



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca D'Água (sector de Carvalhido–Burgães): implicações para o modelo geomecânico comportamental

André Pereira Martins



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca D'Água (sector de Carvalhido–Burgães): implicações para o modelo geomecânico comportamental

André Pereira Martins

Nº 1030441

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 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, Instituto Superior de Engenharia do Porto

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

Mestre José Filinto Castro Trigo
Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Carlos Ramos
Departamento de Controlo Operacional, MonteAdriano Agregados SA
Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Dedico esta tese ao meu Avô Mário...

Agradecimentos

Enalteço a importância de todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para a execução desta dissertação de mestrado que foi encetada por volta de Março de 2010 e concluída a sua redacção em Setembro de 2011. No entanto, agradeço em particular:

- Aos meus orientadores, Professor Doutor Helder Chaminé (ISEP) e Professora Doutora Maria José Afonso (ISEP), expresso a minha gratidão pelos ensinamentos, acompanhamento e apoio no campo e gabinete prestados durante todo o processo de elaboração desta dissertação. Agradeço a partilha exaustiva da bibliografia necessária e os excelentes meios e condições de trabalho que me proporcionaram no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (ISEP);
- Ao Prof. Doutor Helder I. Chaminé (ISEP), meu orientador, um agradecimento especial pela constante disponibilidade e dedicação no acompanhamento de todas as etapas do estudo. Pela confiança que sempre me transmitiu e por ser para mim um exemplo de sabedoria e de humildade na busca de conhecimento;
- À Prof. Doutora Maria José Afonso (ISEP), minha co-orientadora, pela total dedicação e atenção ao longo deste percurso e pela presença constante durante todos estes longos meses. Agradeço toda a sensatez na orientação dos trabalhos levados a cabo, assim como a boa disposição e partilha nos momentos menos bons. Por fim, grato pela partilha franca de dados e resultados inéditos da sua investigação de doutoramento;
- Aos colegas e amigos Mestre Patrícia Sousa Moreira e Mestre Rui Santos Silva, o meu reconhecimento, tanto pelo apoio exaustivo nos trabalhos de campo como nos mais variados trabalhos de gabinete. Agradeço a cooperação, incentivo, preocupação e a força que me transmitiram em todos os momentos. Obrigado por todo o esforço e por tudo o que me ensinaram. Destaco ainda os colegas Eng.^º Inês Madaíl Bastos, Mestre Joana Ferreira, Mestre Ivo Albuquerque e Eng.^º Ricardo Pereira, pelo apoio pontual, mas decisivo, em vários levantamentos de campo durante 2010/2011;
- Ao Mestre Luís Ramos (MonteAdriano-Agregados) e ao Mestre Luís Fonseca (MonteAdriano-Agregados), pela partilha da base de dados geotécnico-geomecânica sobre compartimentação de maciços rochosos, assim como pela disponibilidade na solução de algumas questões;
- Aos Mestres Ana Pires, Liliana Freiras e José Teixeira (LABCARGA|ISEP) pelo contributo decisivo que prestaram na fase de conclusão deste estudo e pelo incentivo, alegria e companheirismo sincero;

- Ao director do Centro de Prestações de Serviço Especializados Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), Prof. H. I. Chaminé, por todas as facilidades na utilização dos recursos e equipamentos do laboratório. 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;
- Um agradecimento ao Centro de Investigação GEOBIOTEC|UA (grupo de georrecursos, geotecnia e geomateriais) da Universidade de Aveiro, através do seu coordenador Professor Catedrático Doutor Fernando Rocha, na análise geoquímica de algumas amostras graníticas dos subterrâneos;
- A todos os meus Amigos, que sempre me apoiaram e que desempenham um papel importantíssimo na minha vida...;
- À Rafaela, pelo amor, paciência e compreensão. Por ser maravilhosa, por me fazer feliz e por me ter tornado um ser humano mais exigente e completo...;
- Por fim, à minha Mãe, Irmãos e Avó por estarem sempre presentes, disponíveis e por serem os meus melhores amigos. Agradeço em especial à minha Mãe por ter superado todas as dificuldades em prol dos filhos, pela educação que nos deu e por ser a melhor Mãe do mundo. *Obrigado!*

Palavras-chave

Maçiços rochosos, Geomecânica, Técnica de amostragem linear.

Resumo

Este trabalho pretende enfatizar a importância da elaboração de uma base de dados extensa e robusta para o melhoramento da cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico do sector de Carvalhido–Burgães (Porto). Este estudo envolveu a análise e o refinamento das principais características geomecânicas ao longo de um traçado com cerca de 1220 m, para a caracterização do maciço rochoso da galeria subterrânea Carvalhido–Burgães. Para esta caracterização foram coligidos e uniformizados dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos relativos a várias campanhas de campo, realizadas entre 2005 e 2011, tendo estado a técnica da amostragem linear aplicada ao grau de compartimentação do maciço rochoso na base do seu estudo. Além disso, procedeu-se a um tratamento estatístico das descontinuidades, bem como dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos a estas associados. O zonamento geotécnico do maciço granítico foi realizado sempre em estreita ligação com o conhecimento das características do maciço *in situ*. Pretende-se que esta metodologia contribua para um melhor conhecimento da compartimentação dos maciços rochosos em geral e, em particular, do modelo geomecânico comportamental do maciço rochoso do Porto.

Keywords

Rock masses, Geomechanics, Scanline sampling technique.

Abstract

This work intends to emphasize the importance of an extensive database in order to support the geotechnical mapping of underground granitic rock mass of the Carvalhido–Burgães sector (Porto). A detailed study and improvement of the main geomechanical constraints were done along an underground extension of *ca.* 1220 m, approximately, for the characterization of Carvalhido–Burgães granitic massif. For this characterization, geological, geotechnical and geomechanical data from five fieldwork campaigns, between 2005 and 2011, were analysed and integrated. Scanline sampling technique of discontinuities applied to the rock block size was on the basis of all these data. In addition, the evaluation methods of field data for discontinuities sets and the statistical characterisation of all their parameters are also presented. The geotechnical zoning of the granitic rock mass was refined in a straight connection with the knowledge of *in situ* rock mass features. This methodology contributed to a better understanding of the rock-mass block size and proved valuable in deepening our knowledge, in particularly, on Porto rock mass compartmental geomechanical modelling.

Índice

1	
1. Introdução	13
1.1. Enquadramento e objectivos	13
1.2. Metodologias e técnicas	14
2. Caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos	21
2.1. Generalidades	21
2.2. Fases dum estudo geológico e geotécnico	22
2.3. Descontinuidades: noção, tipos e génese	22
2.4. Caracterização e compartimentação do maciço rochoso	25
2.4.1. Metodologia e sistemática	25
2.4.2. Reconhecimento geológico	27
2.4.3. Cartografia das superfícies expostas do maciço	28
2.4.4. Parâmetros dos maciços rochosos	32
2.4.5. Parâmetros geológicos – geotécnicos das descontinuidades	40
2.4.6. Técnica de amostragem linear aplicada à superfície de descontinuidades	54
2.4.7. Técnicas “in situ”: o ensaio esclerométrico de resistência	57
2.4.8. Técnicas laboratoriais	62
2.4.9. Zonamento Geotécnico	62
3. Estudo da compartimentação do maciço rochoso granítico subterrâneo de Arca d'Água (sector de Carvalhido – Burgães)	67
3.1. Enquadramento geotectónico, geomorfológico e hidrogeológico regional	67
3.1.1. Geotectónica regional	67
3.1.2. Geomorfologia regional	68
3.1.3. Hidrogeologia regional	70
3.2. Geologia e geotecnia do túnel de Arca d'Água (sector de Carvalhido-Burgães)	71
3.2.1. Generalidades. Materiais e métodos	71
3.2.2. O Manancial de Paranhos no abastecimento de água à cidade do Porto	73
3.2.3. Geologia de superfície	75
3.2.4. Geologia e geotecnia subterrânea	77
3.2.5. Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos: apresentação e discussão dos dados	79
4. Conclusões	133
5. Referências bibliográficas	139
Anexos	145

