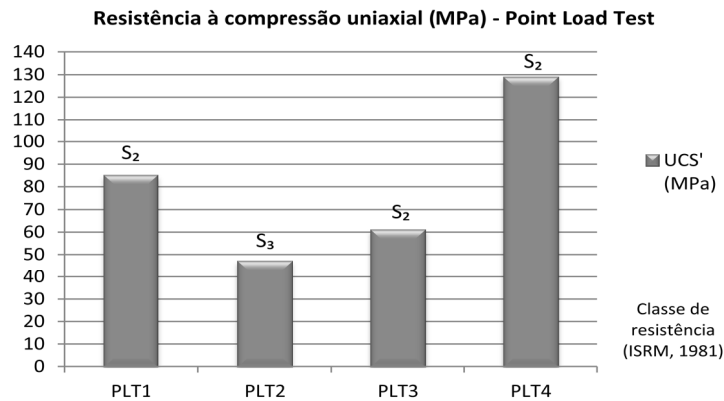


Figura 33. Resistência média à compressão uniaxial (UCS') segundo o ensaio de carga pontual para as amostras ensaiadas.

Comparando os resultados obtidos de resistência média à compressão uniaxial obtidos através do ensaio esclerométrico e do ensaio de carga pontual, verifica-se que estes são coerentes entre si (Figura 34). Contudo é possível verificar que nas amostras PLT3 e PLT4 existem ligeiras diferenças nos valores obtidos através dos dois ensaios.

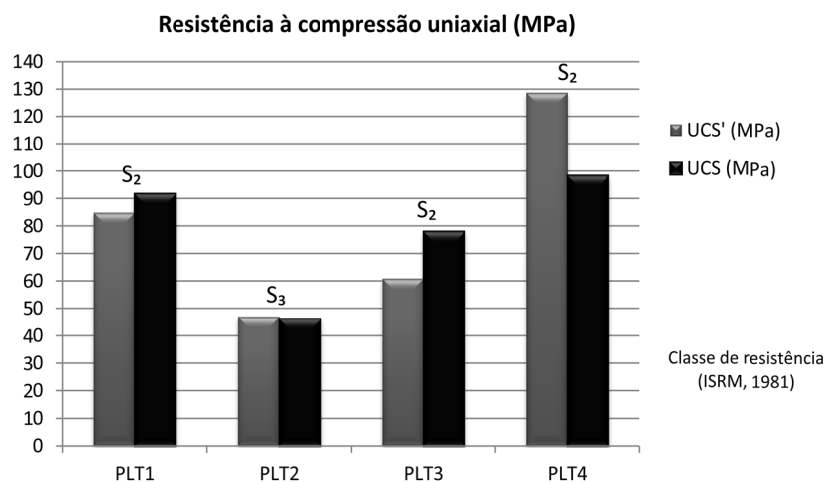


Figura 34. Resistência média à compressão uniaxial de acordo com os ensaios esclerométrico e PLT para as amostras ensaiadas.

3.4.2. Zonamento geotécnico revisitado

O zonamento geotécnico definido por Martins (2011) para o túnel 2 foi efetuado, essencialmente, com base na heterogeneidade litológica, no grau de alteração do maciço, no seu grau de fracturação, bem como na sua resistência à compressão uniaxial, a qual foi avaliada através do ensaio esclerométrico realizado *in situ*. Além de se terem ponderado os restantes parâmetros geológico-geotécnicos registados no campo (e.g., comprimento, preenchimento, rugosidade, curvatura, infiltração de água, etc.). Nesta síntese aproveitou-se para se proceder a uma revisão global de toda a informação de Martins (2011).

Desta forma, foi possível estabelecer intervalos de resistência nas imediações aos pontos de amostragem PLT1, PLT2, PLT3 e PLT4, considerando: i) os valores médios de resistência à compressão uniaxial obtidos anteriormente no material-rocha, e ii) os intervalos de valores avaliados *in situ* nas descontinuidades numa localização próxima aos pontos de amostragem (Quadro 40). Assim, os intervalos de resistência estimados para os pontos de amostragem PLT1, PLT2, PLT3 e PLT4 são, respetivamente, os seguintes: 55-85 MPa, 45-50 MPa, 55-75 MPa e 95-130 MPa. Estes novos intervalos de resistência à compressão uniaxial e os intervalos de resistência à carga pontual serão o ponto de partida para o refinamento do zonamento geotécnico preconizado por Martins (2011), que se descreve seguidamente.

Quadro 40. Síntese dos resultados obtidos da resistência nas superfícies das descontinuidades (“*in situ*”) e na matriz rochosa dos quatro pontos de amostragem.

Setor	Localização (m)	ID Amostra	Litologia / Grau Alteração	Descontinuidades		Matriz Rochosa		Classificação da Resistência	
				Ensaio Schmidt "in situ"	Ensaio Schmidt laboratório	Ensaio PLT - laboratório (ISRM, 1985)	Intervalo de resistência (MPa)	Classe de Resistência (ISRM, 1981)	
				UCS (MPa)	UCS (MPa)	I _{S(50)} (MPa)	UCS' (MPa)		
Setor 3	45-48	PLT1	Granito de grão médio a	57-64	91,67	3,86	84,85	55-85	S2
Setor 2	388	PLT2	fino, de 2 micas /	40-55	46,08	2,13	46,92	45-50	S3
Setor 2	135-145	PLT3	W3 a W2	69-80	77,93	2,77	60,84	55-75	S2
Setor 1	90	PLT4		115-120	98,25	5,85	128,7	95-130	S2

Ensaio de resistência à compressão uniaxial (UCS); Ensaio de resistência à carga pontual (PLT); Resistência à compressão uniaxial estimada (UCS')

Em termos globais, a revisão do zonamento geotécnico não introduziu qualquer alteração nos limites das zonas geotécnicas, nem nos graus de alteração e fracturação do maciço estabelecidos por Martins (2011), uma vez que os resultados obtidos em laboratório consolidam as definições anteriores. Por seu turno, os intervalos de resistência à compressão uniaxial

sofreram pequenos ajustes e são propostos, pela primeira vez, os intervalos de resistência à carga pontual.

❖ **Setor 1**

O setor 1 tem uma extensão de 140 m e uma direção aproximada de N30°E. Nesta secção foram recolhidos dados referentes a 202 descontinuidades (Martins, 2011).

No primeiro setor as zonas geotécnicas ZG1 e ZG3 mantiveram-se com as mesmas características, uma vez que não foi realizada qualquer amostragem nestas zonas. Por outro lado, para a zona geotécnica ZG2 foi possível reavaliar o intervalo de resistência à compressão uniaxial, uma vez que a amostra PLT4 se insere nesta zona. Desta forma, tendo em conta o intervalo definido por Martins (2011) para a ZG2, 85-100 MPa, e o intervalo apresentado no quadro 39, foi estabelecido uma nova gama consistente com as duas anteriores, 90-120 MPa (Quadro 41). Como se pode constatar, estes valores de resistência à compressão uniaxial mantiveram-se na mesma ordem de grandeza, posicionando o maciço na classe de resistência elevada (S_2), Figura 35.

Quadro 41. Descrição geral das zonas geotécnicas revisitadas do Setor 1 da galeria Carvalhido – Burgães

Zonamento Geotécnico - Setor 1					
Litologia	Zonas Geotécnicas	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Resistência à compressão uniaxial (S)/σ_c (MPa)	Grau de fracturação (F) / cm
Granito de grão médio a fino, de 2 micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos	ZG1	0-19,5	W_3 a W_2	S_3 / 40-55	F_{1-2} a F_3 / 75-50
		39,8-51,0			
	ZG2	96,8-120,5	W_3	S_2 / 90-120	F_3 / 40-50
		19,5-39,8			
	ZG3	51,0-91,2	W_3	S_3 a S_4 / 30-15	F_3 a F_{1-2} / 35-65
		91,2-96,8			
		120,5-139,9			

Quadro 42. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Setor 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), segundo Martins (2011).

Sector 1	Zona Geotécnica nº 1, ZG1_S1 (n= 61)	Zona Geotécnica nº 2, ZG2_S1 (n= 113)	Zona Geotécnica nº 3, ZG3_S1 (n= 28)
Tipo de descontinuidade	Falha 29,5% Diaclase 70,5%	Falha 18,6% Diaclase 81,4%	Falha 14,3% Diaclase 85,7%
Famílias principais	N 100° - 110° E; 80° - 90° NE N 130° - 140° E; 25° - 35° SW N 30° - 50° E; 70° - 80° NW	N 0° - 10° E; 40° - 60° NW N 110° - 130° E; 80° - 90° NE/SW N 50° - 60° E; 75° - 85° SE	N 50° - 60° E; 30° - 40° SE N 160° - 170° E; 80° - 90° NE/SW N 100° - 110° E; 0° - 20° NE/SW
Abertura	Fe. 80,3% Ab. 16,4% M.A. 3,3%	Fe. 72,6% Ab. 27,4% M.A. 0,0%	Fe. 10,7% Ab. 82,2% M.A. 7,1%
	Valor médio (mm)= 4,1 mm	Valor médio (mm)= 0,7 mm	Valor médio (mm)= 3,1 mm
Continuidade	M.P.C. 24,6% P.C. 65,6% M.C. 9,8%	M.P.C. 31,0% P.C. 66,4% M.C. 2,6%	M.P.C. 17,9% P.C. 43,0% M.C. 39,3%
	Valor médio (m)= 1,8 m	Valor médio (m)= 1,6 m	Valor médio (m)= 2,8 m
Terminação	R 37,7% D 32,8% O 29,5%	R 11,5% D 65,5% O 23,0%	R 25,0% D 42,9% O 32,1%
Curvatura	C ₁₋₂ 69,0% C ₃ 24,6% C ₄₋₅ 6,6%	C ₁₋₂ 82,3% C ₃ 15,0% C ₄₋₅ 2,7%	C ₁₋₂ 42,9% C ₃ 32,1% C ₄₋₅ 25,0%
Rugosidade	R ₁₋₂ 16,4% R ₃ 78,7% R ₄₋₅ 4,9%	R ₁₋₂ 1,8% R ₃ 94,7% R ₄₋₅ 3,5%	R ₁₋₂ 78,6% R ₃ 21,4% R ₄₋₅ 0,0%
Enchimento	Qua. 6,6% Arg. 18,0% Ro./R. 8,2% Evan. 9,8% Nen. 57,4%	Qua. 0,9% Arg. 18,6% Ro./R. 5,3% Evan. 7,1% Nen. 68,1%	Qua. 0,0% Arg. 3,6% Ro./R. 35,7% Evan. 46,4% Nen. 14,3%
Presença de água	Seco 45,9% Lig.H. 36,0% H.a G. 14,8% Flu. A. 3,3%	Seco 40,7% Lig.H. 22,1% H.a G. 16,0% Flu. A. 21,2%	Seco 35,7% Lig.H. 53,6% H.a G. 10,7% Flu. A. 0,0%
Fe. Fechada	M.P.C. Muito pouco continua	R Rocha	Qua. Quartzo
Ab. Aberta	P.C. Pouco continua	D Descontinuidade	Arg. Argila
M.A. Muito aberta	M.C. Medianamente continua	O Obscura	Ro./R. Rocha/Rocha esmagada
C ₁₋₂ Planas a ligeiramente curvas	R ₁₋₂ Lisas a algo rugosas	Lig.H. Ligeiramente húmido	Evan. Evansite
C ₃ Curvas	R ₃ Medianamente rugosas	H.a G. Húmido a gotejante	Nen. Nenhum
C ₄₋₅ Muito curvas	R ₄₋₅ Muito rugosas	Flu. A. Fluxo abundante	

(parâmetros geotécnicos segundo ISRM, 1978, 1981, 2007).

Neste quadro (42) apresentam-se as características geológico-geotécnicas do setor 1 e na Figura 36 é possível observar o aspeto do maciço rochoso que este setor ostenta.

❖ **Setor 2**

Dos três setores de estudo, este é o mais extenso, com um comprimento aproximado de 473m. O primeiro troço de 230 m apresenta uma direção média de N160°-170°E e nos restantes 243 m a direção é aproximadamente de N150°E. Foram recolhidos dados (Quadro 44) com recurso à técnica de amostragem linear respeitantes a um universo de 801 descontinuidades (Martins, 2011). A Figura 38 demonstra as condições do maciço deste setor.

No caso do setor 2, as zonas geotécnicas ZG2 e ZG3 não sofreram alterações das suas características, uma vez que nestas zonas não foi realizada qualquer amostragem. Contudo, para a zona geotécnica ZG1 foi possível redefinir o intervalo de resistência à compressão uniaxial, uma vez que as amostras PLT2 e PLT3 se inserem nesta zona.

Desta forma, tendo em conta, uma vez mais, o intervalo definido por Martins (2011) para a ZG1, 40-55 MPa, e o intervalo apresentado no quadro 39, foi estabelecido uma nova gama consistente com as duas anteriores, 40-60 MPa (Quadro 43). À semelhança do Setor 1, estes valores de resistência permaneceram na mesma ordem de grandeza, colocando o maciço na classe de resistência média (S_3), Figura 37.

Quadro 43. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 2 da galeria Carvalhido–Burgães

Zonamento Geotécnico – Setor 2					
Litologia	Zonas Geotécnicas	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Resistência à compressão uniaxial (S)/σ_c (MPa)	Grau de fracturação (F) / cm
Granito de grão médio a fino, de 2 micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos	ZG1	0-33,8	W_3	$S_3 / 40-60$	$F_3 / 40-55$
		141-162			
		226,3-246,9			
		266,4-422,6			
	ZG2	33,8-141	W_{1-2}	S_2 a $S_3 / 70-55$	$F_{1-2} / 65-80$
		162-226,3			
		246,9-266,4			
		422,6-434,4			
	ZG3	463,5-472,2	W_3 a W_{4-5}	S_4 a $S_3 / 15-30$	F_3 a $F_{1-2} / 50-65$
	ZG3	434,4-463,5			

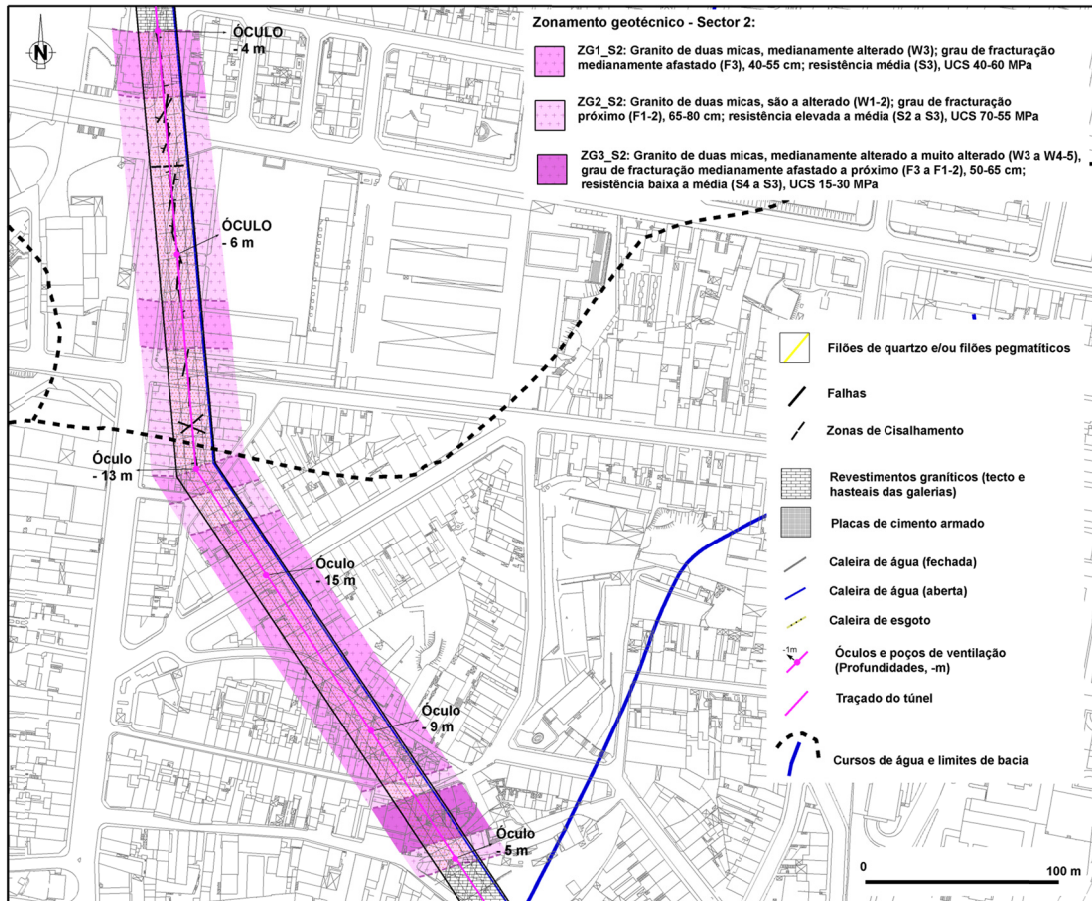


Figura 37. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 2 da galeria Carvalhido-Burgães (Paranhos, Porto), revisto de Martins (2011).