Índice de figuras

Figura 1. Exemplo de aplicação da base de dados ScanGeoData BGD (Basic Geotechnical Description of Rock Masses) desenvolvida para maciços rochosos fracturados (Fonseca, 2008; Ramos, 2008; Galiza et al., 2009; Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011).	16
Figura 2. Exemplo de aplicação da base de dados SchmidtData UCS (Uniaxial Compressive Strength) desenvolvida para maciços rochosos fracturados (Fonseca, 2008; Ramos, 2008; Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011).	17
Figura 3. Descontinuidades sistemáticas (a) e singulares (b) (Singhal & Gupta, 2010).	23
Figura 4. Famílias de diaclases associadas a dobras (adaptado de Singhal & Gupta, 2010).	24
Figura 5. Representação esquemática de um maciço rochoso caracterizado pela presença de quatro famílias de descontinuidades (S, F1, F2, F3) (Scesi & Gattinoni, 2009).	34
Figura 6. Exemplos de diferentes formas geométricas de blocos (adaptado de Palmström & Stille, 2010).	37
Figura 7. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de Hudson, 1989, in González de Vallejo et al., 2002).	41
Figura 8. Atitude de uma descontinuidade (adaptado de Scesi & Gattinoni, 2009).	41
Figura 9. Exemplos de maciços graníticos com diferentes espaçamentos (\leftrightarrow) entre descontinuidades.	45
Figura 10. Influência da persistência das famílias de descontinuidades no grau de fracturação (adaptado de Singhal & Gupta, 2010).	46
Figura 11. Diferentes escalas de rugosidade em descontinuidades. A ondulação pode ser caracterizada pelo ângulo i (adaptado de ISRM, 1978).	47
Figura 12. Definição de abertura em descontinuidades abertas e largura em descontinuidades preenchidas (ISRM, 1978).	51
Figura 13. Aspectos da abertura em descontinuidades.	51
Figura 14. Exemplos de enchimento em descontinuidades.	52
Figura 15. 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.	55
Figura 16. Levantamento de descontinuidades pela técnica da amostragem linear.	55
Figura 17. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com aplicação da técnica de amostragem linear.	57
Figura 18. Esclerómetro portátil para material-rocha, tipo L da Proceq® (http://www.proceq.com/).	58
Figura 19. Aplicação do martelo de Schmidt em superfícies rochosas num maciço granítico (observa-se a limpeza da superfície e aplicação do martelo perpendicularmente à superfície de descontinuidade).	59
Figura 20. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão simples a partir da resistência de Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	60
Figura 21. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo: martelo de Schmidt (tipo L).	61
Figura 22. Mapa geológico regional da região do Porto (adaptado de Chaminé et al., 2003; Afonso 2011).	68
Figura 23. Esboço geomorfológico da região do Porto (adaptado de Afonso et al. 2004; Gomes, 2008; Afonso, 2011).	69
Figura 24. Imagem de satélite da área de estudo (adaptado de Google Earth Pro). Rectângulo a preto corresponde ao túnel de Arca d'Água (sector de Carvalhido-Burgães).	72
Figura 25. Exemplo de compilação e uniformização dos dados geológico-geomecânicos de campo.	73
Figura 26. Exemplo de compilação e uniformização dos ensaios “in situ” com o esclerómetro portátil, tipo L.	73
Figura 27. Plantas da “Arca Nova” e da “Arca Velha” e aspectos de ambas as arcas (Fontes 1908).	75
Figura 28. Planta do Manancial de Salgueiros e do troço terminal do Manancial de Paranhos, bem como do início da galeria comum aos dois mananciais	76
Figura 29. A: Aspecto da evansite nas galerias de Paranhos; B: Relação entre a evansite do Porto e as evansites mundiais (Sanchez-Moral et al., 2011).	78
Figura 30. Imagem de satélite do túnel de Arca d'Água (sector de Carvalhido-Burgães) (adaptado de Google Earth Pro).	80
Figura 31. Sector 1 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães).	81
Figura 32. Grau de alteração do maciço no Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	81
Figura 33. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	82

Figura 34. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	82
Figura 35. Abertura das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	83
Figura 36. Continuidade das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	83
Figura 37. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	84
Figura 38. Curvatura das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	84
Figura 39. Rugosidade das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	85
Figura 40. Tipo de enchimento das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	85
Figura 41. Presença de água nas descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). (Dados recolhidos no período entre 24 de Outubro e 21 de Novembro de 2009)	86
Figura 42. Diagramas de rosetas relativo ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=202) do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), com indicação das direcções das descontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.	86
Figura 43. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=202) do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	87
Figura 44. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades sub-horizontais (n=48) do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	87
Figura 45. Sector 1 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) com diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico de: A – Total de descontinuidades (n= 202) presentes no maciço; B – descontinuidades sub-horizontais (n=48) presentes no maciço; C - descontinuidades (n=202) do maciço com indicação das direcções das descontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.	88
Figura 46. Resistência à compressão uniaxial nas descontinuidades (A) e no maciço (B) do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	89
Figura 47. Resistência à compressão uniaxial do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	89
Figura 48. Diferentes aspectos presentes no Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto): A, B e C – Aspecto global do maciço com evidentes planos de descontinuidade; D e F – Zonas de menor competência em que o maciço se encontra muito alterado a decomposto (W_{4-5}); E – Descontinuidade preenchida por Evansite.	93
Figura 49. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	94
Figura 50. Sector 2 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães).	98
Figura 51. Grau de alteração do maciço no Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	99
Figura 52. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	99
Figura 53. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	100
Figura 54. Abertura das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	100
Figura 55. Continuidade das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	101
Figura 56. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	101
Figura 57. Curvatura das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	102
Figura 58. Rugosidade das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	102

Figura 59. Tipo de enchimento das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	103
Figura 60. Presença de água nas descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). (Dados recolhidos no período entre 9 de Outubro e 20 de Dezembro de 2010)	103
Figura 61. Diagramas de rosetas relativo ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=801) do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), com indicação das direcções das descontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.	104
Figura 62. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=801) do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	104
Figura 63. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades sub-horizontais (n=117) do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	105
Figura 64. Sector 2 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) com diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico de: A – Total de descontinuidades (n= 801) presentes no maciço; B – descontinuidades sub-horizontais (n=117) presentes no maciço; C - descontinuidades (n=801) do maciço com indicação das direcções das descontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.	106
Figura 65. Resistência à compressão uniaxial nas descontinuidades (A) e no maciço (B) do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	107
Figura 66. Resistência à compressão uniaxial do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	107
Figura 67. Diferentes aspectos presentes no Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto): A – Presença de biofilme carbonatado de cor branca (moonmilk); B – Fluxo de água considerável e presença de óxidos de ferro de cor avermelhada. C e D – Aspecto global do maciço.	110
Figura 68. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	111
Figura 69. Grau de alteração do maciço no Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	115
Figura 70. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	115
Figura 71. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	116
Figura 72. Abertura das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	116
Figura 73. Continuidade das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	117
Figura 74. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	117
Figura 75. Curvatura das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	118
Figura 76. Rugosidade das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	118
Figura 77. Tipo de enchimento das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	119
Figura 78. Presença de água nas descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). (Dados recolhidos no período entre 9 de Outubro e 6 de Novembro de 2010)	119
Figura 79. Diagramas de rosetas relativo ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=220) do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), com indicação das direcções das descontinuidades que se apresentam húmidas a gotejantes (1) e ligeiramente húmidas a húmidas (2). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.	120
Figura 80. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=220) do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	120
Figura 81. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades sub-horizontais (n=32) do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	121

Figura 82. Sector 3 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) com diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico de: A – Total de descontinuidades (n= 220) presentes no maciço; B – descontinuidades sub-horizontais (n=32) presentes no maciço; C - descontinuidades (n=220) do maciço com indicação das direcções das descontinuidades que se apresentam húmidas a gotejantes (1) e ligeiramente húmidas a húmidas (2). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água. _____ 121

Figura 83. Resistência à compressão uniaxial do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). _____ 122

Figura 84. Diferentes aspectos presentes no Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto): A – Aspecto global do maciço; B – Grupo de descontinuidades sub-verticais pertencentes à mesma família; C – Presença de óxidos de ferro de cor avermelhada no tecto da galeria; D – Placa com indicação do encontro do Manancial de Paranhos com o Manancial de Salgueiros. _____ 125

Figura 85. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). _____ 126

Índice de quadros

Quadro 1. Tipos de descontinuidades (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).	23
Quadro 2. Classificação dos mapas geotécnicos em função do seu objectivo e conteúdo proposta pela UNESCO-IAEG (1976), (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	30
Quadro 3. Tipologia dos mapas geotécnicos em função da sua escala e conteúdos (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	31
Quadro 4. Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades	34
Quadro 5. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico de descontinuidades (ISRM, 1978).	36
Quadro 6. Classificação do maciço rochoso em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1978).	36
Quadro 7. Evolução do grau de alteração do maciço rochoso de acordo com a ISRM (1981).	39
Quadro 8. Versão simplificada dos graus de alteração e sua relação com a permeabilidade (ISRM, 1981).	39
Quadro 9. Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos de caracterização das descontinuidades.	40
Quadro 10. Representações gráficas da atitude geológica.	42
Quadro 11. Terminologia para caracterizar os maciços rochosos em função do espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1981).	44
Quadro 12. Descrição da continuidade (persistência) das descontinuidades (ISRM, 1981).	46
Quadro 13. Classificação da rugosidade (R) das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978).	48
Quadro 14. Descrição do grau de alteração do material rocha (ISRM, 1978).	49
Quadro 15. Caracterização do estado de resistência da parede das descontinuidades (ISRM, 1978).	50
Quadro 16. Caracterização da abertura das descontinuidades (ISRM, 1978).	52
Quadro 17. Descrição da presença de água nas descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).	54
Quadro 18. Avaliação da percolação da água em descontinuidades (ISRM, 1978).	54
Quadro 19. Classificação da resistência à compressão simples (ISRM, 1981).	61
Quadro 20. Análise geoquímica de 4 amostras do granito aflorante no túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) bem como de uma amostra de Granito do Porto, da Pedreira da Trindade (Almeida 2001).	79
Quadro 21. Síntese dos parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	91
Quadro 22. Resumo estatístico dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	92
Quadro 23. Descrição geral das zonas geotécnicas do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	94
Quadro 24. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	96
Quadro 25. Síntese dos parâmetros das descontinuidades do zonamento geotécnico do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	97
Quadro 26. Síntese dos parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	108
Quadro 27. Resumo estatístico dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	109
Quadro 28. Descrição geral das zonas geotécnicas do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	111
Quadro 29. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	113
Quadro 30. Síntese dos parâmetros das descontinuidades do zonamento geotécnico do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	114
Quadro 31. Síntese dos parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	123
Quadro 32. Resumo estatístico dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	124
Quadro 33. Descrição geral das zonas geotécnicas do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	126
Quadro 34. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	128
Quadro 35. Síntese dos parâmetros das descontinuidades do zonamento geotécnico do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).	129

Anexos (ver CD-ROM)

Anexo I. Ficha de levantamento geológico e geomecânico relativo ao Sector 1.

Anexo II. Ficha de levantamento geomecânico relativa ao Sector 1.

Anexo III. Ficha de levantamento geológico e geomecânico relativo ao Sector 2.

Anexo IV. Ficha de levantamento geomecânico relativa ao Sector 2.

Anexo V. Ficha de levantamento geológico e geomecânico relativo ao Sector 3.

Anexo VI. Ficha de levantamento geomecânico relativa ao Sector 3.

1. Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objectivos

A presente tese insere-se na Unidade Curricular “Dissertação/Estágio/Projecto” 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.

A presente dissertação enquadra-se no espírito do projecto GROUNDURBAN (“Urban groundwater and environmental management in the Northwest Portugal”; POCI/CTEGEX/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, entre outros, 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-IPPISEP|PAD'2007/08 através do projecto HYDROURBAN (“Hidrogeologia, geomecânica e geoconservação de antigas minas de água: contribuição para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e peri-urbanas”). O presente trabalho complementa o estudo de Moreira (2009), enquadrando-se, igualmente, nos trabalhos de investigação de doutoramento de Afonso (2011).

Este trabalho foi desenvolvido, essencialmente, em três fases complementares. Uma primeira fase, ligada à recolha exaustiva de informação bibliográfica de especialidade e histórica do sector estudado. Uma segunda fase, referente ao trabalho de campo, com a recolha dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos. Uma terceira fase, relativa ao trabalho de gabinete, em que se procedeu à análise, processamento e interpretação dos dados para atingir os objectivos propostos. Nesta última etapa foram compilados, uniformizados e analisados os dados de três campanhas de terreno no período entre 2005 (Fernandes, 2005) e 2010, tendo estado o signatário envolvido nas campanhas de 2009 e 2010. Além da realização de duas novas campanhas no âmbito desta dissertação durante 2010 e 2011.

Esta dissertação tem como objectivo geral refinar a caracterização das condicionantes geológico-geotécnicas e geomecânicas do maciço rochoso granítico do Manancial de Paranhos, contribuindo assim para um melhor conhecimento dos subterrâneos da cidade do Porto e para a caracterização da compartimentação de maciços rochosos fracturados com o propósito de avaliar a rede de fracturação e qualidade geotécnica. Para o efeito, recorreu-se à rede de galerias subterrâneas (ou túneis) da cidade do Porto correspondente ao Manancial de Paranhos (também conhecido como

Manancial de Arca d'Água ou Arca das Três Fontes). Desta forma, dividiu-se o trabalho em várias fases com os seguintes objectivos:

- Caracterização geológico-geotécnica das superfícies expostas do maciço granítico no sector Carvalhido–Burgães do Manancial de Paranhos (Porto), com recurso à técnica da amostragem linear para a avaliação do grau de compartimentação e caracterização geomecânica segundo as recomendações propostas pela ISRM (1978, 1981);
- Estimar a resistência geomecânica das superfícies de descontinuidade e do material-rocha presentes ao longo de toda a galeria subterrânea através da realização de ensaios geomecânicos *in situ* com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L);
- Caracterização básica dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos através de uma análise estatística;
- Definir um zonamento geotécnico com base nas caracterizações efectuadas e contribuir para a delimitação de um modelo geomecânico comportamental.

1.2. Metodologias e técnicas

Foi realizada uma compilação, uniformização e tratamento de dados geológico-geotécnicos e geomecânicos recolhidos em várias campanhas de terreno levadas a cabo no período entre 2005 e 2011. Todas as campanhas foram realizadas sob a coordenação do Prof. Doutor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP) e coadjuvadas pela Doutora Maria José Afonso (DEG|ISEP).

Os resultados apresentados na descrição do caso de estudo correspondem a uma das galerias subterrâneas com maciço rochoso exposto do manancial de Paranhos, com uma extensão aproximada de 1200 m, que se prolonga desde a Rua de S. Dinis até à Rua dos Burgães (cidade do Porto). Os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos tratados resultaram do levantamento *“in situ”* de 1223 descontinuidades e 217 estações de ensaios geomecânicos (ensaio esclerométrico ou martelo de Schmidt) com o recurso à utilização da técnica da amostragem linear aplicada a superfícies expostas dos maciços rochosos (e.g., Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Peacock *et al.*, 2003) e da aplicação dos critérios propostos pela ISRM (1978, 1981, 2007), da GSE (1995) e da ASTM (2001).

As fichas de registo propostas para este tipo de levantamento geológico-geomecânico foram uniformizadas e actualizadas da bibliografia (e.g., ISRM, 1978; González de Vallejo *et al.*, 2002) para uma melhor adequação ao trabalho em causa, o que conduziu à obtenção de novas fichas-modelo para o registo de dados geomecânicos.

Todos os dados foram compilados e tratados em duas bases de dados dinâmicas, criadas em Microsoft® Excel 2007, a *ScanGeoData/BGD* e a *SchmidtData/UCS* (Fonseca, 2008; Ramos, 2008; Galiza *et al.*, 2009; Fonseca *et al.*, 2010; Galiza *et al.*, 2011). Estas permitiram efectuar um cruzamento exaustivo de toda a informação e consequente análise e interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos para a elaboração da proposta de um zonamento geotécnico-geomecânico (figuras 1 e 2). O tratamento estatístico das descontinuidades, que conduziu à definição das principais famílias de descontinuidades, foi feito com recurso à elaboração de diagramas de contorno estrutural e de rosetas, utilizando o programa geoinformático Dips v. 5.1 da Rocscience®, cuja licença está salvaguardada pelo LABCARGA|ISEP.

2. Caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos

2. Caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos

2.1. Generalidades

O estudo aprofundado de maciços rochosos é determinante para a solução dos mais diversos problemas decorrentes em projectos de engenharia. De acordo com González de Vallejo *et al.* (2002), a mecânica das rochas ocupa-se do estudo teórico e prático das propriedades e comportamento mecânico dos materiais rochosos, e da sua resposta perante acções de forças aplicadas no seu ambiente físico. O desenvolvimento da mecânica das rochas teve início no resultado da utilização do meio geológico para obras superficiais, subterrâneas e exploração de recursos minerais (Rocha, 1981).

Um maciço rochoso difere de outros materiais aplicados à engenharia uma vez que este é intersectado por discontinuidades de vários tipos, as quais lhe conferem uma estrutura descontínua. Assim, deve ser feita uma clara distinção entre material-rocha e maciço rochoso. Material-rocha pode ser descrito como a rocha intacta entre discontinuidades. Um maciço rochoso é um meio rochoso que pode conter planos de estratificação, falhas, diaclases, dobras e outros elementos estruturais. Um maciço rochoso é descontínuo e possui propriedades frequentemente heterogéneas e anisotrópicas (Rocha, 1981; Brady & Brown, 2004).

O comportamento e as propriedades mecânicas dos maciços rochosos são influenciados pelos seguintes factores (González de Vallejo *et al.*, 2002):

- Litologia e propriedades petrofísicas da matriz rochosa;
- Estrutura geológica e discontinuidades;
- O grau de alteração e alterabilidade;
- Estado de tensão a que está submetido o material;
- Condições hidrogeológicas.

Para que se faça uma boa caracterização geotécnica é necessário conhecer, tanto quanto possível, as características geológicas e mecânicas dos maciços rochosos onde se pretende implementar a obra de engenharia. Pretende-se assim definir com maior precisão os processos construtivos, diminuindo custos de obra e acidentes. Em certos casos, esta caracterização é negligenciada porque os custos inerentes são considerados desnecessários ou por se considerar que o tempo dispendido nesta operação representa um atraso nos prazos de conclusão da obra. Uma correcta caracterização geotécnica apoiada num levantamento geológico adequado é determinante para o sucesso de um dado projecto de engenharia (Rocha, 1981).

2.2. Fases dum estudo geológico e geotécnico

Um estudo geológico-geotécnico pode ter diferentes abordagens, dependendo do tipo ou importância da obra que se pretende implementar. Quaisquer que sejam os métodos a adoptar no estudo, também podem ter vários níveis de especificidade que variam em função do grau de confiança pretendido na resposta aos problemas existentes. Apesar de todos os meios actualmente existentes para a realização de uma prospecção geológica, deverá existir um plano bem definido dos trabalhos a realizar para que se atinjam os objectivos pretendidos recorrendo somente aos métodos adequados ao caso em análise.

Sabendo da importância dos estudos geológico-geotécnicos, quer do ponto de vista técnico, quer económico, é determinante planificar adequadamente todas as suas fases às condições e objectivos do projecto.

O estudo geológico-geotécnico deve ter continuidade ao longo de todas as etapas de um projecto de engenharia que se dividem em cinco principais: estudo de viabilidade, ante-projecto, projecto de execução, construção e exploração.

2.3. Descontinuidades: noção, tipos e génese

Uma entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma dada formação é genericamente designada por descontinuidade. Este elemento tem uma resistência à tracção muito baixa ou nula (ISRM, 1978, 1981; Rocha, 1981).

As superfícies ou planos de descontinuidade são responsáveis pelo carácter descontínuo e anisotrópico dos maciços rochosos, condicionando as suas propriedades geomecânicas, pois influenciam o comportamento resistente, deformabilidade, permeabilidade e hidráulico dos mesmos. A orientação e a resistência ao corte das descontinuidades são os aspectos mais importantes a ter em conta no que diz respeito à estabilidade e resistência de um qualquer maciço rochoso. Assim, verifica-se uma acrescida dificuldade na avaliação do comportamento mecânico dos maciços perante uma obra de engenharia. Num meio geodinâmico, são as descontinuidades que mais estão sujeitas à alteração/meteorização e são veículos preferenciais para a circulação de água. Quando as descontinuidades apresentam orientação, características físicas e resistentes semelhantes, são agrupadas numa mesma família e estudadas em conjunto. Descontinuidades com características singulares, de grande extensão, que interceptam as demais famílias (*e.g.*, falhas, filões, etc.) devem ser analisadas de forma individual.

As superfícies de descontinuidade podem ter origem sedimentar (*e.g.*, superfícies de estratificação ou laminação), diagénica (*e.g.*, estruturas filoneanas) ou tectónica (*e.g.*, diaclases e falhas).

No quadro 1 organizam-se os diferentes tipos de descontinuidades em: sistemáticas, quando aparecem em famílias, e; singulares, quando aparece um único plano que atravessa o maciço rochoso. A figura 3 esquematiza esta distinção.

Quadro 1. Tipos de descontinuidades (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo *et al.*, 2002).

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	- Planos de estratificação	- Falhas
	- Planos de laminação	- Filões
	- Planos de xistosidade	- Discordâncias
	- Diaclases e fissuras	
Lineares	- Intersecção de descontinuidades planares	- Eixos de dobras
	- Lineações	

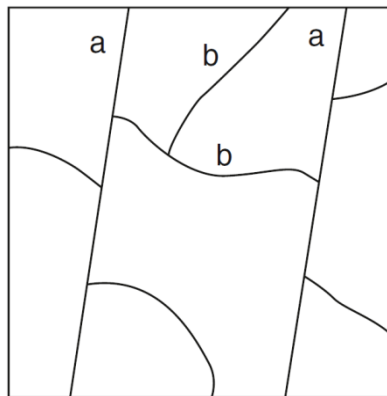


Figura 3. Descontinuidades sistemáticas (a) e singulares (b) (Singhal & Gupta, 2010).

Diaclases (por vezes são referidas como “fracturas” ou “fissuras”) são os planos de descontinuidade mais frequentes nos maciços rochosos e correspondem, segundo a ISRM (1978), a superfícies de fracturação ou rotura do maciço ao longo das quais não existe rejeito (aparente) entre os blocos rochosos. Podem ser, por exemplo, de origem tectónica frágil associada a episódios orogénicos ou surgir em rochas ígneas por contracção das superfícies rochosas durante o arrefecimento magmático. Constituem estruturas planares não penetrativas, características de um comportamento frágil ou semi-frágil das rochas.

A figura 4 exemplifica a relação entre as principais famílias de discontinuidades associadas a uma dobra.

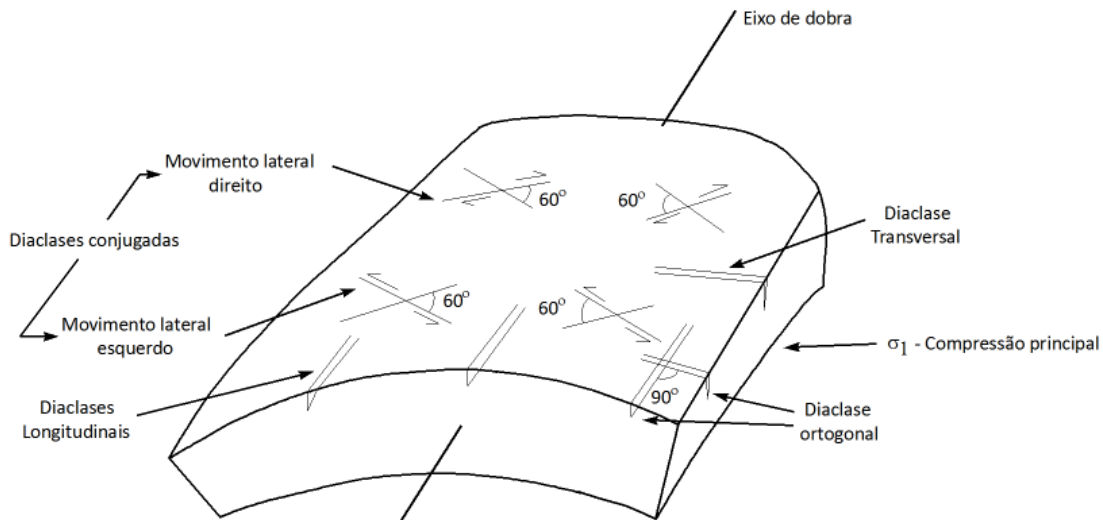


Figura 4. Famílias de diaclases associadas a dobras (adaptado de Singhal & Gupta, 2010).