Figura 38: Aspeto do maciço rochoso no setor 2 da galeria Carvalhido-Burgães.

Quadro 44. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Setor 2 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto), segundo Martins (2011).

Sector 2	Zona Geotécnica nº 1, ZG1_S2 (n= 478)	Zona Geotécnica nº 2, ZG2_S2 (n= 274)	Zona Geotécnica nº 3, ZG3_S2 (n= 49)
Tipo de descontinuidade	Falha 14,9% Diacalse 85,1% 	Falha 24,5% Diacalse 75,5% 	Falha 22,4% Diacalse 77,6%
Famílias principais	N 110° - 130° E; 80° - 90° NE/SW N 10° - 20° E; 80° - 90° SE N 170° - 180° E; 10° - 20° SW 	N 100° - 120° E; 0° - 20° NE N 10° - 30° E; 80° - 90° SE N 50° - 60° E; 60° - 80° NE 	N 50° - 70° E; 70° - 80° SE N 10° - 20° E; 80° - 90° SE N 110° - 120° E; 80° - 90° NE
Abertura	Fe. 78,7% Ab. 19,5% M.A. 1,8% Valor médio (mm)= 6,2 mm 	Fe. 93,1% Ab. 4,7% M.A. 2,2% Valor médio (mm)= 1,3 mm 	Fe. 71,4% Ab. 20,4% M.A. 8,2% Valor médio (mm)= 2,0 mm
Continuidade	M.P.C. 19,5% P.C. 75,5% M.C. 5,0% Valor médio (m)= 1,6 m 	M.P.C. 20,8% P.C. 78,1% M.C. 1,1% Valor médio (m)= 1,4 m 	M.P.C. 8,2% P.C. 91,8% M.C. 0,0% Valor médio (m)= 1,7 m
Terminação	R 24,7% D 31,6% O 43,7% 	R 45,3% D 22,2% O 32,5% 	R 26,5% D 26,5% O 47,0%
Curvatura	C ₁₋₂ 53,6% C ₃ 40,4% C ₄₋₅ 6,0% 	C ₁₋₂ 69,0% C ₃ 28,8% C ₄₋₅ 2,2% 	C ₁₋₂ 69,4% C ₃ 28,6% C ₄₋₅ 2,0%
Rugosidade	R ₁₋₂ 46,4% R ₃ 47,3% R ₄₋₅ 6,3% 	R ₁₋₂ 37,6% R ₃ 60,9% R ₄₋₅ 1,5% 	R ₁₋₂ 71,4% R ₃ 24,5% R ₄₋₅ 4,1%
Enchimento	Qua. 1,3% Arg. 14,6% Ro./R. 6,9% Evan. 1,7% Nen. 75,5% 	Qua. 16,1% Arg. 11,3% Ro./R. 5,8% Evan. 0,0% Nen. 66,8% 	Qua. 4,1% Arg. 8,2% Ro./R. 6,1% Evan. 0,0% Nen. 81,6%
Presença de água	Seco 27,8% Lig.H. 44,2% H.a G. 16,5% Flu. A. 11,5% 	Seco 38,3% Lig.H. 53,3% H.a G. 3,3% Flu. A. 5,1% 	Seco 100,0% Lig.H. 0,0% H.a G. 0,0% Flu. A. 0,0%
Fe. Fechada	M.P.C. Muito pouco continua	R Rocha	Qua. Quartzo
Ab. Aberta	P.C. Pouco continua	D Descontinuidade	Arg. Argila
M.A. Muto aberta	M.C. Medianamente continua	O Obscura	Ro./R. Rocha/Rocha esmagada
C ₁₋₂ Planas a ligeiramente curvas	R ₁₋₂ Lisas a algo rugosas	Lig.H. Ligeiramente húmido	Evan. Evansite
C ₃ Curvas	R ₃ Medianamente rugosas	H.a G. Húmido a gotejante	Nen. Nenhum
C ₄₋₅ Muto curvas	R ₄₋₅ Muito rugosas	Flu. A. Fluxo abundante	

(parâmetros geotécnicos segundo ISRM, 1978, 1981, 2007).

❖ **Setor 3**

Este é o último dos três setores definidos para a galeria subterrânea Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). Com uma extensão de aproximadamente 157 m, apresenta uma direção média de N130°E nos primeiros 90 m e, nos restantes 67 m, de N170°E. Foram recolhidos, com recurso à técnica de amostragem linear, dados relativos a 220 descontinuidades (Martins, 2011).

No setor 3, as zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG4 não sofreram qualquer alteração das suas características, uma vez que não foi realizada qualquer amostragem nestas zonas. No entanto, para a zona geotécnica ZG3, o intervalo de resistência à compressão uniaxial foi reavaliado, uma vez que a amostra PLT1 se inclui nesta zona. Neste caso, verificou-se alguma discrepância entre os valores obtidos *in situ* com os valores laboratoriais, tendo-se obtido valores de resistência mais elevados em laboratório do que no terreno. Atribui-se este facto à possibilidade de existirem zonas pontuais com uma resistência mais elevada. Assim, à semelhança dos setores anteriores, considerou-se o intervalo definido por Martins (2011) para esta zona, 35-50 MPa, e o intervalo apresentado no quadro 39, dos quais resultou um novo intervalo, 35-75 MPa (Quadro 45). Neste caso, os novos valores considerados alteram a classe de resistência do maciço para média (S_3) a elevada (S_2), figura 38.

Quadro 45. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 3 da galeria Carvalhido – Burgães.

Zonamento Geotécnico - Setor 3					
Litologia	Zonas Geotécnicas	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Resistência à compressão uniaxial (S)/σ_c (MPa)	Grau de fracturação (F) / cm
Granito de grão médio a fino, de 2 micas, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos	ZG1	0-10,1	W_3	S_2 a S_3 / 70-55	F_3 a F_{1-2} / 40-55
	ZG2	10,1-19,4	W_{1-2}	S_3 / 30-45	F_{4-5} a F_3 / 15-35
	ZG3	19,4-97,2	W_{1-2}	S_3 a S_2 / 35-75	F_{1-2} a F_3 / 65-80
		134,2-149,5			
ZG4	97,2-134,2	W_{4-5}	S_4 a S_3 / 20-35	F_{1-2} a F_3 / 70-85	

Na Figura 40 é possível observar o aspeto do maciço rochoso do terceiro setor, do túnel de Carvalhido-Burgães e no Quadro 46 apresentam-se os parâmetros de caracterização do maciço do setor 3.

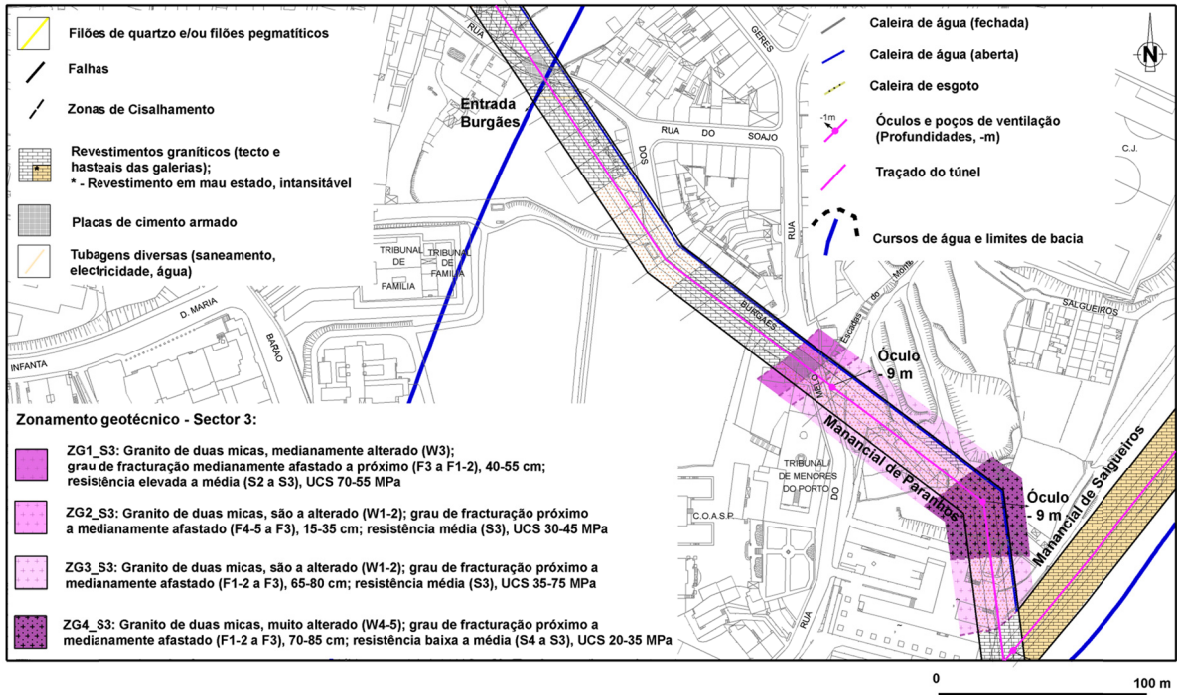


Figura 39. Mapa do zonamento geotécnico revisitado do maciço do Setor 3 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto), revisto de Martins (2011).



Figura 40: Aspetto do maciço rochoso no setor 3 da galeria Carvalho-Burgães.

Quadro 46. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Setor 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), segundo Martins (2011).

Sector 3	Zona Geotécnica nº 1, ZG1_S3 (n= 22)	Zona Geotécnica nº 2, ZG2_S3 (n= 29)	Zona Geotécnica nº 3, ZG3_S3 (n= 123)	Zona Geotécnica nº 4, ZG4_S3 (n= 46)
Tipo de descontinuidade	Falha 18,2% Diaclase 81,8% 	Falha 0,0% Diaclase 100,0% 	Falha 12,2% Diaclase 87,8% 	Falha 28,3% Diaclase 71,7%
Famílias principais	N 10° - 20° E; 55° - 75° NW N 30° - 40° E; 20° - 30° NW N 130° - 140° E; 0° - 20° SW 	N 170° - 180° E; 55° - 75° SW N 70° - 80° E; 50° - 70° NW 	N 70° - 80° E; 60° - 70° SE N 100° - 110° E; 80° - 90° NE/SW N 10° - 30° E; 65° - 75° NW 	N 40° - 50° E; 70° - 80° SE N 110° - 120° E; 20° - 30° SW N 0° - 10° E; 65° - 85° NW
Abertura	Fe. 63,6% Ab. 27,3% M.A. 9,1% Valor médio (mm)= 1,3 mm	Fe. 100,0% Ab. 0,0% M.A. 0,0% Valor médio (mm)= 0,09 mm	Fe. 74,0% Ab. 19,5% M.A. 6,5% Valor médio (mm)= 1,4 mm	Fe. 65,2% Ab. 28,3% M.A. 6,5% Valor médio (mm)= 2,1 mm
Continuidade	M.P.C. 22,7% P.C. 77,3% M.C. 0,0% Valor médio (m)= 1,6 m	M.P.C. 13,8% P.C. 86,2% M.C. 0,0% Valor médio (m)= 1,6 m	M.P.C. 6,5% P.C. 93,5% M.C. 0,0% Valor médio (m)= 1,7 m	M.P.C. 17,4% P.C. 82,6% M.C. 0,0% Valor médio (m)= 1,7 m
Terminação	R 36,4% D 36,4% O 27,2% 	R 24,1% D 24,1% O 51,8% 	R 35,8% D 16,2% O 48,0% 	R 30,4% D 19,6% O 50,0%
Curvatura	C ₁₋₂ 59,1% C ₃ 27,3% C ₄₋₅ 13,6% 	C ₁₋₂ 44,8% C ₃ 55,2% C ₄₋₅ 0,0% 	C ₁₋₂ 74,0% C ₃ 21,1% C ₄₋₅ 4,9% 	C ₁₋₂ 73,9% C ₃ 26,1% C ₄₋₅ 0,0%
Rugosidade	R ₁₋₂ 50,0% R ₃ 50,0% R ₄₋₅ 0,0% 	R ₁₋₂ 3,4% R ₃ 96,6% R ₄₋₅ 0,0% 	R ₁₋₂ 65,1% R ₃ 33,3% R ₄₋₅ 1,6% 	R ₁₋₂ 69,6% R ₃ 30,4% R ₄₋₅ 0,0%
Enchimento	Qua. 0,0% Arg. 0,0% Ro./R. 9,1% Evan. 0,0% Nen. 90,9% 	Qua. 0,0% Arg. 0,0% Ro./R. 0,0% Evan. 0,0% Nen. 100,0% 	Qua. 0,0% Arg. 15,4% Ro./R. 5,7% Evan. 0,0% Nen. 78,9% 	Qua. 0,0% Arg. 21,7% Ro./R. 6,5% Evan. 0,0% Nen. 71,8%
Presença de água	Seco 72,8% Lig.H. 13,6% H.a.G. 13,6% Flu.A. 0,0% 	Seco 3,4% Lig.H. 96,6% H.a.G. 0,0% Flu.A. 0,0% 	Seco 100,0% Lig.H. 0,0% H.a.G. 0,0% Flu.A. 0,0% 	Seco 100,0% Lig.H. 0,0% H.a.G. 0,0% Flu.A. 0,0%
	Fe. Fechada Ab. Aberta M.A. Muito aberta C ₁₋₂ Planas a ligeiramente curvas C ₃ Curvas C ₄₋₅ Muito curvas	M.P.C. Muito pouco contínua P.C. Pouco contínua M.C. Medianamente contínua R ₁₋₂ Lisas a algo rugosas R ₃ Medianamente rugosas R ₄₋₅ Muito rugosas	R Rocha D Descontinuidade O Obscura Lig.H. Ligeiramente húmido H.a.G. Húmido a gotejante Flu.A. Fluxo abundante	Qua. Quartzo Arg. Argila Ro./R. Rocha/Rocha esmagada Evan. Evansite Nen. Nenhum

(parâmetros geotécnicos segundo ISRM, 1978, 1981, 2007).