Do ponto de vista geotécnico, segundo os critérios da IRSM (1978, 1981), é determinante fazer uma detalhada caracterização dos seus parâmetros: analisar a amplitude da abertura da diaclase e a sua variação ao longo da superfície de diaclasamento; identificar, caso exista, o material de preenchimento e as suas características mineralógicas e mecânicas; verificar a sua rugosidade, continuidade, terminação e presença de água. Todas estas características influenciam o comportamento mecânico das discontinuidades e, conseqüentemente, do maciço rochoso.

Planos de estratificação são os planos de descontinuidade que limitam os estratos das rochas sedimentares. Surgem de forma sistemática com elevada continuidade. O espaçamento pode oscilar entre poucos centímetros a vários metros.

Planos de laminação aparecem em rochas sedimentares de forma sistemática e correspondem aos planos que limitam as lâminas ou níveis mais pequenos de uma sequência sedimentar.

Planos de xistosidade resultam de processos de deformação em rochas por acção tectonometamórfica num regime dúctil. Surgem normalmente perpendiculares à direcção que originou maior encurtamento na rocha por acções de compressão. São sistemáticas com espaçamentos na ordem do milímetro.

Falhas são descontinuidades singulares que correspondem a planos de rotura ou fracturação com deslocamento relativo entre os blocos. Geralmente apresentam grande continuidade no maciço rochoso, com extensões que podem ir até centenas de quilómetros. O plano resultante designa-se por espelho de falha e as superfícies deslizantes possuem, normalmente, estrias. A caixa de falha resultante da separação dos dois blocos pode estar preenchida por outros materiais, que podem

ser resultado da trituração do material rochoso na geração da falha. As falhas podem ser normais, inversas ou de desligamento.

Filões são intrusões de massas minerais que preenchem o espaço de descontinuidades pré-existentes. São de origem ígnea e o seu estudo terá de ser efectuado de acordo com o tipo de material que o constitui e características dos blocos da rocha encaixante. Muitas vezes as rochas filoneanas estão tectonizadas e constituem estruturas geológicas descontínuas.

2.4. Caracterização e compartimentação do maciço rochoso

2.4.1. Metodologia e sistemática

Num estudo geomecânico é fundamental que se faça uma análise descritiva e de caracterização dos maciços rochosos com o objectivo de conhecer e interpretar as propriedades e características dos materiais rochosos. Esta análise tem lugar nas investigações *in situ* onde se pretende, entre outros, definir as condições geológicas gerais e geotécnicas de pormenor, planificar fases de investigação mais avançadas e identificar potenciais riscos geológicos.

Segundo González de Vallejo *et al.* (2002), devido à grande variedade de condicionantes e propriedades, a caracterização dos maciços pode ser uma tarefa complexa, sobretudo se estivermos na presença de materiais rochosos e terrosos, zonas fracturadas, tectonizadas e/ou meteorizadas. Na descrição dos maciços devem incluir-se todos os aspectos e parâmetros que podem ser observados, deduzidos e medidos em afloramento e laboratório.

Os mesmos autores assinalam ainda que as descrições dos maciços rochosos com fins geotécnicos necessitam de observações e estudos adicionais às descrições com fins meramente geológicos, verificando-se, portanto, a necessidade de estabelecer uma sistemática que uniformize critérios e facilite a comunicação entre todos os profissionais que tenham que realizar trabalhos descritivos dos maciços. A ISRM (1981), reforça que deve existir uma linguagem comum a todos os geoprofissionais que colmate a falta de meios adequados e padronizados que transmitam avaliações gerais dos maciços rochosos a quem não teve oportunidade de os observar. Desta forma, deve evitar-se a subjectividade nas descrições efectuadas, realizando observações sistemáticas e utilizando uma terminologia padrão, tendo em conta os seguintes aspectos (González de Vallejo *et al.*, 2002):

- Todos os factores devem ser examinados sistematicamente e com uma sequência lógica;
- Não deve omitir-se qualquer informação básica sobre o afloramento;

- As descrições devem fornecer uma imagem mental precisa e permitir a dedução de informação mais relevante;
- O número de dados deve ser estatisticamente representativo.

Esta caracterização de campo é um exercício progressivo que se inicia com uma descrição geral das condições do terreno e com a identificação e classificação dos materiais que formam os maciços, definindo-se zonas mais ou menos homogêneas com base na litologia, estrutura tectónica, etc. Posteriormente, descreve-se e caracteriza-se com detalhe os componentes das diferentes zonas do maciço, onde se inclui o estudo da matriz rochosa e descontinuidades presentes de forma individualizada e objectiva (e.g., ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCCF, 1996). Por fim, classifica-se o maciço no seu conjunto, analisando tanto as suas propriedades intrínsecas como os factores externos que condicionam o seu comportamento. A partir dos dados obtidos, é possível realizar uma primeira análise geomecânica do maciço rochoso (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Para que a metodologia de recolha e tratamento da informação seja uniformizada, a ISRM (1981), propôs uma descrição geotécnica básica (*Basic Geotechnical Description*, BGD) que pretende:

- Fornecer uma linguagem inequívoca que permita ao observador transmitir informação geral do maciço rochoso que seja entendida por outros especialistas;
- Conter o máximo de dados quantitativos de interesse para a solução de problemas práticos;
- Sempre que possível, usar medições simples em alternativa a observações visuais.

A BGD tem como objectivo fundamental caracterizar e descrever os aspectos geológico-geotécnicos que permitam compreender o comportamento mecânico dos maciços rochosos, tendo em conta o seguinte (ISRM, 1981):

- Classificação da rocha e o seu grau de alteração, com uma descrição geológica simplificada à engenharia – estes dados são de grande interesse, visto que implicam bastante informação, particularmente de natureza litológica, geoquímica e petrofísica;
- Características estruturais do maciço rochoso, nomeadamente a sistematização, o padrão e a tipologia das descontinuidades (e.g., foliações sedimentares ou tectónicas, diaclases, falhas, etc.), o grau de fracturação (*“fracture intercept”/espaçamento*) – caracterizam aspectos geológicos básicos na compartimentação estrutural do maciço rochoso, possuindo, normalmente, considerável influência no comportamento mecânico do maciço;

- Características mecânicas, nomeadamente a resistência à compressão uniaxial do material-rocha e das superfícies de descontinuidades e, ainda, o ângulo de atrito das descontinuidades – desempenham um papel considerável no comportamento mecânico dos maciços rochosos, sendo possível, a partir dos seus valores, inferir outras características mecânicas, e são facilmente quantificados através de análises expeditas.

Existem fichas-tipo de registo de campo para aplicar a BGD, podendo estas sofrer adaptações que dependem do caso de estudo e informações suplementares que sejam pertinentes. Os parâmetros do maciço rochoso e das descontinuidades podem ser descritos ou representados em forma simbólica (e.g., ISRM, 1978, 1981).

2.4.2. Reconhecimento geológico

O reconhecimento geológico na zona de estudo é uma das tarefas mais importantes na fase de estudo prévio. Deve efectuar-se após a revisão da informação recolhida e foto-interpretação, nomeadamente no que se refere a elementos de natureza topográfica, geológica, sismológica e geotécnica, de onde se obtém uma síntese geológica e topográfica básica. Esta informação permite empreender um reconhecimento geológico-geotécnico a partir da cartografia de base.

Em regiões onde tenham sido implementadas obras de engenharia de relevância ou com razoável índice de desenvolvimento, certamente existe informação importante para organizar o reconhecimento. Após a compilação de todos os dados de interesse, deverá existir uma abordagem no terreno com o objectivo de colmatar informações omissas nos documentos recolhidos e que permita elaborar uma cartografia geológica com uma escala adequada ao fim a que se destina.

O reconhecimento de campo deve compilar a seguinte informação (González de Vallejo *et al.*, 2002):

- Dados geológicos
 - Tipos de materiais, litologia e composição, contactos litológicos, estratificação e estruturas sedimentares.
 - Estrutura geológica e contactos tectónicos, grau de fracturação, descontinuidades sistemáticas e singulares, zonas de falhas e actividade tectónica.
 - Formações superficiais, zonas de alteração e grau de meteorização.
 - Condições geomorfológicas, processos e evolução morfológica do terreno.
- Descrição geotécnica de solos e maciços terrosos

- Composição dos solos segundo o sistema unificado de classificação de solos (USCS) (ASTM, 2010).
- Propriedades importantes, entre outras, através da análise da cor do solo, estrutura, densidade e consistência.
- Descrição geotécnica de maciços rochosos
 - Caracterização da matriz rochosa e das propriedades do maciço rochoso e descrição das descontinuidades.
- Dados hidrogeológicos e hidrológicos
 - Verificar níveis freáticos, inspeccionar poços, fontes e nascentes.
 - Localizar aquíferos, materiais permeáveis e impermeáveis, zonas de alagamento, zonas de recarga e drenagem, etc.
- Instabilidade do terreno
 - Indícios ou sinais de deslizamentos ou desprendimentos, áreas de erosão intensa, zonas de subsidência e cavidades.
- Acessos e condições de pesquisa
 - Localização de caminhos e vias de acesso para execução do reconhecimento *in situ*.
 - Disponibilidade de água, electricidade e autorizações do seu uso.
 - Selecção de locais possíveis para execução de futuras campanhas de prospecção *in situ*.
- Observação de patologias em estruturas
 - Inspeção de edifícios, pontes, túneis, aterros, muros e demais estruturas que se encontrem em redor do local de estudo, identificando possíveis danos estruturais.

O reconhecimento geológico é decisivo para perceber o desenvolvimento das unidades geológicas e estruturas geotectónicas que ocorram no local em estudo que sejam de interesse para o projecto e obra. Uma boa interpretação geológica permite definir os trabalhos de investigação geotécnica com maior rigor e com ganhos ao nível de custos e tempo.

2.4.3. Cartografia das superfícies expostas do maciço

Num maciço rochoso dever-se-á estabelecer distintas áreas com diferentes aspectos e tipos de materiais rochosos, por exemplo, heterogeneidade litológica, elementos geológico-estruturais, grau de fracturação, grau de alteração, o que permitirá uma divisão inicial por zonas ou, até mesmo, em sub-zonas (Zuquette & Gandolfi, 2004). A cartografia pode assumir várias denominações, entre as quais: “mapa geológico-geotécnico”, “mapa geotécnico”, “mapa de

geologia de engenharia” (*e.g.*, IAEG, 1976, 1981a, 1981b; Dearman & Eyles, 1982; Griffiths, 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004).

Para González de Vallejo *et al.* (2002), os mapas geotécnicos constituem um método em geologia de engenharia e engenharia geotécnica de representação cartográfica da informação geológico-geotécnica, com o objectivo de serem aplicados no planeamento e ordenamento do território, assim como em fase de projecto, construção e manutenção de obras de engenharia; incluem dados sobre as características e propriedades dos terrenos de uma determinada zona, permitindo avaliar o comportamento e prever problemas geológicos e geotécnicos dos referidos terrenos.

As descrições geológicas fornecidas pela cartografia geológica (topografia, relevo, litologia, estrutura, etc.) permitem deduzir informação valiosa sobre as propriedades dos maciços rochosos presentes, não sendo, porém, suficientes para serem aplicadas em engenharia geotécnica. Estas descrições não representam as componentes do meio geológico com significado geotécnico e a sua influência em trabalhos de planeamento e engenharia, nem o carácter dinâmico do meio geológico em relação à engenharia.

Um mapa geotécnico deve conter os seguintes aspectos gerais de interesse em engenharia geotécnica (Price & de Freitas, 2009; González de Vallejo *et al.*, 2002):

- descrição estratigráfica sucinta e idade relativa das formações geológicas presentes;
- litologia das formações e a estrutura geológica;
- propriedades físicas e mecânicas dos materiais;
- condições hidrogeológicas;
- condições geomorfológicas e dinâmicas;
- características resultantes da actividade humana (*e.g.*, minas e pedreiras);

O conteúdo, detalhe da informação e complexidade de um mapa geotécnico pode variar em função da escala e extensão da área em análise, dos objectivos pretendidos, da informação disponível, das técnicas de representação e da importância e relação dos factores geológico-geotécnicos. No quadro 2 apresenta-se uma classificação estabelecida pela UNESCO-IAEG (1976) e no quadro 3 afigura-se uma classificação dos mapas geotécnicos em função da sua escala e conteúdo, indicando também os seus métodos de elaboração e aplicações.

Quadro 2. Classificação dos mapas geotécnicos em função do seu objectivo e conteúdo proposta pela UNESCO-IAEG (1976), (adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2002).

Critério	Tipos de mapas	
Objectivo	- Específico: proporciona informação sobre um aspecto particular ou para um objectivo concreto (e.g., local dos resíduos, traçados de vias férreas, condições do terreno para a fundação de uma barragem, escavações subterrâneas, etc.).	
	- Múltiplo ou geral: proporciona informação referente a diversos aspectos, objectivos e usos geotécnicos.	
Conteúdo	- Temático ou analítico: apresenta detalhes ou avalia um componente determinado do meio geológico (grau de alteração, grau de fracturação de maciços rochosos, processos sísmicos, expansividade dos solos, etc.).	
	- Integrado: a) apresenta as condições geotécnicas descritivas de todos os principais componentes do meio geológico. b) zonamento do território em unidades homogéneas do ponto de vista geotécnico.	
	- Auxiliar: apresenta dados concretos de algum aspecto geológico e/ou geotécnico.	
	- Complementares: proporciona informação básica sobre algum aspecto geológico, geomorfológico, hidrogeológico, etc.	
Escala	- Grande:	>1:10.000
	- Média:	1:10.000 a 1:100.000
	- Pequena:	<1:100.000

Quadro 3. Tipologia dos mapas geotécnicos em função da sua escala e conteúdos (adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2002).

Tipo de Mapa	Geotécnico e Escala	Conteúdo	Método de elaboração	Aplicações
Regional	>1:10.000	Dados geológicos e litológicos, estrutura geotectónica, traços geomorfológicos regionais. Informação geral de furos geotécnicos e interpretações	Fotografia aérea, mapas topográficos e geológicos prévios, informação existente, observações de campo	Planeamento e reconhecimentos preliminares, informação geral sobre a região e tipos de materiais existentes
Local	1:10.000 a 1:500 (Etapa de reconhecimento preliminar)	Descrição e classificação de solos e rochas, estruturas, geomorfologia, processos geodinâmicos, localização de materiais para construção	Fotografia aérea, levantamentos de campo, medidas e dados de campo	Planeamento e viabilidade de obras e reconhecimento detalhado
Local	1:5.000 a 1:500 (Etapa de investigação <i>in situ</i>)	Propriedades dos materiais e condições geotécnicas, aspectos importantes para a construção de uma obra concreta	Os anteriormente referidos e ainda dados de sondagens, geofísica, ensaios <i>in situ</i> e laboratoriais	Detalhes sobre o local e problemas geológicos-geotécnicos. Dimensionamento de obras

De forma simples, os mapas geotécnicos podem agrupar-se em mapas de avaliação geotécnica do terreno e mapas de caracterização geotécnica. Independentemente do tipo de mapa geotécnico, estes deverão incluir uma série de informações básicas (González de Vallejo *et al.*, 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004):

- topografia, toponímia, rede hidrográfica, hidroclimatologia;
- distribuição e descrição litológica das unidades geológicas;
- espessura de solos, formações superficiais e grau de alteração;
- grau de fracturação e dados geológico-estruturais dos maciços;
- classificação geotécnica de solos e rochas;

- condições hidrogeológicas;
- condições geomorfológicas;
- processos dinâmicos;
- investigações geológico-geotécnicas prévias;
- perigosidade e/ou riscos geológicos.