3.5. Avaliação geomecânica: apresentação e discussão

Apresenta-se seguidamente a aplicação das classificações geomecânicas e dos índices geológico-geomecânicos a todas as zonas geotécnicas dos três setores em estudo, iniciando-se pela RMR (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989), seguida da Q-system (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006), do índice geomecânico GSI (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005) e, por último, do índice hidrogeomecânico HP-value (Gates, 1995, 1997, 2003). Todos os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos foram obtidos e descritos segundo as recomendações e procedimentos propostos pela CFCFF (1996) e ISRM (2007). Para apoiar a aplicação das classificações geomecânicas dos maciços rochosos foi consultada um conjunto vasto de bibliografia especializada que se poderá encontrar no capítulo das referências e que poderíamos destacar, entre outras, as obras de Terzaghi (1946), de Deere & Deere (1988), Brady & Brown (1985, 2004), de Bieniawski (1989), de Barton (2000, 2006), de Hoek (2007), de Scesi & Gattinoni (2009), de Palmström & Stille (2010), de Singh & Goel (2011).

Para a aplicação destas classificações recorreu-se aos principais parâmetros geológicos-geotécnicos e geomecânicos do zonamento geotécnico da galeria Carvalhido –Burgães (Paranhos, Porto), realizado por Martins (2011) e sintetizados nos quadros 41, 43 e 45 (ver tópico 3.4.).

Na aplicação de todas as classificações, com exceção do índice HP, foram estabelecidos dois cenários para cada zona geotécnica (Quadro 47), um para as condições que predominam e outro para as condições complementares, tendo sempre em consideração o conhecimento do maciço rochoso “*in situ*” (Moreira, 2009; Afonso et al., 2010a,b, Afonso, 2011). A razão pela qual não se incluiu um segundo cenário do índice HP nesta avaliação geomecânica prendeu-se com o facto de se ter verificado que os parâmetros intervenientes no cálculo deste índice apresentavam diferenças pouco relevantes.

Por fim, serão confrontados os resultados obtidos através das diferentes classificações e será definido um intervalo de valores que espelhe as condições do maciço “*in situ*”.

Quadro 47. Síntese da abordagem considerada na elaboração dos dois cenários das classificações geomecânicas.

Parâmetros classificativos por Zona Geotécnica (ZG) (Bieniawski, 1989; Barton, 2000, 2006; Barton & Bieniawski, 2008)	Métodos de Avaliação (CFCCF, 1996; ISRM, 2007)	Cenário I (parâmetros dominantes)	Cenário II (parâmetros não-dominantes, mas complementares)
Índice de qualidade da rocha (RQD)	Índice RQD de Deere et al. (1967) ; Ábaco de Priest & Hudson (1976) e Priest (1993).	Estimado com base no limite inferior do intervalo de espaçamento estipulado para cada ZG.	Estimado com base no limite superior do intervalo de espaçamento estipulado para cada ZG.
Resistência do maciço (matriz rochosa, superfícies de descontinuidades)	Ensaio esclerométrico, UCS; Ensaio carga pontual, PLT.	Adotado o limite inferior do intervalo de resistência estipulado para cada ZG.	Adotado o limite superior do intervalo de resistência estipulado para cada ZG.
Famílias de descontinuidades Grau de fracturação	Técnica de amostragem linear (<i>scanline</i>); Diagramas geológico-estruturais.	Contabilizado o número de famílias de descontinuidades em cada ZG.	
Espaçamento (<i>fracture intercept</i>)	Técnica de amostragem linear (<i>scanline</i>).	Adotado o limite inferior do intervalo de espaçamento estipulado para cada ZG.	Adotado o limite superior do intervalo de espaçamento estipulado para cada ZG.
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Técnica de amostragem linear (<i>scanline</i>).	Consideradas as características predominantes em cada ZG.	Consideradas as características complementares em cada ZG.
Condições de percolação de água	Técnica de amostragem linear (<i>scanline</i>).		
Índice GSI	Ábaco de Hoek & Marinos (2000), atualizado por Cai et al. (2004).	Consideradas as características médias, em cada ZG, do grau de fracturação e das condições geológico-geotécnicas das descontinuidades.	
Circulação geo-hidráulica potencial (caudal, Q)	Relação empírica com HP-value (Gates, 1997, 2003).	Considerado o valor do índice hidrogeomecânico HP, de acordo com a expressão: $Q = 3.785 \cdot (919.71e^{-2.314HP})$	

3.5.1. Rock Mass Rating (RMR)

Esta classificação geomecânica foi realizada com base nos parâmetros preconizados por Bieniawski (1989). Desta forma, os parâmetros selecionados e os pesos respetivos resultantes da aplicação do RMR ao Setor 1 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães) encontram-se sintetizados no Quadro 48.

Quadro 48. Aplicação da classificação geomecânica RMR ao Setor 1.

RMR - Túnel 2 - Setor 1						
Parâmetros	Cenário I					
	ZG1	Peso	ZG2	Peso	ZG3	Peso
RQD (%)	42	8	30	8	23	3
Resistência compressão, UCS (MPa)	40	4	90	7	15	2
Espaçamento (m)	0,5	10	0,4	10	0,35	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Rugosas, abertura 1-5mm, W _s , continuidade 1-3m, sem preenchimento	19	Rugosas, abertura 0.1-1mm, W _s , continuidade 1-3m, sem preenchimento	21	Ligeiramente rugosas, abertura 1-5mm, W _s , continuidade 1-3m, preenchimento argiloso muito duro	13
Água subterrânea	Húmido	7	Húmido	7	Ligeiramente húmido	10
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Razoável	-5	Desfavorável	-10	Razoável	-5
Valor final	Razoável	43	Razoável	43	Fraço	33
Classificação	Classe III		Classe III		Classe IV	
Parâmetros	Cenário II					
	ZG1	Peso	ZG2	Peso	ZG3	Peso
RQD (%)	60	13	42	8	55	13
Resistência compressão, UCS (MPa)	55	7	120	12	30	4
Espaçamento (m)	0,75	15	0,50	10	0,65	15
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Rugosas, abertura <0,1mm, W _s , continuidade 1-3m, preenchimento argiloso muito duro	19	Rugosas, abertura 0.1-1mm, W _s , continuidade 1-3m, preenchimento muito duro	17	Rugosas, abertura 1-5mm, W _s , continuidade 1-3m, preenchimento argiloso muito duro	15
Água subterrânea	Ligeiramente húmido	10	Ligeiramente húmido	10	Seco	15
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Razoável	-5	Desfavorável	-10	Razoável	-5
Valor final	Razoável	59	Razoável	47	Razoável	57
Classificação	Classe III		Classe III		Classe III	

Como se pode constatar pela análise do Quadro 47, a qualidade global do maciço é razoável (Classe III).

Contudo, se realizarmos uma análise mais detalhada, por zona geotécnica, verifica-se o seguinte:

- As zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 apresentam, para as condições dominantes (Cenário I), o mesmo valor (43) de RMR, o qual se situa muito próximo da fronteira com a classe IV, pelo que se poderão classificar como de qualidade razoável a fraca. No Cenário II, a zona ZG1 apresenta um valor claramente distinto (59), o qual se deve, fundamentalmente, aos valores de RQD, de espaçamento e de resistência à compressão uniaxial (UCS). O valor determinado da resistência à carga pontual (PLT) é congruente com valor da resistência à compressão anterior. Por outro lado, a zona ZG2 exibe um valor idêntico no 2º cenário, uma vez que os intervalos considerados para alguns dos parâmetros apresentam limites próximos.
- Quanto à zona geotécnica ZG3, esta é, nas condições prevalecentes (Cenário I), a zona de qualidade mais baixa, classificando-se na classe IV. Contudo, face ao valor de RQD e à consideração de um maciço seco, esta zona integra-se, no 2º cenário, na classe III (RMR = 57).

Relativamente ao Setor 2 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães), a análise do Quadro 49 permite verificar que o maciço é globalmente de qualidade razoável (Classe III).

No entanto, numa análise mais detalhada por zona geotécnica, verifica-se o seguinte:

- Em ambos os cenários estabelecidos, as zonas geotécnicas ZG1 e ZG2 mantêm a sua posição em termos de classe de qualidade, estando a ZG1 na classe IV (qualidade fraca) e a ZG2 na classe III (qualidade razoável).
- A zona geotécnica ZG3 apresenta-se para as condições dominantes (Cenário I) na classe III, com um valor (43) muito próximo da fronteira com a classe IV, pelo que será na realidade de qualidade razoável a fraca. Contudo, no 2º cenário esta zona apresenta melhor qualidade geomecânica, sendo esta disparidade devida aos valores de RQD, ao espaçamento e às condições geológico-geotécnicas das descontinuidades.

Quadro 49. Aplicação da classificação geomecânica RMR ao Setor 2.

RMR - Túnel 2 - Setor 2						
Parâmetros	Cenário I					
	ZG1	Peso	ZG2	Peso	ZG3	Peso
RQD (%)	30	8	55	13	42	8
Resistência compressão, UCS (MPa)	40	4	50	4	15	2
Espaçamento (m)	0,4	10	0,65	15	0,50	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Rugosas, abertura >5mm, W ₃ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	18	Rugosas, abertura 1-5mm, W ₂ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	21	Ligeiramente Rugosas, abertura 1-5mm, W ₃ , continuidade 1-3m, sem	13
Água subterrânea	Gotejante	4	Húmido	7	Seco	15
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Muito desfavorável	-12	Muito desfavorável	-12	Razoável	-5
Valor final	Fraco	32	Razoável	48	Razoável	43
Classificação	Classe IV		Classe III		Classe III	
Parâmetros	Cenário II					
	ZG1	Peso	ZG2	Peso	ZG3	Peso
RQD (%)	47	8	65	13	55	13
Resistência compressão, UCS (MPa)	60	7	70	7	30	4
Espaçamento (m)	0,55	10	0,8	15	0,65	15
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Ligeiramente rugosas, abertura 1-5mm, W ₃ , continuidade 1-3m, preenchimento argiloso duro	15	Ligeiramente rugosas, abertura 1-5mm, W ₁ , continuidade 1-3m, preenchimento duro	18	Rugosas, abertura <0,1mm, W ₄ , continuidade 1-3m,preenchimento duro	19
Água subterrânea	Húmido	7	Ligeiramente húmido	10	Seco	15
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Muito desfavorável	-12	Muito desfavorável	-12	Razoável	-5
Valor final	Fraco	35	Razoável	51	Bom	61
Classificação	Classe IV		Classe III		Classe II	

Por último, relativamente ao Setor 3 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães), a análise do Quadro 50 permite verificar que o maciço é globalmente de qualidade razoável (Classe III). No entanto, numa análise mais detalhada por zona geotécnica, verifica-se o seguinte:

- A zona geotécnica ZG2 é a que apresenta a qualidade mais baixa das 4 zonas geotécnicas, posicionando-se no limite inferior da classe III. Ao conjunto do RQD, à presença de água e à desfavorabilidade da orientação das descontinuidades poder-se-á dever estes valores.
- As zonas ZG1, ZG3 e ZG4 posicionam-se no cenário dominante (Cenário I) na classe III, apresentando a ZG1 um valor mais baixo. Estas mesmas zonas no 2º cenário enquadram-se na classe II (qualidade boa), não obstante com valores próximos da fronteira com a classe III. O valor de RQD e as condições das descontinuidades serão os responsáveis por este aumento dos valores.

Quadro 50. Aplicação da classificação geomecânica RMR ao Setor 3.

RMR - Túnel 2 - Setor 3								
Parâmetros	Cenário I							
	ZG1	Peso	ZG2	Peso	ZG3	Peso	ZG4	Peso
RQD (%)	30	8	10	3	55	8	60	13
Resistência compressão, UCS (MPa)	50	4	30	2	35	4	20	2
Espaçamento (m)	0,4	10	0,15	8	0,65	10	0,7	15
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Ligeiramente rugosas, abertura 1-5mm, W ₃ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	17	Rugosas, <0,1mm, W ₂ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	26	Ligeiramente rugosas, abertura 1-5mm, W ₂ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	18	Ligeiramente rugosas, abertura 1-5mm, W ₄ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	15
Água subterrânea	Seco	15	Ligeiramente húmida	10	Seco	15	Seco	15
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Desfavorável	-10	Desfavorável	-10	Razoável	-5	Razoável	-5
Valor final	Razoável	44	Fraco	39	Razoável	50	Razoável	55
Classificação	Classe III		Classe IV		Classe III		Classe III	
Parâmetros	Cenário II							
	ZG1	Peso	ZG2	Peso	ZG3	Peso	ZG4	Peso
RQD (%)	50	13	23	3	65	13	70	13
Resistência compressão, UCS (MPa)	70	7	45	4	75	7	35	4
Espaçamento (m)	0,55	10	0,35	10	0,8	15	0,85	15
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Rugosas, abertura <0,1mm, W ₂ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	25	Rugosas, fechadas, W ₁ , continuidade 1-3m, sem preenchimento	27	Rugosas, aberturas 1-5mm, W ₃ , continuidade 1-3m, preenchimento argiloso duro	17	Rugosas, aberturas 1-5mm, W ₃ a W ₄ , continuidade 1-3m, preenchimento argiloso duro	22
Água subterrânea	Ligeiramente húmida	10	Ligeiramente húmida	10	Seco	15	Seco	15
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Favorável	-2	Desfavorável	-10	Razoável	-5	Razoável	-5
Valor final	Bom	63	Razoável	44	Bom	62	Bom	64
Classificação	Classe II		Classe III		Classe II		Classe II	

Com o intuito de estabelecer um intervalo de valores de RMR que caracterize globalmente cada zona geotécnica em cada um dos setores, foram sintetizados no Quadro 51 os valores/classificações de RMR obtidos na avaliação dos Cenários I e II. Desta forma, os intervalos definidos são baseados, fundamentalmente, no Cenário I, mas tendo em consideração o Cenário complementar.

Assim, constata-se que o maciço do Setor 1 enquadra-se numa classe de qualidade fraca a razoável (IV a III); quanto ao Setor 2, o maciço varia entre a classe de qualidade fraca (IV), na zona geotécnica ZG1, e a de qualidade fraca a razoável (IV a III), na zona geotécnica ZG3; por fim, o

maciço do Setor 3, oscila entre a classe de qualidade fraca a razoável (IV a III), nas zonas geotécnicas ZG1 e ZG2, e a classe razoável (III), nas zonas geotécnicas ZG3 e ZG4. Desta forma, o Setor 3 é globalmente o de melhor qualidade, seguido do Setor 1 e, por último, o Setor 2.

Globalmente, o maciço rochoso granítico do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães) é, de acordo com a classificação *Rock Mass Rating*, de qualidade fraca a razoável.

Quadro 51. Resultados finais obtidos pela aplicação da classificação RMR e intervalos classificativos para cada zona geotécnica.

ZG's	RMR (Cenário I)	Classificação	RMR (Cenário II)	Classificação	Intervalos propostos para o RMR	Classe	Classificação
Setor 1							
ZG1	43	Razoável	59	Razoável	40-55	Classe IV a III	Fraco a Razoável
ZG2	43	Razoável	47	Razoável	40-50	Classe IV a III	Fraco a Razoável
ZG3	33	Fraco	57	Razoável	30-45	Classe IV a III	Fraco a Razoável
Setor 2							
ZG1	32	Fraco	35	Fraco	30-35	Classe IV	Fraco
ZG2	48	Razoável	51	Razoável	45-50	Classe III	Razoável
ZG3	43	Razoável	61	Bom	40-55	Classe IV a III	Fraco a Razoável
Setor 3							
ZG1	44	Razoável	63	Bom	40-55	Classe IV a III	Fraco a Razoável
ZG2	39	Fraco	44	Razoável	35-45	Classe IV a III	Fraco a Razoável
ZG3	50	Razoável	62	Bom	45-55	Classe III	Razoável
ZG4	55	Razoável	64	Bom	50-60	Classe III	Razoável

3.5.2. Q – System

Esta classificação geomecânica foi realizada com base nos parâmetros propostos por Barton et al. (1974, 1980). Assim, para o Setor 1 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães) os parâmetros selecionados e os valores resultantes da aplicação Q-system encontram-se sintetizados no Quadro 52. Como se pode constatar pela análise deste quadro, a qualidade global do maciço caracteriza-se como fraca.

Neste setor, as características que influenciaram a variação do valor de Q do Cenário I para o Cenário II nas 3 zonas geotécnicas foram o índice RQD, a rugosidade, a alteração e o preenchimento das descontinuidades.

Verifica-se que, considerando as características dominantes (Cenário I), as três zonas geotécnicas se posicionam próximo da fronteira entre as classes de qualidade fraca e muito fraca, apresentando as zonas ZG1 e ZG3 valores idênticos dentro da classe fraca e a zona ZG2 com um valor no domínio da classe muito fraca.

No 2º cenário as 3 zonas geotécnicas enquadram-se na classe fraca, sendo os valores das zonas ZG1 e ZG2 praticamente o dobro dos do 1º cenário.

Quadro 52. Aplicação da classificação geomecânica Q ao Setor 1.

Q-System - Túnel 2 - Setor 1						
Parâmetros	Cenário I					
	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	42	Fraco	30	Muito Fraco	23
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, onduladas	3
Ja ("Joint alteration number")	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6
Jw ("Joint water reduction")	Húmido, fluxo<5L/min	1	Húmido, fluxo<5L/min	1	Húmido, fluxo<5L/min	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1
Valor final		1,3		0,9		1,3
Classificação	Fraca		Muito fraca		Fraca	
Parâmetros	Cenário II					
	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Razoável	60	Fraco	42	Razoável	55
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, planas	1,5
Ja ("Joint alteration number")	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6
Jw ("Joint water reduction")	Ligeiramente húmido, fluxo<5L/min	1	Húmido, fluxo<5L/min	1	Húmido, fluxo<5L/min	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1
Valor final		2,5		1,8		1,5
Classificação	Fraca		Fraca		Fraca	

Relativamente ao Setor 2 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães), a análise do Quadro 53 permite verificar que o maciço é globalmente de qualidade fraca.

Neste setor as características comuns às 3 zonas geotécnicas que influenciaram o aumento do valor Q do cenário dominante para o cenário complementar foram o RQD, a rugosidade, a alteração e o preenchimento das descontinuidades. Na zona geotécnica ZG1, as condições hidrogeológicas apresentam também variações do 1º para o 2º cenário.

Para o cenário dominante (Cenário I), a zona geotécnica ZG1 está claramente na classe de qualidade muito fraca, enquanto as zonas geotécnicas ZG2 e ZG3 se posicionam na classe fraca. Quanto ao 2º cenário estabelecido, as zonas ZG2 e ZG3 apresentam um acréscimo dos seus valores, mantendo-se na classe de qualidade fraca. Por outro lado, a zona ZG1 sofre um incremento de cerca de 3 vezes posicionando esta zona na classe fraca, o qual se deve ao valor de RQD.

Quadro 53. Aplicação da classificação geomecânica Q ao Setor 2.

Q-System - Túnel 2 - Setor 2						
Parâmetros	Cenário I					
	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	30	Razoável	55	Fraco	42
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5
Ja ("Joint alteration number")	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4
Jw ("Joint water reduction")	Húmido a gotejante	0,66	Húmido, fluxo<5L/min	1	Seco	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1
Valor final		0,6		1,7		1,8
Classificação	Muito fraca		Fraca		Fraca	
Parâmetros	Cenário II					
	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	47	Razoável	65	Razoável	55
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, onduladas	3
Ja ("Joint alteration number")	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6
Jw ("Joint water reduction")	Húmido, fluxo<5L/min	1	Húmido, fluxo<5L/min	1	Seco	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1
Valor final		2,0		2,7		3,1
Classificação	Fraca		Fraca		Fraca	

Por último, relativamente ao Setor 3 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães), a análise do Quadro 54 permite verificar que o maciço é globalmente de qualidade fraca.

Os parâmetros comuns às 3 zonas geotécnicas que promovem a variação do valor do Q são o RQD e a rugosidade das descontinuidades. Além disso, na zona geotécnica ZG3, a alteração e o preenchimento das descontinuidades têm participação nestas variações.

Verifica-se que, considerando as características dominantes (Cenário I), as zonas geotécnicas ZG2, ZG3 e ZG4 encontram-se na classe de qualidade fraca, apresentando-se a zona ZG1 dentro da classe muito fraca, mas com um valor próximo ao limite com a classe fraca.

Relativamente ao 2º cenário, a zona ZG1 sofre um incremento do triplo posicionando-se na classe fraca. Este facto deve-se, mais uma vez, ao valor de RQD. Por outro lado, as zonas ZG2, ZG3 e ZG4 apresentam um aumento dos seus valores, mantendo-se na classe de qualidade fraca.

Quadro 54. Aplicação da classificação geomecânica Q ao Setor 3.

Q-System - Túnel 2 - Setor 3								
Parâmetros	Cenário I							
	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor	ZG4	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	30	Muito Fraco	10	Razoável	55	Razoável	60
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	2 famílias	4	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5
Ja ("Joint alteration number")	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4
Jw ("Joint water reduction")	Húmido, fluxo < 5L/min	1	Húmido, fluxo < 5L/min	1	Seco	1	Seco	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1
Valor final		0,9		1,9		1,7		1,9
Classificação	Muito fraca		Fraca		Fraca		Fraca	
Parâmetros	Cenário II							
	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor	ZG4	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	50	Muito Fraco	23	Razoável	65	Razoável	70
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	2 famílias	4	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, onduladas	3
Ja ("Joint alteration number")	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades sem preenchimento argiloso	4	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6	Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco espesso	6
Jw ("Joint water reduction")	Húmido, fluxo < 5L/min	1	Húmido, fluxo < 5L/min	1	Seco	1	Seco	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1	Tensões médias	1
Valor final		3,1		2,2		2,7		2,9
Classificação	Fraca		Fraca		Fraca		Fraca	

À semelhança do que foi feito para a classificação RMR, pretendeu-se igualmente nesta classificação estabelecer um intervalo de valores de Q que caracterizassem globalmente cada zona geotécnica em cada um dos setores. Desta forma, foram sintetizados no Quadro 55 os valores/classificações de Q obtidos na delimitação dos Cenários I e II. Estes intervalos foram definidos, fundamentalmente, com base no Cenário I, não descurando a consideração do Cenário II. Assim, constata-se que o maciço dos 3 setores em estudo se enquadra sempre numa classe de qualidade “muito fraca a fraca” a “fraca”, apresentando os Setores 2 e 3 valores mais elevados.

Globalmente, o maciço rochoso granítico do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães) classifica-se, de acordo com a classificação Q-System, de qualidade fraca.

Quadro 55. Resultados da aplicação da classificação Q e intervalos classificativos para cada zona geotécnica.

ZG's	Q (Cenário I)	Classificação	Q (Cenário II)	Classificação	Intervalos propostos para Q	Classificação
Setor 1						
ZG1	1,3	Fraco	2,5	Fraco	1,1 - 2,0	Fraco
ZG2	0,9	Muito fraco	1,8	Fraco	0,7 - 1,1	Muito fraco a Fraco
ZG3	1,3	Fraco	1,5	Fraco	1,1 - 1,5	Fraco
Setor 2						
ZG1	0,6	Muito fraco	2,0	Fraco	0,5 - 1,0	Muito fraco a Fraco
ZG2	1,7	Fraco	2,7	Fraco	1,5 - 2,0	Fraco
ZG3	1,8	Fraco	3,1	Fraco	1,5 - 2,0	Fraco
Setor 3						
ZG1	0,9	Muito fraco	3,1	Fraco	0,7 - 2,8	Muito fraco a Fraco
ZG2	1,9	Fraco	2,2	Fraco	1,5 - 2,5	Fraco
ZG3	1,7	Fraco	2,7	Fraco	1,5 - 2,0	Fraco
ZG4	1,9	Fraco	2,9	Fraco	1,5 - 2,5	Fraco

♣ **Correlação RMR – Q-system**

Tal como foi explanado no tópico 2.3.3.1 (ver Quadro 29 e Figura 25), é possível estabelecer uma correlação entre o RMR e o *Q-System*, recorrendo a diversas expressões (*cf.* Barton & Bieniawski, 2008). Adotaremos aqui as propostas de Bieniawski (1989) e Barton (1995). Esta análise será efetuada com base nos intervalos de RMR e *Q-system* propostos, respetivamente, nos quadros 50 e 54, os quais, como se viu, tiveram em linha de conta os dois cenários estabelecidos para cada uma das classificações.

Desta forma, iremos recalcular os intervalos de RMR com base nos intervalos de Q e compará-los entre si (Quadro 56). Verifica-se que os novos intervalos de RMR, [1] e [2], se enquadram, na generalidade, nos anteriormente definidos no Quadro 50. Contudo, destacam-se as seguintes zonas geotécnicas: ZG3 do Setor 1, ZG1 do Setor 2 e ZG2 do Setor 3. Estas zonas, que exibiam os valores mais baixos de RMR, apresentam agora novos limites que ultrapassam o valor máximo proposto anteriormente, posicionando estas zonas geotécnicas numa classe de qualidade razoável, segundo Bieniawski (1989).

Em síntese, estes dados permitem demonstrar que, em termos gerais, existe uma boa correlação entre as classificações RMR e *Q-system* com base nas expressões preconizadas por Bieniawski (1989) e Barton (1995).

Quadro 56. Intervalos de RMR, Q e de RMR recalculados de acordo com as propostas de Bieniawski (1989) e Barton (1995).

Correlação RMR – Q-system					
Setor	ZG's	Intervalos de RMR	Intervalos de Q-system	Intervalos de RMR [1]	Intervalos de RMR [2]
		(cf. Quadro 50)	(cf. Quadro 54)	(segundo Bieniawski, 1989) $[RMR \approx 9 \cdot \ln Q + 44]$	(segundo Barton, 1995) $[RMR \approx 15 \cdot \log Q + 50]$
1	ZG1	40 - 55	1,0 – 2,0	44,0 - 50,2	50,0 - 54,5
	ZG2	40 - 50	0,7 – 1,1	40,8 - 44,9	47,7 - 50,6
	ZG3	30 - 45	1,1- 1,5	44,9 - 47,6	50,6 - 52,6
2	ZG1	30 - 35	0,5 – 1,0	37,8 - 44,0	45,5 - 50,0
	ZG2	45 - 50	1,5 – 2,0	47,6 - 50,2	52,6 - 54,5
	ZG3	40 - 55	1,5 – 2,0	47,6 - 50,2	52,6 - 54,5
3	ZG1	40 - 55	0,7 – 2,8	40,8 – 53,3	47,7 - 56,7
	ZG2	35 - 45	1,5 – 2,5	47,6 – 52,2	52,6 - 56,0
	ZG3	45 - 55	1,5 – 2,0	47,6 – 50,2	52,6 - 54,5
	ZG4	50 - 60	1,5 – 2,5	47,6 – 52,2	52,6 - 56,0

3.5.3. Geological Strength Index (GSI)

O índice geológico-geomecânico GSI (*Geological Strength Index*) poderá ser determinado de várias maneiras. Uma delas prende-se com a correlação numérica entre o GSI e o valor de RMR, ou seja $GSI = RMR - 5$, desde que o $RMR > 23$ (Hoek, 2007). No entanto, para Barton (2001) esta relação algébrica, dado o seu carácter simplista e redutor, não é adequada no estado atual do conhecimento das classificações geomecânicas e deverá ser abandonada. Todavia, outros autores referem-na como válida e plausível para se proceder a uma avaliação exploratória do GSI (e.g., Hoek, 2007; Singh & Goel, 2011). Assim, para esta análise recorreu-se aos intervalos de RMR propostos no Quadro 50, obtendo-se desta forma intervalos classificativos para o GSI (Quadro 57).

Verifica-se que, globalmente, o maciço rochoso granítico se classifica de qualidade razoável.

Quadro 57. Intervalos classificativos de GSI para cada zona geotécnica (ZG) para a área de estudo, baseados na correlação numérica com o RMR.

Setor	ZG's	Intervalos de RMR	Intervalos de GSI	Classificação do Estado do Maciço
		(cf. Quadro 50)	[GSI = RMR – 5]	
1	ZG1	40 - 55	35 - 50	Razoável
	ZG2	40 - 50	35 - 45	Razoável
	ZG3	30 - 45	25 - 40	Fraco a Razoável
2	ZG1	30 - 35	25 - 30	Fraco
	ZG2	45 - 50	40 - 45	Razoável
	ZG3	40 - 55	35 - 50	Razoável
3	ZG1	40 - 55	35 - 50	Razoável
	ZG2	35 - 45	30 - 40	Fraco a Razoável
	ZG3	45 - 55	40 - 50	Razoável
	ZG4	50 - 60	45 - 55	Razoável

Numa segunda etapa, foram inferidos os intervalos dos valores de GSI através do ábaco de Hoek & Marinos (2000). No Quadro 57 apresenta-se uma síntese do grau de compartimentação do maciço rochoso, do estado das descontinuidades (em termos das suas características geológico-geotécnicas) e dos intervalos propostos para cada uma das zonas geotécnicas dos 3 setores em estudo. De um forma sintética poderemos referir que a geoestrutura do maciço é globalmente compartimentada, enquanto o estado das descontinuidades varia de fraco a bom.

Quadro 58. Síntese das características das Zonas Geotécnicas (ZG) nos setores de estudo e valor do GSI.

Setor	ZG's	Geoestrutura (GS): compartimentação do maciço			Estado das descontinuidades (D): características geológico-geotécnicas	GSI
		Espaçamento médio (cm), F	Nº de famílias de descontinuidades	Classe (GS)		
1	ZG1	65,1	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Razoável	50-60
	ZG2	53,5	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Razoável	50-60
	ZG3	57,3	3	Compartimentada (GS2)	Fraco	40-50
2	ZG1	47,2	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Razoável	50-60
	ZG2	76,0	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Razoável	55-60
	ZG3	59,4	3	Compartimentada (GS2)	Fraco	40-50
3	ZG1	45,7	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Razoável	50-60
	ZG2	32,2	2	Compartimentada (GS2) a muito compartimentada (GS3)	Bom	60-70
	ZG3	75,7	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Razoável	50-60
	ZG4	80,4	3 + aleatórias	Compartimentada (GS2)	Fraco a Razoável	50-55

Na Figura 41 apresenta-se uma proposta de representação dos 3 setores de estudo com as respetivas zonas geotécnicas.