Apesar de todas as informações, elementos e dados gerais a ter em conta na elaboração de um mapeamento geotécnico, devem ser tomadas considerações adicionais mediante as especificações de cada projecto, ou na presença de casos excepcionais. Para o caso concreto de existirem poucos afloramentos ou estes apresentarem pouca extensão, recomenda-se o seguinte (Ferrer & González de Vallejo, 1999; Carvalho & Chaminé, 2004):

- identificação do afloramento: localização, situação geográfica, acessibilidade, extensão, características geométricas, etc.;
- fotografias e esquemas de campo;
- descrição geológica geral:
 - caracterização das unidades geológicas regionais e/ou locais;
 - descrição e caracterização das litologias;
 - descrição das macro e mesoestruturas;
 - traços geológico-estruturais gerais do maciço;
 - identificação das zonas alteradas e meteorizadas, bem como das espessuras das mesmas;
 - presença de água, nascentes, etc.;
 - divisão em zonas e descrição geral de cada zona geotécnica;
- identificação de zonas singulares, com a existência de elementos estruturais não sistemáticos, que não se repetem no maciço e, por isso, têm influência nas suas propriedades e comportamento geomecânico (*e.g.*, falhas, filões, zonas de brecha, cavidades, zonas de fluxo de água, etc.).

2.4.4. Parâmetros dos maciços rochosos

A maioria dos maciços rochosos tem comportamento descontínuo, com as discontinuidades a terem um papel preponderante no seu comportamento mecânico. É, portanto, essencial que, tanto a estrutura de um maciço rochoso, como a natureza das suas discontinuidades sejam

cuidadosamente descritas e caracterizadas como complemento à descrição litológica do tipo de rocha. Estes parâmetros, que podem ser utilizados numa análise de estabilidade, devem ser, sempre que possível, quantificados (ISRM, 1978, 1981).

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

- número e orientação das famílias de descontinuidades;
- tamanho dos blocos e intensidade de fracturação;
- grau de alteração.

Número e orientação das famílias de descontinuidades

O número de famílias e respectivas orientações condicionam o comportamento de um maciço rochoso no seu todo. A intensidade do grau de fracturação e o tamanho dos blocos da matriz rochosa são função do número de famílias de descontinuidades e do espaçamento entre as mesmas. A diferenciação entre famílias de descontinuidades é feita através da sua orientação espacial e pelas propriedades e características dos planos que as compõem. As descontinuidades são agrupadas em famílias de acordo com a sua orientação e, posteriormente, tratadas estatisticamente através de técnicas de projecção estereográfica (diagramas de rosetas, estereogramas), apurando-se assim a orientação média de cada família. A ISRM (1978) recomenda que, dependendo da área em estudo, seja cartografado um universo de, pelo menos, 150 descontinuidades. Considera-se que a família principal (de maior importância) presente num maciço rochoso é aquela que apresenta maior grau de penetrabilidade (e.g., maior continuidade, menor espaçamento, maior abertura, etc.).

O quadro 4 apresenta uma classificação dos maciços rochosos de acordo com o número de famílias de descontinuidades presentes.

Quadro 4. Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1978).

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias
I	Maciço compacto, com algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
II	Uma família de descontinuidades.
III	Uma família de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
IV	Dois famílias de descontinuidades.
V	Dois famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VI	Três famílias de descontinuidades.
VII	Três famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades.
IX	Maciço de rocha muito esmagada, com o aspecto idêntico ao de um solo.

A figura 5 mostra uma representação esquemática de um maciço rochoso afectado por distintas famílias de descontinuidades.

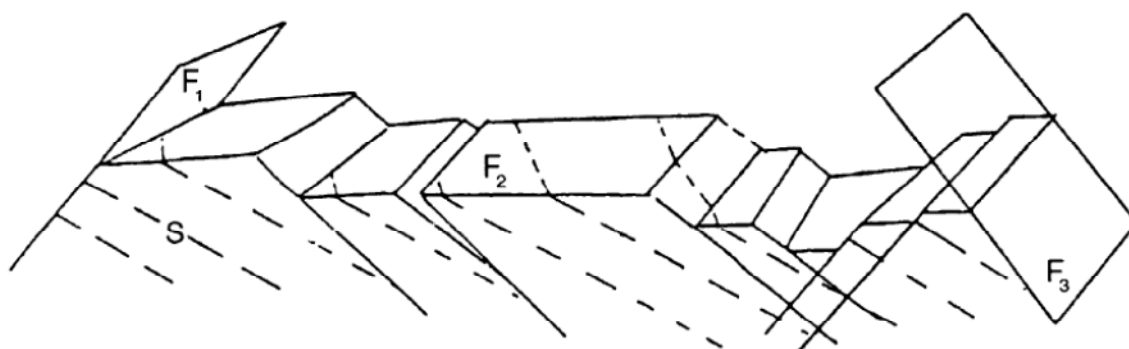


Figura 5. Representação esquemática de um maciço rochoso caracterizado pela presença de quatro famílias de descontinuidades (S, F1, F2, F3) (Scesi & Gattinoni, 2009).

Tamanho dos blocos e intensidade de fracturação

O tamanho dos blocos que constituem o maciço rochoso condiciona de forma definitiva o seu comportamento em termos de resistência e deformação. O número de famílias de

descontinuidades, sua orientação, espaçamento e continuidade definem a dimensão e forma dos blocos. Assim, pode dizer-se que a forma do bloco unitário é determinada através do número de famílias e orientação de cada uma, e que a sua dimensão define-se através do espaçamento e continuidade das famílias. A descrição do tamanho dos blocos pode realizar-se das seguintes formas (ISRM, 1978):

- mediante o índice do tamanho do bloco I_b ("Block Size Index"), que representa as dimensões médias dos blocos-tipo medidos em afloramento, sendo este definido por:

$$I_b = (e_1 + e_2 + e_3) / 3$$

em que: e_1 , e_2 e e_3 são os valores médios do espaçamento das três famílias de descontinuidades.

- mediante o parâmetro J_v (índice volumétrico de descontinuidades), que representa o número total de descontinuidades que interceptam uma unidade de volume ($1m^3$) do maciço rochoso:

$$J_v = \sum \frac{\text{número de descontinuidades}}{\text{comprimento médio}}$$

O comprimento a medir dependerá do espaçamento de cada família, variando, normalmente, entre 5 e 10 m. A forma mais rápida, apesar de menos exacta, será através da estimativa do valor de J_v contando o número total de descontinuidades que intersectam um dado comprimento L , correspondendo este valor a uma frequência, λ :

$$\lambda = \frac{\text{número de descontinuidades}}{L (m)}$$

ou

$$\lambda = \frac{1}{\text{Espaçamento médio das descontinuidades (m)}}$$

O valor de J_v relaciona-se com o tamanho dos blocos de acordo com a classificação apresentada no quadro 5.

Quadro 5. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico de descontinuidades (ISRM, 1978).

Descrição	J_v (descontinuidade/m ³)
Blocos muito grandes	<1
Blocos grandes	1 – 3
Blocos médios	3 – 10
Blocos pequenos	10 – 30
Blocos muito pequenos	>30

Valores de $J_v > 60$ correspondem a um maciço de rocha muito esmagada, com aspecto idêntico a um maciço de solo residual.

O maciço rochoso pode ser descrito de acordo com a classificação apresentada no quadro 6, e ilustrado como se apresenta na figura 6, dando uma ideia do tamanho e forma do bloco unitário.

Quadro 6. Classificação do maciço rochoso em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1978).