Assim, constata-se que o maciço rochoso granítico do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães) é, na sua globalidade, de qualidade razoável e boa

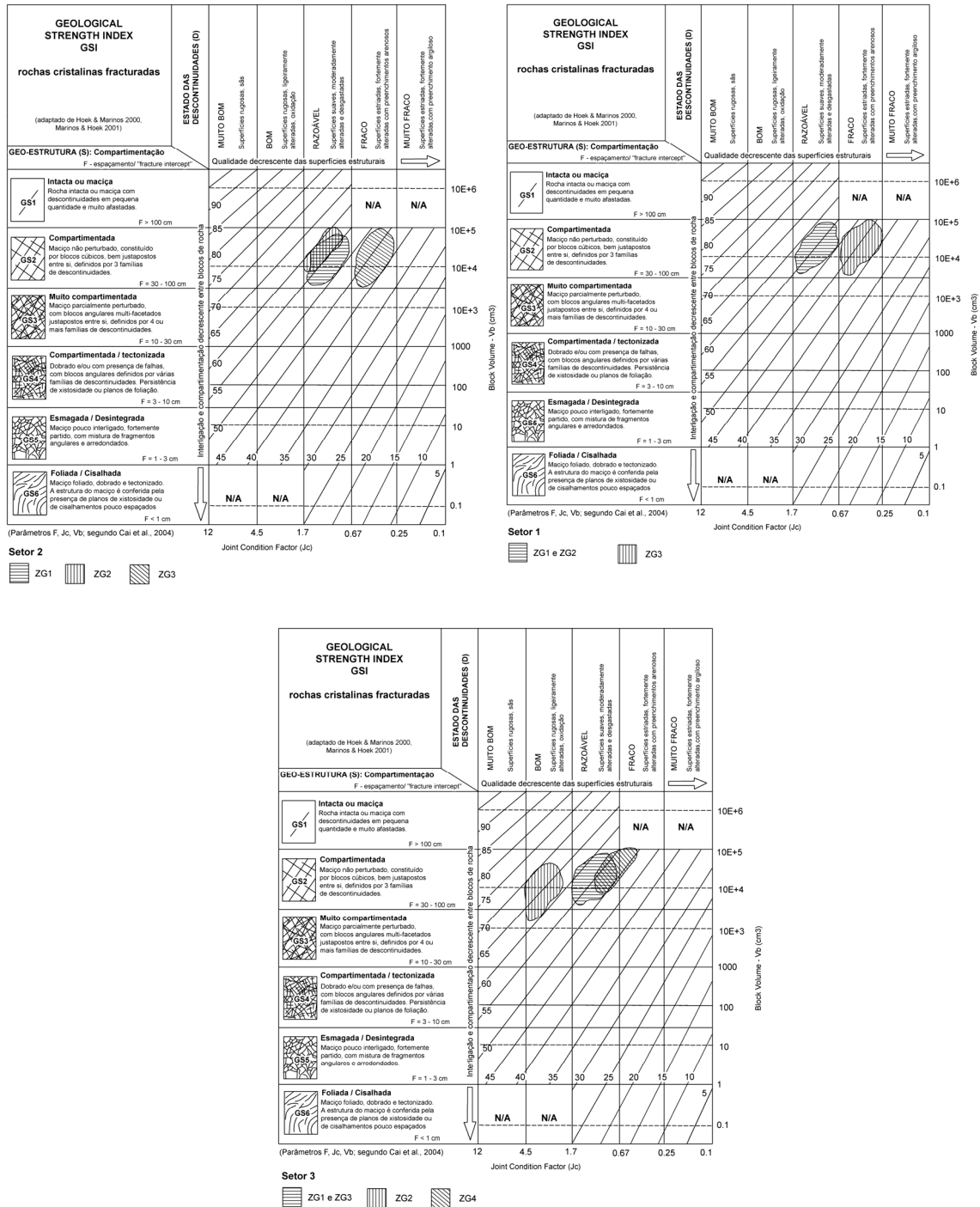


Figura 41. Representação do GSI para os setores 1, 2 e 3 no ábaco de Hoek & Marinos (2000), com atualizações de Cai et al. (2004).

3.5.4. **Hydro-Potential Value (HP)**

O índice hidrogeomecânico *HP-value* foi avaliado com base nos parâmetros propostos por Gates (1995, 1997, 2003), quatro dos quais são, como se referiu anteriormente, comuns à classificação geomecânica *Q-System*. Os intervalos de classificação da qualidade do maciço serão determinados com base nos limites propostos na classificação *Q-system* de Barton et al. (1974, 1980). Logo, com base no índice *HP-value*, Gates (1995, 1997, 2003) refere que os valores de HP variam entre 1.33×10^{-3} , para maciços de muito fraca qualidade, e 800, para maciços de qualidade excelente. Assim, baseados nestes dois valores referência e no facto deste índice seguir de perto a classificação Q, avançaremos com uma proposta de qualidade em função dos valores de HP obtidos.

Desta forma, sintetizam-se nos quadros 58, 59 e 60 os parâmetros seleccionados e os valores resultantes da aplicação deste índice, bem como uma estimativa dos caudais de água subterrânea, nos setores 1, 2 e 3 do Túnel 2 (Carvalhido – Burgães).

A análise do Setor 1 (Quadro 59), permite constatar que as zonas geotécnicas ZG1 e ZG3 são de qualidade fraca, apresentando valores de HP idênticos, cerca de 1.7-1.8, aos quais correspondem caudais semelhantes na ordem de 1 L/s. Por outro lado, zona geotécnica ZG2 classifica-se na classe de qualidade fraca, com um valor de HP ligeiramente mais baixo (ca. 1,3), conduzindo no entanto a valores de caudal na ordem dos 2,6 L/s.

Quadro 59. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Setor 1.

HP value -Túnel 2 - Setor 1						
Parâmetros	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	42	Fraco	30	Muito Fraco	23
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, onduladas	3
Jaf ("Joint aperture factor")	Abertura das descontinuidades entre 1 e 5 mm	1,4	Abertura das descontinuidades entre 0,1 e 1mm	1,2	Abertura das descontinuidades entre 1-5mm	1,4
Jk ("Joint conductivity factor")	Maioria das descontinuidades com preenchimento argiloso, baixo fluxo	2	Maioria das descontinuidades com preenchimento argiloso, baixo fluxo	2	Maioria das descontinuidades com preenchimento silto-arenoso, fluxo moderado	3
Jw ("Joint water factor")	Húmido	0,94	Gotas	0,86	Húmido	0,94
Valor final		1,8		1,3		1,7
Caudal Q (L/min)		58,9		155,3		65,7
Caudal Q (L/s)		1,0		2,6		1,1

Relativamente ao Setor 2 (Quadro 60), as 3 zonas geotécnicas apresentam valores distintos, 0.8 na ZG1, 1.4 na ZG2 e 5 na ZG3, correspondendo a maciços de qualidade muito fraca, fraca e razoável, respetivamente. Os caudais estimados são, igualmente, diferenciados, 9.3 L/s, 2.2 L/s e nulo, respetivamente.

Quadro 60. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Setor 2.

HP value - Túnel 2 - Setor 2						
Parâmetros	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	30	Razoável	55	Fraco	42
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12	3 famílias	9
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5
Jaf ("Joint aperture factor")	Abertura das descontinuidades entre 5 e 10 mm	1,8	Abertura das descontinuidades entre 1 e 5 mm	1,4	Abertura das descontinuidades entre 1 e 5 mm	1,4
Jk ("Joint conductivity factor")	Maioria das descontinuidades com preenchimento argiloso, baixo fluxo	2	Maioria das descontinuidades com preenchimento siltoso, fluxo moderado	3	Descontinuidades fechadas, sem fluxo	1
Jw ("Joint water factor")	Gotejante	0,76	Gotas	0,86	Seco	1
Valor final		0,8		1,4		5
Caudal Q (L/min)		557,3		134,0		3,3E-02
Caudal Q (L/s)		9,3		2,2		0,0

Por último, no que diz respeito ao Setor 3 (Quadro 61), as zonas geotécnicas ZG1 e ZG3 são de qualidade fraca, apresentando valores próximos de HP, 2.9 e 2.5, respetivamente, aos quais correspondem valores de caudal da mesma ordem de grandeza, entre 0,1 e 0,2 L/s. Por outro lado, os valores de HP das zonas ZG2 e ZG4 são superiores, 6.4 e 10.7, respetivamente, aos quais correspondem caudais nulos e classificam-se de qualidade razoável.

Em termos globais os valores de HP oscilam entre 0,8 e 10,7, com caudais de água subterrânea estimados entre o nulo e os 9 L/s, apresentando o Setor 3 o menor potencial geohidráulico e o Setor 2 o maior potencial de fluxo subterrâneo. Estes resultados estão congruentes com os estudos hidrogeológicos da área (e.g., Afonso et al., 2010; Chaminé et al., 2010, Afonso, 2011).

Quadro 61. Aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value ao Setor 3.

HP value - Túnel 2 - Setor 3								
Parâmetros	ZG1	Valor	ZG2	Valor	ZG3	Valor	ZG4	Valor
RQD ("Rock quality designation")	Fraco	30	Muito Fraco	10	Razoável	55	Razoável	60
Jn ("Joint set number")	3 + aleatórias	12	2 famílias	4	3 + aleatórias	12	3 + aleatórias	12
Jr ("Joint roughness number")	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, onduladas	3	Rugosas, planas	1,5	Rugosas, planas	1,5
Jaf ("Joint aperture factor")	Abertura das descontinuidades entre 0,1 e 1mm	1,2	Descontinuidades fechadas, <0,1 mm	1	Abertura das descontinuidades entre 1 e 5 mm	1,4	Abertura das descontinuidades entre 1 e 5 mm	1,4
Jk ("Joint conductivity factor")	Descontinuidades fechadas, sem fluxo	1	Descontinuidades fechadas, sem fluxo	1	Maioria das descontinuidades com preenchimento argiloso, baixo fluxo	2	Maioria das descontinuidades com preenchimento argiloso, baixo fluxo	2
Jw ("Joint water factor")	Húmido	0,94	Gotas	0,86	Seco	1	Seco	1
Valor final		2,9		6,5		2,5		10,7
Caudal Q (L/min)		3,9		1,1E-03		11,9		5,9E-05
Caudal Q (L/s)		0,1		0,0		0,2		0,0

O valor médio dos caudais obtidos, retirando o valor mais elevado (9,3 L/s na zona ZG1 do Setor 2) é de 0,8 L/s, o qual se enquadra nos valores típicos para captações de água subterrânea em rochas graníticas fraturadas, i.e., < 1 L/s (e.g., Afonso, 2003; Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2007; Afonso, 2011). Além disso, COBA (2003), Afonso et al. (2007), Afonso (2011) apontam caudais médios, para os granitos da cidade do Porto, nesta ordem de grandeza (ca. 0,7 L/s), podendo atingir caudais máximos de cerca de 3 L/s. Este último valor é, curiosamente, idêntico aos referidos por Ferreira da Silva (1889) ou Fontes (1908) para o caudal do Manancial de Paranhos em Agosto de 1887.

3.5.5. Análise comparativa de resultados

Neste tópico proceder-se-á a uma análise comparativa dos resultados obtidos pelas classificações geomecânicas e índices geomecânicos ensaiados, RMR, *Q-System*, GSI e *HP-value*. Assim, apresentar-se-á nos Quadros 62, 63 e 64 uma compilação dos valores obtidos nas classificações para os setores 1, 2 e 3, respetivamente. Verifica-se que o índice *Q-system* e, pelas semelhanças de conceção, o índice *HP-value* são os que penalizam os maciços em termos de nomenclatura das classes de qualidade. Por outro lado, entre o índice GSI e a classificação RMR o primeiro apresenta em geral valores superiores ao segundo, conduzindo a uma classificação de qualidade superior. Não esquecer que apesar de algumas semelhanças nos pressupostos das classificações, estas refletem, igualmente diferenças na sua essência levando a resultados distintos e, muitas vezes, não correlacionáveis. Por isso, é vital a utilização e o cruzamento de várias classificações para se esboçar um intervalo classificativo e servirem como apoio à decisão nas fases de projeto e de dimensionamento em trabalhos de engenharia (e.g., Bieniawski, 1989; Barton & Bieniawski, 2008; Barton, 2011).

Setor 1

O maciço rochoso do primeiro setor é classificado de qualidade fraca a razoável pela classificação RMR, muito fraco a fraco pelo *Q-System*, razoável a bom pelo índice GSI e fraco pelo índice HP (Quadro 61).

Quadro 62. Síntese dos valores obtidos nas 4 classificações para o Setor 1.

<u>Setor 1</u>									
<u>ZG's</u>	<u>RMR</u>		<u>Q-System</u>		<u>GSI</u>		<u>HP-value</u>		
ZG1	40 - 55	Fraco a Razoável	1,1 - 2,0	Fraco	50 - 65	Razoável a Bom	1,8	Fraco	
ZG2	40 - 50	Fraco a Razoável	0,7 - 1,1	Muito fraco a Fraco	50 - 60	Razoável a Bom	1,3	Fraco	
ZG3	30 - 45	Fraco a Razoável	1,1 - 1,5	Fraco	45 - 55	Razoável	1,7	Fraco	

Setor 2

Este setor (Quadro 63) será o que apresenta pior qualidade do maciço relativamente aos restantes, variando de fraco a médio segundo a RMR e o GSI, e de muito fraco a fraco segundo o Q-System. Observa-se que a zona geotécnica 1 será a mais frágil e a que apresenta piores condições de resistência e qualidade.

Quadro 63. Síntese dos valores obtidos nas 4 classificações para o Setor 2.

Setor 2								
ZG's	RMR		Q-System		GSI		HP-value	
ZG1	30 - 35	Fraco	0,5-1,0	Muito fraco a Fraco	50 - 60	Razoável a Bom	0,8	Muito Fraco
ZG2	45 - 50	Razoável	1,5-2,0	Fraco	55 - 60	Razoável a Bom	1,4	Fraco
ZG3	40 - 55	Fraco a Razoável	1,5-2,0	Fraco	45 - 55	Razoável	5,0	Razoável

Setor 3

O setor 3 é aquele que apresenta melhor qualidade por comparação com os setores apresentados anteriormente. É classificado como de fraco a médio pelo RMR e GSI, e de muito fraco a fraco pelo Q-System. As zonas geotécnicas 3 e 4, são as que apresentam resultados superiores, e onde o maciço apresentará melhores condições de resistência.

Quadro 64. Síntese dos valores obtidos nas 4 classificações para o Setor 3.

Setor 3								
ZG's	RMR		Q-System		GSI		HP-value	
ZG1	40-55	Fraco a Razoável	0,7-2,8	Muito fraco a Fraco	50 - 60	Razoável a Bom	2,9	Fraco
ZG2	35-45	Fraco a Razoável	1,5-2,5	Fraco	60 - 70	Bom	6,4	Razoável
ZG3	45-55	Razoável	1,5-2,0	Fraco	50 - 60	Razoável a Bom	2,5	Fraco
ZG4	50-60	Razoável	1,5-2,5	Fraco	50 - 55	Razoável	10,7	Razoável

Em suma, apesar de os três setores apresentarem as mesmas denominações qualitativas, é impreterível analisar os intervalos de valores, que definem o maciço rochoso das zonas geotécnicas 3 e 4 do setor 3 como razoável, e o maciço da zona geotécnica 1 do setor 2 como fraco. As restantes zonas variam de fraca a média qualidade, apresentando locais em que o maciço exibe um comportamento mais resistente e outros locais onde se expõe mais frágil.

3.6. Zonamento geomecânico: uma proposta

Depois de alcançados os intervalos classificativos finais, assim como as denominações qualitativas do maciço, procedeu-se a uma tentativa para o estabelecimento do zonamento geomecânico. Este consistiu numa avaliação dos resultados obtidos através das classificações geomecânicas (RMR e *Q-system*), conjugando-os e organizando-os de forma a conceber diferentes “unidades de classificação geomecânica” do maciço rochoso, ou, simplesmente, de “unidades geomecânicas”. No fundo, estas unidades serão criadas a partir das unidades geotécnicas e da avaliação geomecânica efetuada através do cruzamento e da síntese das classificações dos maciços rochosos, bem como ponderando os parâmetros resistência (S) e grau de alteração (W). As unidades geomecânicas poderão ser resultado, ou da divisão ou do agrupamento de distintas unidades geotécnicas. Na classificação da qualidade geomecânica das classificações RMR e *Q-system* utilizou-se o ábaco proposto por Barton & Bieniawski (2008).

O zonamento geomecânico efetuado pretende avaliar cada setor do túnel de forma independente. Assim, poderá incluir uma a três zonas geomecânicas distintas, podendo mesmo agrupar várias zonas geotécnicas numa única zona geomecânica.

Setor 1

No Quadro 65, apresenta-se o zonamento geomecânico elaborado para o setor 1. As três zonas geotécnicas agrupam-se em duas zonas geomecânicas. A zona geomecânica 1 engloba as zonas geotécnicas 1 e 2, caracterizando-se por um maciço rochoso de qualidade muito fraca. A zona geomecânica 2, abarca a zona geotécnica 3, reúne índices classificativos de grandeza inferior e as condições geológico-geotécnicas em termos de resistência e de grau de alteração de muito baixas, sendo por isso, globalmente, de qualidade geomecânica muito fraca.

Quadro 65: Proposta do zonamento geomecânico do Setor 1.

<u>Setor 1</u>	<u>Qualidade geomecânica do maciço (Barton & Bieniawski, 2008)</u>	<u>Zona geomecânica (ZGM)</u>	<u>Descrição da ZGM</u>
ZG1	Fraca RMR: 40-55; Q: 1,1 - 2,0 (40-55 MPa, S3), W3 - W2	ZGM1	<i>Qualidade geomecânica do maciço fraca</i>
ZG2	Fraca RMR: 40-50; Q: 0,7 - 1,1 (90-120 MPa, S2), W3		
ZG3	Muito Fraca RMR: 30-45; Q: 1,1-1,5 (30-15 MPa, S3 - S4), W4-5	ZGM2	<i>Qualidade geomecânica do maciço muito fraca</i> RMR: 30 - 45 Q: 1,1 - 1,5

Setor 2

Este setor compreende duas zonas geomecânicas distintas. A zona geomecânica 1 corresponde a zona geotécnica 1, onde a qualidade do maciço é muito fraca. A zona geomecânica 2 agrupa as zonas geotécnicas 2 e 3, classificando-as com qualidade fraca, mostrando-se de qualidade comparativamente superior à primeira. No Quadro 66 é possível visualizar os índices geomecânicos definidos para cada zona.

Quadro 66. Proposta do zonamento geomecânico do Setor 2.

Setor 2	Qualidade geomecânica do maciço (Barton & Bieniawski, 2008)	Zona geomecânica (ZGM)	Descrição
ZG1	Muito fraca RMR: 30-35; Q: 0,5-1,0 (40-60 MPa, S3) W3	ZGM1	Qualidade do maciço muito fraca RMR: 30 - 35 Q: 0,5 - 1,0
ZG2	Fraca RMR: 40-50; Q: 1,5-2,0 (70-55 MPa, S2-S3) W1 a W2	ZGM2	Qualidade do maciço fraca RMR: 40 - 55 Q: 1,5 - 2,0
ZG3	Fraca RMR: 40-55; Q: 1,5-2,0 (15-30 MPa, S4 a S3) W3 a W4-5		

Setor 3

O setor 3 possui duas zonas geomecânicas: a primeira engloba as zonas geotécnicas 1 e 2, a segunda abrange as zonas geotécnicas 3 e 4 (Quadro 67). A zona geomecânica 1 caracteriza o maciço rochoso de muito fraco a fraco em termos de qualidade, enquanto a zona geomecânica 2 caracteriza-se por um maciço rochoso de qualidade fraca.

Quadro 67. Proposta do zonamento geomecânico do Setor 3.

Setor 3	Qualidade geomecânica do maciço (Barton & Bieniawski, 2008)	Zona geomecânica (ZGM)	Descrição
ZG1	Muito fraca a fraca RMR: 40-55; Q: 0,7-2,8 (70-55 MPa, S2 a S3) W3	ZGM 1	Qualidade do maciço muito fraca a fraca RMR: 35-55 Q: 0,7-2,8
ZG2	Muito fraca RMR: 35-45; Q: 1,5-2,5 (30-45 MPa, S3) W1-2		
ZG3	Fraca RMR: 45-55; Q: 1,5-2,0 (35-75 MPa, S3 a S2) W1-2	ZGM 2	Qualidade do maciço fraca RMR: 45-60 Q: 1,5-2,5
ZG4	Fraca RMR: 50-60; Q: 1,5-2,5 (20-35 MPa, S4 a S3) W4-5		

3.7. Avaliação hidrogeomecânica: uma proposta

O zonamento hidrogeomecânico foi realizado a partir da classificação *hydro-potential (HP value)*, que aponta para a avaliação das condições geo-hidráulicas subterrâneas (especialmente do caudal) da água que circula no maciço rochoso. Com base na quantidade de água subterrânea circulante, é plausível estabelecer um zonamento que traduza as condições hidrogeomecânicas do maciço. Foi igualmente tido em consideração o parâmetro das condições geo-hidráulicas que foram estimadas para a classificação RMR, bem como os estudos hidrogeológicos dos subterrâneos de Paranhos (e.g., Afonso, 2003; Afonso et al., 2010a,b; Chaminé et al., 2010; Afonso, 2011).

Setor 1

No setor 1 é possível agrupar as 3 zonas geotécnicas numa única unidade hidrogeomecânica, que se caracteriza por apresentar caudal tendencialmente baixo, que poderão variar entre 1,0 e 2.6 L/s e o fluxo de água subterrânea será expectavelmente muito baixo a baixo (Quadro 68).

Quadro 68: Zonamento hidrogeomecânico do Setor 1

<u>Setor 1</u>	<u>HP-value</u>	<u>Caudal (Q, L/s)</u> <u>(Gates, 1997, 2003)</u>	<u>Zona hidrogeomecânica</u> <u>(ZHGM)</u>	<u>Descrição</u>
ZG1	1,8 Fraco	1,0	ZHGM 1	<i>HP-value: 1,3 - 1,8 (Q: 1,0 – 2,6 L/s)</i>
ZG2	1,3 Fraco	2,6		<i>Maciço apresenta caudal baixo; fluxo de água subterrânea muito baixo a baixo</i>
ZG3	1,7 Fraco	1,1		

Na Figura 42 apresenta-se o zonamento hidrogeomecânico definido para o primeiro setor do túnel de Carvalhido-Burgães, no qual se indica a qualidade geomecânica do maciço e os caudais expectáveis.

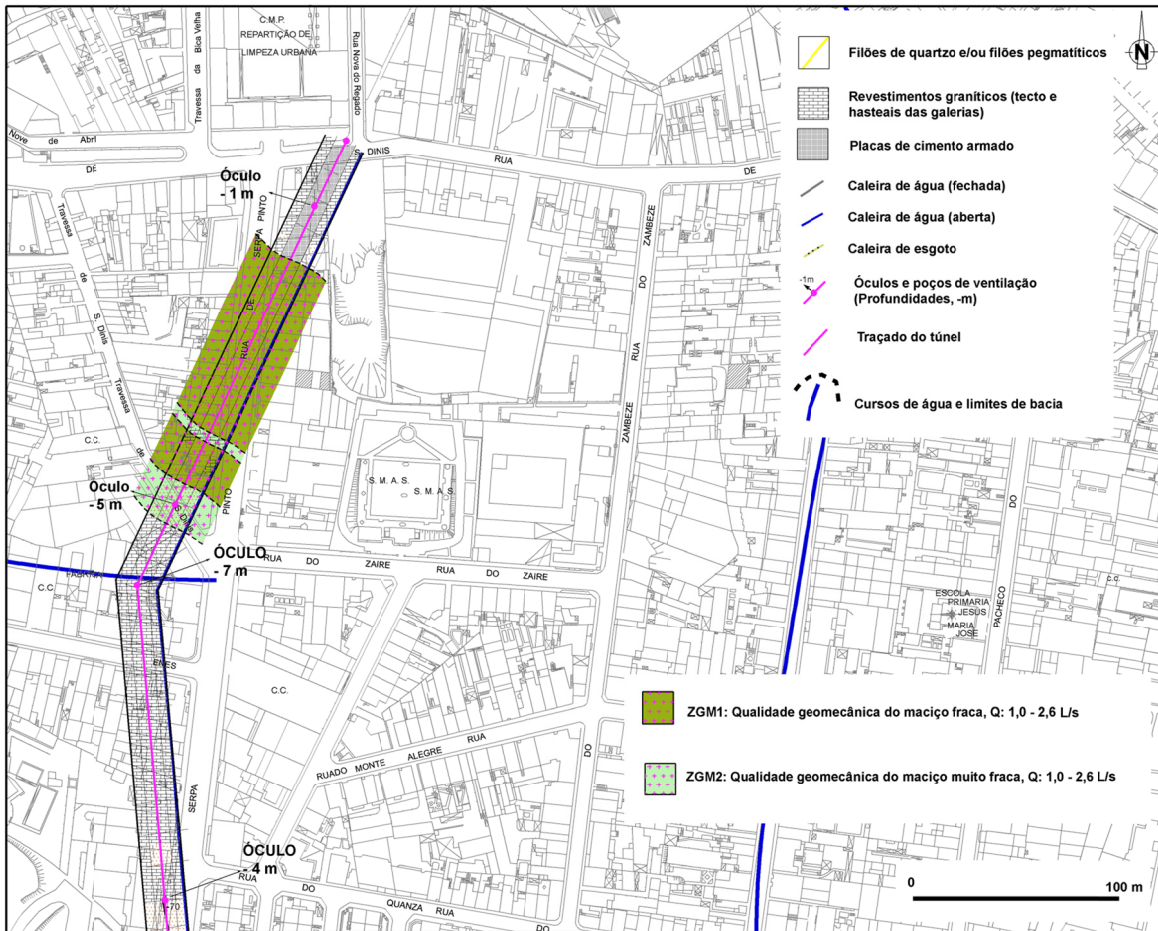


Figura 42. Proposta do zonamento geomecânico e hidrogeomecânico para o Setor 1.

Setor 2

O segundo setor do túnel de Carvalhido-Burgães, apresenta 3 zonas hidrogeomecânicas distintas (Quadro 69). Deste modo, a zona hidrogeomecânica 1 possui valores de HP-value entre 0,5 e 1,0 apresentando expectavelmente caudal elevado (na ordem dos 9 L/s) e o fluxo de água subterrânea no maciço será elevado a muito elevado. Na zona hidrogeomecânica 2 o maciço apresenta um caudal tendencialmente baixo (na ordem dos 2 L/s), compreendendo valores de HP entre 1,2 a 1,5. A zona hidrogeomecânica 3 o maciço apresenta-se sem potencial circulação geo-hidráulica, com um HP-value a rondar os 5,0.

Quadro 69. Zonamento hidrogeomecânico do Setor 2.

Setor 2	HP-value	Caudal (Q, L/s) (Gates, 1997, 2003)	Zona hidrogeomecânica (ZHGM)	Descrição
ZG1	0,8 Muito Fraco	9,3	ZHGM 1	HP-value: 0,5-1,0 Maciço apresenta caudal elevado; fluxo de água subterrânea elevado a muito elevado
ZG2	1,4 Fraco	2,2	ZHGM 2	HP-value: 1,2-1,5 Maciço apresenta caudal baixo; fluxo de água subterrânea muito baixo a baixo
ZG3	5,0 Razoável	0,0	ZHGM 3	HP-value > 4,5 Maciço sem potencial circulação geo-hidráulica

A qualidade geomecânica do maciço do setor 2 do túnel de Carvalhido-Burgães e o seu potencial geohidráulico apresentam-se na Figura 43.

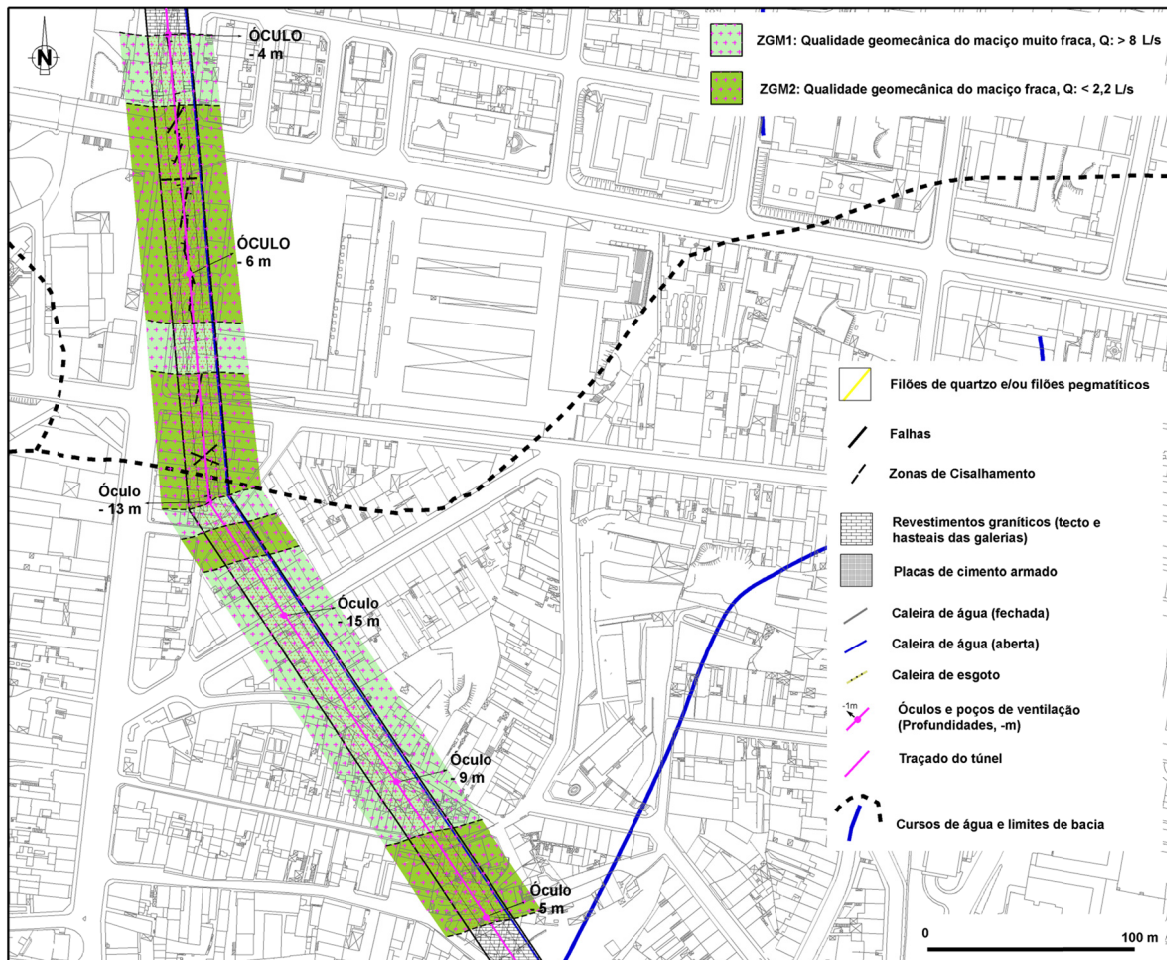


Figura 43. Proposta do zonamento geomecânico e hidrogeomecânico para o Setor 2.

Setor 3

O último setor poderá ser dividido em duas zonas hidrogeomecânicas (Quadro 70). A zona hidrogeomecânica 1 apresenta um maciço sem potencial de circulação geo-hidráulica significativa e o fluxo de água subterrânea expectável é extremamente baixo e os valores de HP rondam os 2,5 – 3,0. Enquanto que na zona hidrogeomecânica 2 o maciço sem potencial de circulação geo-hidráulica significativa ou ausente e os valores de HP são superiores a 6,0.

Quadro 70. Zonamento geomecânico do Setor 3.

Setor 3	HP-value	Caudal (Q, L/s) (Gates, 1997, 2003)	Zona hidrogeomecânica (ZHGM)	Descrição
ZG1	2,9 Fraco	0,1	ZGHM 1	HP-value: 2,7-3,2 Maciço sem potencial circulação geo-hidráulica; fluxo de água subterrânea extremamente baixo
ZG2	6,4 Razoável	0,0	ZGHM 2	HP-value > 6 Maciço sem potencial circulação geo-hidráulica
ZG3	2,5 Fraco	0,2	ZGHM 1	HP-value: 2,3-2,7 Maciço sem potencial circulação geo-hidráulica; fluxo de água subterrânea extremamente baixo
ZG4	10,7 Razoável	0,0	ZGHM 2	HP > 9,5 Maciço sem potencial circulação geo-hidráulica

Na Figura 44 sintetiza-se a qualidade geomecânica do maciço do setor 3 do túnel de Carvalhido-Burgães, bem como caudais expectáveis.

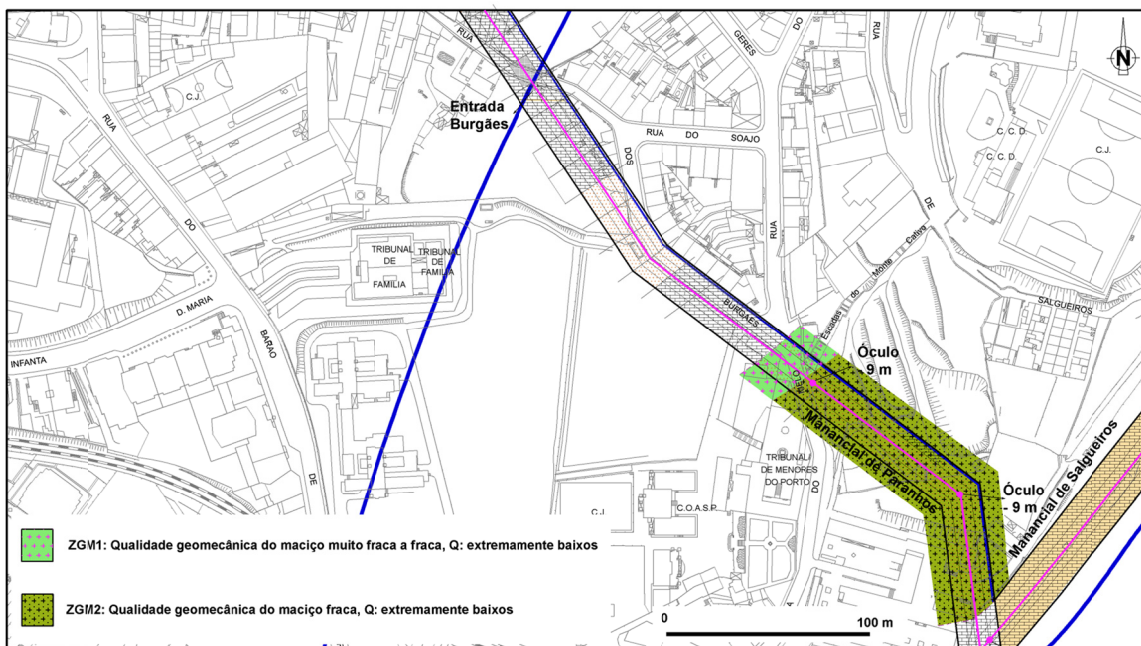


Figura 44. Proposta do zonamento geomecânico e hidrogeomecânico para o Setor 3.

4- Conclusões

4. Conclusões:

Neste trabalho, apresenta-se e discute-se a importância e os principais resultados da aplicação das classificações geomecânicas *Rock Mass Rating* (RMR), *Rock Tunnelling Quality Index* (Q-system) e dos índices geomecânicos *Geological Strength Index* (GSI) e *Hydro-Potential* (HP) Value, para avaliar a qualidade do maciço rochoso granítico das galerias subterrâneas de Paranhos (setor de Carvalhido - Burgães; Porto).

Este estudo envolveu a compilação, integração e interpretação das características geológico-geotécnicas e geomecânicas.

Do estudo, presentemente desenvolvido, resultam os seguintes aspetos conclusivos:

- i) A revisão da cartografia geotécnica dos subterrâneos do Porto (maciço de Arca d'Água – sector Carvalhido–Burgães, Paranhos, Porto);
- ii) O refinamento e complemento do zonamento geotécnico, estabelecido em Martins (2011), o qual pretendeu delinear a qualidade geotécnica do maciço e no qual se redefiniram as principais unidades geotécnicas locais, resultado do cruzamento e síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica;
- iii) A aplicação exploratória da classificação geomecânica RMR aos três setores de estudo conduziu à classificação da qualidade do maciço em fraca a razoável (Classe IV a III), com valores médios compreendidos entre 35 e 55;
- iv) De acordo com a classificação Q-system, o maciço dos três setores classifica-se de qualidade muito fraca a fraca, com valores médios compreendidos entre 0,8 e 2,2;
- v) Segundo o índice GSI, nos três setores o maciço classifica-se como de qualidade fraca, a razoável com valores médios compreendidos entre 40 e 55;
- vi) Na aplicação do índice hidrogeomecânico HP-value, o maciço dos três setores classifica-se de qualidade muito fraca a razoável, com valores compreendidos entre 0,8 e 5,0; os caudais expectáveis de água subterrânea variam entre 0 e 9 L/s, apresentando o Setor 3 o menor potencial geohidráulico e o Setor 2 o maior potencial de fluxo subterrâneo;
- vii) A uniformização das zonas geotécnicas permitiu estabelecer uma proposta de zonamento geomecânico global, por setores, do maciço, tendo conduzido à definição de duas zonas geomecânicas em cada um dos três setores estudados;
- viii) O zonamento hidrogeomecânico realizado com base no índice HP-value conduziu à definição de uma zona hidrogeomecânica no Setor 1, com caudais entre 1,0 e 2,6 L/s, de três zonas

hidrogeomecânicas no Setor 2, com caudais entre 0,5 e 4,5 L/s, e duas zonas no Setor 3, com caudais praticamente nulos.

- ix) O recurso, ainda que exploratório, ao índice Hydro-Potential Value permitiu concluir que este poderá ser promissor para avaliação de potenciais caudais de fluxo de água subterrânea.

Como trabalhos futuros poder-se-ão apontar, entre outros, os seguintes:

- O aumento da rede de amostragem de material-rocha para a realização de ensaios laboratoriais, nomeadamente, o ensaio de carga pontual (PLT);
- Estudos de correlação geotécnica e geomecânica com a rede de galerias de Arca D'Água (Moreira, 2009);
- Desenvolvimento de uma análise estatística mais robusta com uma avaliação multivariada;
- Um aprofundamento do índice hidrogeomecânico *HP-value* e um maior entrosamento com os estudos hidrogeológicos na área de estudo (Afonso, 2011), bem como estudo de modelos de fluxo de água subterrânea;
- Modelação geomecânica das galerias do maciço de Paranhos, com o intuito de verificar a estabilidade estrutural e a segurança, assim como para proceder ao dimensionamento estrutural de elementos de reforço, recorrendo a programas de cálculo automático (*e.g. Phase², RockSupport e Unwedge da Rocscience: software tools for rock and soil*);
- Definição de cenários de suscetibilidade e vulnerabilidade aos riscos geológicos e geotécnicos materializados por mapas temáticos de avaliação de perigosidade

Referências bibliográficas

5.Referências bibliográficas

Afonso M.J. (2003) Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal). *Cadernos Laboratório Xeológico de Laxe, Coruña*, 28: 173-192.

Afonso MJ, Chaminé HI, Moreira PF & Marques JM (2010b) The role of hydrogeotechnical mapping on the sustainable management of urban groundwater. In: Williams AL, Pinches GM, Chin CY, McMorran TJ & Massey CI (eds.) *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG2010, Geologically Active, Auckland, New Zealand*. CRC Press: Taylor & Francis Group. pp. 1595-1602. (CD-Rom).

Afonso MJ, Chaminé, HI, Marques JM, Carreira PM, Guimarães L, Guilhermino L, Gomes A, Fonseca PE, Pires A & Rocha F (2010a) Environmental issues in urban groundwater systems: a multidisciplinary study of the Paranhos and Salgueiros spring waters, Porto (NW Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 61: 379–392.

Afonso MJ, Chaminé HI, Carvalho JM, Marques JM, Gomes A, Araújo MA, Fonseca PE, Teixeira J, Marques da Silva MA & Rocha FT (2007) Urban groundwater resources: a case study of Porto City in northwest Portugal. In: Howard KWF (ed.) *Urban Groundwater: meeting the challenge*. Chapter 20 - Urban Aquifer Management. International Association of Hydrogeologists Selected Papers. Taylor & Francis Group, London, 8: 271-287. (ISBN 0415407451).

Afonso M.J., Chaminé H.I., Gomes A., Fonseca P.E., Marques J.M., Guimarães L., Guilhermino L., Teixeira J., Carvalho J.M., Marques da Silva M. & Rocha F., 2009. Urban hydrogeomorphology and geology of the Porto metropolitan area (NW Portugal): a multidisciplinary approach. In: Culshaw M.G., Reeves H.J., Jefferson I. & Spink T. (eds.) *Engineering geology for tomorrow's cities*. Geological Society of London Engineering Geology Special Publications. Geological Society of London. (doi:10.1144/EGSP22.I; on CD-Rom insert, IAEG Paper 92, 9 pp.)

Afonso M.J.C., 2011. Hidrogeologia e hidrogeoquímica da região litoral do Porto, entre Vila do Conde e Vila Nova de Gaia (NW de Portugal): implicações geoambientais. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. 382pp. + 8 Anexos (tese de doutoramento).

Almeida, A., 2001. Caracterização geoquímica e geocronológica do granito de duas micas sintectónico do Porto (NW de Portugal) [Geochemical and geochronologic characterization of Porto syntectonic twomicas granite (NW Portugal)]. In: Lago M, Arranz E, Galé C (eds) *Proceedings IIIer Congreso Ibérico de Geoquímica/VIII Congreso de Geoquímica de España*. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, pp.311-315.

Araújo, M. A.; 1991. Evolução geomorfológica da plataforma litoral da região do Porto. Universidade do Porto, 534pp. + vol. Anexos [87pp.] (Tese de doutoramento).

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.

ASTM – American Society for Testing and Materials, 2001. Standard test method for determination of rock hardness bu rebound hammer, Designation D5873-00. ASTM Standards on disc: 04-08.

ASTM – American Society for Testing and Materials, 2010. Standard Classifications of Soils for Engineering Purposes (Unified soil Classification System), Designation D2487-10. ASTM Standards.

Aydin A., 2008. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt Hammer rebound hardness: Revised version. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.

Aydin, A. & Basu, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81: 1-14.

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

Barton N., 1976. The shear strength of rock and rock joints. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 13(9): 255-279.

Barton N., 1986. Deformation phenomena in jointed rock. *Geotechnique*, 36(2): 147-167.

Barton N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. In: *Keynote Lecture, 8th ISRM Congress (Tokyo)*, Balkema, Rotterdam.

Barton N., 2000. *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. Balkema, Rotterdam. 173 pp.

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

Barton N., 2006. *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*. Taylor & Francis, UK. 729 pp.

Barton N., 2007. Rock mass characterization for excavations in mining and civil engineering. In: Mark C., Pakalnis R. & Tuchman R.J., eds., *Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining*. pp. 3-13.

Barton N., Bandis S. & Bakhtar K., 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22(3): 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.

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 N., 2001. Dr. Nick Barton's interview, Zagreb, 02.06.2011. In: http://www.isrm.net/fotos/editor2/nl14/interview_vrkljan_barton_isrm_2011.pdf (consultado em Maio de 2012).

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

Bastos M., 1998. *Geotecnia na concepção, projeto e execução de túneis em maciços rochosos*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 153 pp. (tese de mestrado).

Begonha, A. & Sequeira Braga, M.A., 1995. A meteorização do granito do porto, In: F.S. Borges & M. Marques (eds.), *resumos alargados do IV Congresso Nacional de Geologia*. *Memórias Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciên. Univ. Porto* 4: 171-175.

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

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

Bell F. G., 2007. *Engineering Geology*, 2nd edition. Elsevier Ltd. 593pp.

- 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., 1975. The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, pp. 1-11.
- 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.
- Bieniawski Z.T., Celada B. & Galera J.M., 2007. Predicting TBM excavability. *Tunnels and Tunnelling International*. pp. 25-28.
- Bieniawski Z.T., Celada B., Galera J.M. & Álvares M., 2006. Rock Mass Excavability (RME) index. In: *Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress*, Korea. June 2006, paper #06-0254.
- Bieniawski, Z. T., 1993. Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. Hudson J.A., (ed.), *comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects*. Pergamon Press, 33: 553-574.
- Black J.H., 1987. Flow and flow mechanisms in crystalline rock. In: *Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers*, *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 34: 186-200.
- Bock H., 2006. Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65: 209-216.
- Bourbon e Noronha, T., 1885. *As águas do Porto*. Dissertação inaugural apresentada à escola Médico-Unwin, London. 527pp.
- Brady B.H.G. & Brown E.T., 1985 *Rock mechanics for underground mining*. Allen and Unwin, London.
- Brady B.H.G. & Brown E.T., 2004. *Rock mechanics for underground mining*. Kulwer Academic Publishers, Dordrecht. 628 pp.
- Broch E. & Franklin J. A., 1972. The point load strength test. *Journal Rock Mech. Min. Sci*, 9: 669-697.
- Brown E.T., 1991. Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros*, Ano IV (48): 9-29.
- Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y. & Minami M., 2004. Estimation of Rock Mass Deformation Modulus and Strength of Jointed Hard Rock Masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 3-19.
- Caldeira L., 2005. Metodologias de análise de risco. In: *Aplicações em Geotecnia. II Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia*. LNEC, Lisboa, 25 pp.
- Cargill J. S. & Shakoor, A., 1990. Evaluatyion of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 53:97-103.
- Carrington da Costa J., 1938. O porto: geografia-geologia. In: Bastos C. (org.). *Nova Monografia do Porto*, Companhia Portuguesa do Porto, pp. 3-32.
- Carrington da Costa, J. & Teixeira, C., 1957. *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, na escala de 1/50000, Folha 9-C (Porto): Serviços 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. Dissertação Inaugural à Escola Médico-Cirúrgica do Porto. Typographia da Encyclopedia Portuguesa, Porto, 270 pp.

Carvalho, J. M., 2006. Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 292 pp.

Carvalho J.M., Espinha Marques J., Afonso M.J. & Chaminé H.I., 2007. Prospecção e pesquisa de recursos hidrominerais e de água de nascente no Maciço Antigo Português. Boletim de Minas, 42,2: 161-196

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., Porto, 37:97-111.

Chaminé, H. I.; Gama Pereira, L. C.; Fonseca, P. E.; Noronha, F. & Iemos 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 La. Xeol. Laxe, A Coruña, 28:37-78.

Chaminé, H. I.; Afonso, M. J.; Robalo, P. M.; Rodrigues, 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.

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 pp.

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.

Cordeiro, J.M.L., 1993. Um serviço Centenário: o abastecimento domiciliário de água à cidade do Porto(1887-1987). Arqueologia Industrial, 2ª serie I (1-2): 11-34.

Cunha A.P. & Muralha J., 1990. Scale effects in the mechanical behaviour of joints and rock masses. Memória 763, LNEC, Lisboa. 44 pp.

Day, M.J. & Goudie, A.S., 1977. Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer. BGRG Technical Bulletin, 18: 19-29.

Deere D.U. & Deere D.W., 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie L., ed., Rock classification systems for engineering purposes, , ASTM Special Publication, Philadelphia, 984: 91-101.

Deere D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 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: Fairhurst C., (ed.), Failure and breakage of rock, proceedings 8th U.S. symposium rock mechanics. Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs. pp. 237-302.

Dinis da Gama C., 1991. Qualidade e patologia de obras geotécnicas. In: 4º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 3: 1-20.

Dinis da Gama C., 1995. Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de canteras. In: López Jimeno, C. (Ed.). Cap. 10 del Manual de Rocas Ornamentales. Entorno Gráfico. S.L., Madrid, pp. 231-246.

EC7 (Eurocode 7). Geotechnical design [Consultar: < <http://www.eurocodes.co.uk/>>]

Einstein H.H., 1991. Observation, quantification and judgement: Terzaghi and engineering geology. *J. Geotech. Eng.*, 117(11): 1772-1778.

Fernandes, H. A. N., 2005, Caracterização geológica, geotécnica e geomecânica do subsolo granítico da cidade do Porto (manancial de Paranhos): implicações na gestão do geo-espaço urbano. Projecto de final de licenciatura, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 88 pp. + anexos.

Ferreira da Silva A.J., 1889. Contribuições para a hygiene da cidade do Porto. Typographia António José da Silva Teixeira, Porto, 262 pp.

Fonseca, L., Ramos, L., Galiza, A. C. & Chaminé, H. I., 2010, Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. Actas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia, SPG/UM, Guimarães, 10 pp (CD-ROM).

Fontes, A., 1908. Contribuição para a hygiene do Porto: Análise Sanitária do seu abastecimento em água potável. I. Estudo dos Mananciais de Paranhos e Salgueiros. Dissertação inaugural apresentada à escola Médico-Cirúrgica do Porto, Typ. Enciclopédia Portuguesa, Porto, 172 pp.

Freeze A.R. & Cherry J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall. 604 pp.

Freitas M.H., 2009. Geology: its principles, practice and potential for geotechnics. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42: 397-441.

Gaj, F.; Guglielmetti, V.; Grasso, P. & Giacomini, G., 2003. Experience on Porto: EPB follow-up. *Tunnels & Tunnelling International*, pp. 15-18.

Galiza A.C., Ramos L., Fonseca L. & Chaminé H.I., 2011. Geotecnia mineira de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. *Revista Ingenium da Ordem dos Engenheiros*, 124 (Jul/Agos): 76-80.

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 value: a rock classification technique for examination of groundwater potential in fractured bedrock. *Environ Eng Geosci* 3: 231-267.

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., 1983. A new classification system for underground assessment using surface data. Proceedings of the International Congress of Engineering Geology and Underground Construction, Lisbon. 1 (II): 85-94.

González de Vallejo, L., 2003. SRC Rock Mass Classification of tunnels under high tectonic stress excavated in weak rocks. *Engineering Geology*, 69: 273-285.

González de Vallejo L.I. & Ferrer M., 2011. *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 pp.

Goudie, A. S., 2006. The Schmidt hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*, 30 (6): 703-718.

Grimstad E. & Barton N., 1993. Updating of the Q-System for NMT. In: Kompen, Opsahl & Berg, eds., Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete: Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Norwegian Concrete Association, Oslo. pp. 46-66.

GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological

Gunsallus K. L. & Kullhawy F. N., 1984. A comparative evaluation of rock strength measures. Int. J. RockMech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 21: 233-248.

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 Association of Engineering Geologists, 30(3): 293-319.

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

Hoek E. & Brown E.T., 1980a. Underground excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, 627 pp.

Hoek E. & Brown E.T., 1980b. Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Eng., ASCE 106 (GT9): 1013-1035.

Hoek E. & Brown E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 34: 1165-1186.

Hoek E. & Marinos P., 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000.

Hoek E. & Marinos P., 2007. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks: Int. J. Geotech. Geoenv. Eng., 30(2): 85-92.

Hoek E., 1994. Strength of rock and rock masses. News Journal of ISRM, 2(2): 4-16.

Hoek E., 1999. Putting numbers to geology: an engineer's viewpoint. Quarterly Journal of Engineering Geology, 32(1): 1-19.

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

Hoek E., Carranza-Torres C. & Corkum B., 2002. Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition. Proceedings of the NARMS-TAC Conference, Toronto, 1: 267-273.

Hoek, E.; Marinos, P. & Benissi, M., 1998 Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull Eng Geol Env, 57: 151–160.

Hoek E., Wood D. & Shah S. (1992). A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. In: Hudson J.A., ed., Proceedings of the Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech., Eurock '92, pp. 209-214.

Hsu S.-M., Lo H.-C., Chi S.-Y. & Ku C.-Y., 2011. Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models In: Dikinya O., Ed., Developments in Hydraulic Conductivity Research. InTech Pub. pp. 133-158.

Hudson J.A. & Cosgrove J.W., 1997. Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 34(3/4): 136.1-136.15.

Hudson J.A. & Harrison J.P., 2000. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. 2nd edition, Pergamon Press, 444 pp.

Hudson J.A. & Priest S.D., 1983. Discontinuity frequency in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 20: 73-89.

Hudson J.A., 1992. Rock engineering systems: theory and practice. Ellis Horwood, New York. 185 pp.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15(6): 319-368.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.

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 pp.

Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38: 981–94.

Katza, O.; Rechesa, Z. & Roegiersc, J.C., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37: 723-728.

Kendorski F., Cummings R., Bieniawski Z.T. & Skinner E., 1983. Rock mass classification for block caving mine drift support. In: Proceedings of the 5th congress Int. Soc. Rock Mech., Melbourne, Rotterdam, Balkema. pp. B51-B63.

Kolaiti, E. & Papadopoulos, Z., 1993. Evaluation of Schmidt rebound hammer testing: a critical approach. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*; 48: 69-76.

Laubscher D.H. & Jakubec, J., 2000. The IRMR/MRMR rock mass classification for jointed rock masses. *SME journal (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration)*, pp. 475-481.

Laubscher D.H., 1977. Geomechanics classification of jointed rock masses: mining applications. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Mining industry (London)*, 86: A1-A8.

Laubscher D.H., 1990. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 90 (10): 257–273.

Lauffer H., 1958. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau [Classificação de maciços rochosos para construção de túneis]. *Geologie und Bauwesen*, 24(1): 46-51. (Tradução 597, J. A. Pinto de Campos, LNEC, 1975, 12pp.)

Lauffer H., 1988. Zur Gebirgsklassifizierung bei Frasvortrieben. *Felsbau*, 6: 137-149.

López Jimeno C. & Díaz Méndez B., 1997. Clasificación de los terrenos según su excavabilidad. In: López Jimeno C., ed, *Manual de túneles y obras subterráneas*. Entorno Grafico, S.L., Madrid. pp. 183-210.

Mandl G., 2005. Rock joints: the mechanical genesis. Springer-Verlag. 221 pp.

Maranha das Neves E., 1994. Estados limites e segurança em Geotecnia. *Geotecnia, Rev. Soc. Portg. Geotecnia, Lisboa*, 72: 5-62.

Marçal, H., 1968. O abastecimento de água à cidade do Porto e à vila de Matosinhos. *Boletim da Biblioteca Pública Municipal de Matosinhos*, 15, 55 pp. + estampas e plantas.

Marinos P.G. & Hoek E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proceedings GeoEng2000 on Geotechnical and Geological Engineering (Melbourne, Victoria, Australia). Lancaster, PA: Technomic Publishers, pp. 1422-1442.

Marinos P. & Hoek E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG), 60: 85-92.

Marinos P.G., Marinos V. & Hoek E., 2007. The geological strength index (GSI): a characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. In: Mark C., Pakalnis R. & Tuchman R.J., eds., Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining. pp. 87-94.

Marinos V., Marinos P.G. & Hoek E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. Bull. Eng. Geol. Environ, 64: 55-65.

Martins A., 2011. Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca D'Água (sector de carvalhido Burgães): implicações para o modelo geomecânico comportamental. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 172pps. (Tese de mestrado)

Matos Fernandes M., 2000. Eurocódigo 7: questões essenciais e ponto da situação. VII Congresso Nacional de Geotecnia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Medley E., 1999. Systematic characterization of melange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures. Felsbau: Rock and Soil Engineering – Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling, 3: 152-162.

Miller R.P., 1965. Engineering classification and index properties for intact rock. PhD Thesis, University of Illinois, 282 pp.

Miranda T., Gomes Correia A. & Ribeiro e Sousa L. (2006). Determinação de parâmetros geomecânicos em formações rochosas e maciços heterogéneos. Revista Engenharia Civil, UM, 25: 17-40.

Miranda T., Gomes Correia A., Nogueira I., Santos M. F., Cortez P. & Ribeiro e Sousa L. (2007) Alternative models for the calculation of the RMR and Q indexes for granite rock masses. In: Sousa, L.R. et al. (eds). Applications of computational mechanics in Geotechnical Engineering V: proceedings of the 5th International Workshop, Guimarães, Portugal, 2007. Taylor & Francis, London, p. 151-162.

Monticelli J.J., 1984. Influência da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos no projeto de fundações de barragens: fase de viabilidade. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo. 149 pp.

Moreira, P. F. S., 2009. Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos): implicações para o modelo geomecânico comportamental. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 121 pp. + 7 anexos.

Müller L., 1990. Removing the misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method, Tunnels & Tunnelling, 22: 15-18.

Nicholson G. A., Bieniawski Z. T. (1990) A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. International Journal of Min Geology Eng. 181–202.

Norbury, D. R., 1986. The Point Load Test. Engineering Geology Special Publications. Geological Society, London, 2: 325-329.

Oliveira R., 1986. Geologia de engenharia e mecânica das rochas. Conceitos fundamentais. Metodologia de estudo de maciços rochosos. In: Simpósio Sul Americano de Mecânica das Rochas. Porto Alegre, Brasil.

Palmström, A., 1975. Characterization of degree of jointing and rock mass quality. Intern. Report Ing. AB. Berdel, A.S. Oslo

- Palmström A. & Stille H., 2010. Rock engineering. Thomas Telford Ltd., 408 pp.
- Palmström A. (1996). Characterization of rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. Tunnel Underground Space Technol., vol. 11, No. 2, pp. 175-186 (part 1); Vol. 11, No 3, pp. 287-303 (part 2).
- Peacock D.C.P., Harris S.D. & Mauldon M., 2003. Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies. J. Struct. Geol., 25: 109-119.
- Peres Rodrigues F.M., 1977. Anisotropia das rochas e dos maciços rochosos (I volume). Memória LNEC, Lisboa, 483: 1-244.
- Price D.J., 2009. Engineering geology: principles and practice. Springer, 450 pp.
- Priest S.D. & Hudson J.A., 1976. Discontinuity spacings in rock. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 13: 135-148.
- Priest S.D. & Hudson J.A., 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 18: 183-197.
- Priest S.D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering. Kluwer Academic Publishers. 473 pp.
- PROCEQ (2012). Application note: rock and concrete strength. Proceq UK. (consultado: Abril de 2012: http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/Application_Notes/English/Rock_and_Concrete_Strength_2012.01.31.pdf).
- Rabcewicz L.V. & Golser J., 1973. Principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian Tunnelling Method". Water Power. pp. 88-93.
- Rabcewicz L.V., 1964/1965. The new Austrian tunneling method. Water Power, Part 1, November 1964, pp. 511-515, Part 2, January 1965, pp. 1195-1197.
- Rebello da Costa, A., 1788. Descrição topográfica e histórica da cidade do Porto: 3ª edição (Fac-smile), Editora Frenesi, Lisboa. 273 pp.
- Ribeiro e Sousa L., 2004. Acidentes e danos associados a obras subterrâneas. Geotecnia, Rev. Soc. Portg. Geotecnia, Lisboa, 100: 334-344.
- 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.
- Riedmüller G. & Schubert W., 1999. Critical comments on quantitative rock mass classifications. Felsbau 17(3): 164-167.
- Ritter W., 1879. Die Statik der Tunnelgewölbe. Springer, Berlin.
- Rocha M., 1976. Estruturas subterrâneas. LNEC, Lisboa, 173 pp.
- Rocha M., 1981. Mecânica das rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. 445 pp.
- Romana M., 1985. New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes. In: Proceedings Int. Symp. Rock Mechanics Mining Civ. Works. ISRM, Zacatecas, Mexico, 59-63.
- Romana M., 1993. A geomechanical classification for slopes: Slope mass rating. In: Hudson J., Ed., Comprehensive Rock Engineering, Pergamon, 3: 575-600.
- Romana M., 1995. The geomechanical classification SMR for slope correction. Proceedings 8th Int. Congress Rock Mechanics, ISRM, Tokyo. 3: 1085-1092.

Romana M., 2003. DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid. 9 pp.

Romana M., 2004. DMR (an adaptation of RMR), a new geomechanics classification for use in dams foundations. In: Actas do 9º Congresso Luso de Geotecnia. Aveiro. 12 pp.

Rosas da Silva, D.J. 1936. Granitos do Porto. Relatório das provas de agregação, Universidade do Porto, 63pp. Tectonics, 26, TC6009, 24 pp.

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). In: Abstracts of the Conference on Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies in the Earth and Planetary Sciences (CORALS II), May 18–20, 2011, Spanish CSIC Central Campus, Madrid, Spain. 1 pp.

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. Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions, pp. 1133-1144.

Schmidt, E., 1951. A non-destructive concrete tester. Concrete, 59 (8): 34-35.

Silva Cardoso A., 2004. Modelação e segurança. In: 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro. Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

Singhal, B. B. & Gupta, R. P., 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer-Verlag GmbH, 408 pp.

Singh B. & Goel R. K., 1999. Rock mass classification: a practical approach in civil engineering. Elsevier. 250 pp.

Singh B. & Goel R.K. ,2011. Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides. Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 365 pp.

Skinner E.H., 1988. A ground support prediction concept: the rock structure rating (RSR) model. In Kirkaldie, L., ed., Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM International, pp. 43-64.

Snow D.T., 1969. Anisotropic permeability of fractured media. Water Resources Research, 5(6): 1273-1289.

Terzaghi K., 1946. Rock defects and locals on tunnel supports. In: In: Proctor R.V. & White T.L., eds, Rock tunnelling with steel supports, The Commercial Shearing & Stamping Co.. Youngstown, Ohio, 1: 17-99.

Terzaghi R.D., 1965. Sources of errors in joint surveys. Geotéchnique, 15(3): 287-304.

Vardakos S. (2004). A rock mass classification tool for personal digital assistants. The Charles E. Via Jr. Department of Civil and Environmental Engineering. Geotechnical Engineering Group. Blacksburg, Virginia. 61 pp.

Wang H.F. (2000). Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology. Princeton University Press, 276 pp.

Wickham G.E., Tiedemann H.R. & Skinner E.H. (1974). Ground support prediction model: RSR concept. In: Proceedings 2nd North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference (RETC), San Francisco. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 691-707.

Wickham G.E., Tiedemann, H.R. & Skinner, E.H. (1972). Support determination based on geologic predictions. In: K.S. Lane & L.A. Garfield, (eds), Proceedings of the 1st North American Rapid Excavation Tunneling Conference (RETC), Chicago. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 43-64.

Yassar, E. & Erdogan, Y., 2004. Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 71: 281-288.

Zuquette, L. V. & Gandolfi, N., 2004. *Cartografia geotécnica*. Oficina de textos, Brasil, 198 pp.