Classe	Tipo	Descrição
I	Compacto	Poucas descontinuidades ou espaçamento muito largo
II	Cúbico	Blocos aproximadamente equidistantes
III	Tabular	Blocos com uma dimensão (normalmente segundo a horizontal) consideravelmente menor que as outras duas
IV	Colunar	Bloco com uma dimensão (normalmente segundo a vertical) consideravelmente maior que as outras duas
V	Irregular	Grandes variações no tamanho e forma dos blocos
VI	Esmagado	Blocos com dimensões bastante pequenas

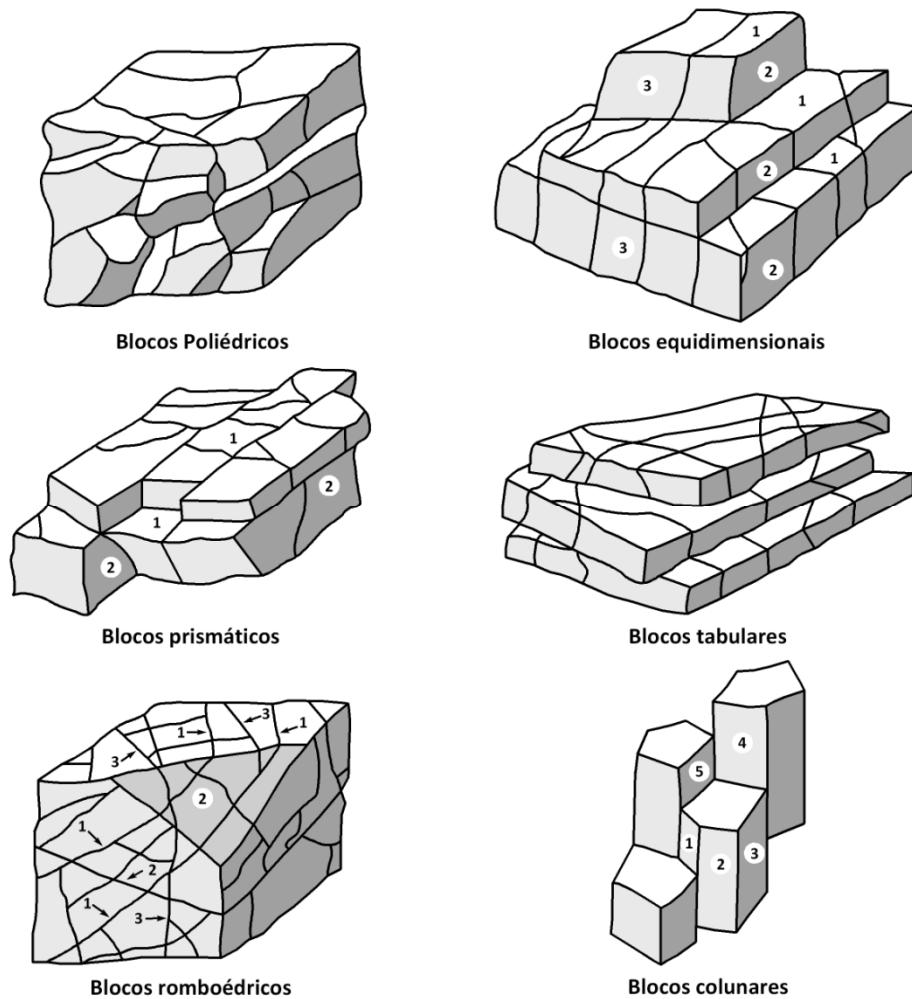


Figura 6. Exemplos de diferentes formas geométricas de blocos (adaptado de Palmström & Stille, 2010).

O grau de fracturação expressa-se habitualmente pelo índice RQD (*Rock Quality Designation*) (Deere, 1963; Deere *et al.*, 1967; Deere & Deere, 1988). Apesar da sua utilidade prática, este índice não considera aspectos como a orientação, o espaçamento, os preenchimentos e outras condições das descontinuidades, pelo que não é suficiente para descrever as características da fracturação dos maciços rochosos. O índice RQD pode estimar-se em afloramentos a partir de correlações empíricas, tais como a proposta por Palmström (1975);

$$\text{RQD} = 115 - 3,3 \times J_v \quad \text{para } J_v > 4,5$$

$$\text{RQD} = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4,5$$

O valor do índice RQD também pode ser determinado a partir da frequência das descontinuidades, λ , mediante a seguinte expressão que proporciona o valor teórico mínimo do RQD:

$$\text{RQD} \approx 100 \exp^{(-0,1 \times \lambda)} \times (0,1 \times \lambda + 1)$$

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

Grau de alteração


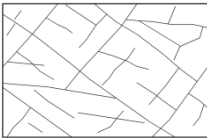
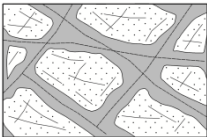
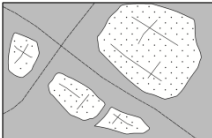
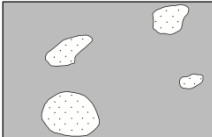
A alteração de uma rocha consiste na sua desagregação e decomposição, levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente (Aires-Barros, 1991). Segundo Price & de Freitas (2009), a alteração implica uma mudança na rocha, de uma condição inicial para uma nova condição, resultante de processos geodinâmicos externos.

Brady & Brown (2004) sustentam que esta resulta da alteração química ou física da rocha à superfície através da reacção com gases atmosféricos e soluções aquosas. O processo é análogo aos efeitos corrosivos em materiais convencionais. Em engenharia geotécnica, o interesse no grau de alteração surge devido à sua influência nas propriedades mecânicas de material intacto assim como no ângulo de atrito das superfícies rochosas.

Para além de uma análise global da alteração nos maciços rochosos, este parâmetro deve ser verificado nas descontinuidades, pois o grau de alteração modifica características como a rugosidade e abertura que contribuem para a variação da resistência da matriz rochosa.

A avaliação do grau de alteração do maciço rochoso realiza-se por observação directa do afloramento e comparação com os índices padrão presentes no quadro 7. Esta avaliação pode variar ligeiramente consoante a experiência do observador. No quadro 8 expõe-se a classificação simplificada deste parâmetro (ISRM, 1981). Para uma análise mais precisa, deve-se fragmentar um pedaço de rocha para se analisar o estado da matriz rochosa. Existem também meios expeditos para suportar esta determinação, como, por exemplo, verificar se: a rocha quebra à pancada com o martelo de geólogo e a resistência que lhe oferece; a rocha é friável ao toque; a rocha se desagrega quando imersa em água.

Quadro 7. Evolução do grau de alteração do maciço rochoso de acordo com a ISRM (1981).

Grau de alteração	Nomenclatura	Descrição	
	Sã ou não alterada	W_1	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa
	Ligeiramente alterada	W_2	Mudanças na cor original de matriz rochosa junto às superfícies de descontinuidade (descoloração)
	Moderadamente alterada	W_3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original
	Muito alterada	W_4	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável
	Completamente alterada	W_5	Praticamente todo o material rochoso está muito decomposto ou é um solo residual

A *Geological Society Engineering* (GSE, 1995) considera o termo W_6 , referindo-se a um material completamente decomposto e/ou desagregado (solo residual).

Quadro 8. Versão simplificada dos graus de alteração e sua relação com a permeabilidade (ISRM, 1981).

Nomenclatura	Grau de alteração	Descrição
W_{1-2}	Rocha são a pouco alterada	Maciço são e compacto. Descontinuidades fechadas. Permeabilidade praticamente nula
W_3	Rocha medianamente alterada	Maciço mais ou menos são. Intersectado por descontinuidades abertas
W_{4-5}	Rocha muito alterada a decomposta	Maciço alterado a muito alterado ou mesmo decomposto. Permeabilidade do tipo intersticial. Pode coexistir uma circulação fissural

2.4.5. Parâmetros geológicos – geotécnicos das descontinuidades

Uma cuidadosa descrição da matriz rochosa e da natureza das suas descontinuidades deve ser suficientemente detalhada para que sirva de base a uma classificação funcional do maciço rochoso (ISRM, 1978). A descrição de cada zona geotécnica deve ser o mais objectiva e clara possível, recorrendo-se, normalmente, a uma terminologia recomendada para efeitos de geologia aplicada à engenharia (e.g., ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCCF, 1996).

González de Vallejo *et al.* (2002) sustenta que as descontinuidades condicionam de forma definitiva as propriedades e a compartimentação dos maciços rochosos em termos de resistência, deformabilidade e coeficiente hidráulico. A resistência ao corte nas descontinuidades é o aspecto mais importante na determinação da resistência dos maciços rochosos fracturados e, para a sua correcta avaliação, é necessário definir as características e as propriedades das superfícies das descontinuidades. No quadro 9 apresenta-se uma breve descrição dos parâmetros geológico-geotécnicos que devem ser incluídos na caracterização das descontinuidades, e na figura 7 são representados de forma esquemática alguns desses parâmetros.

Quadro 9. Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos de caracterização das descontinuidades.

Parâmetros geológico-geotécnicos (BGD)	Descrição
Atitude geológica (direcção/inclinação)	Orientação espacial, em termos da sua direcção e inclinação, das estruturas planares (descontinuidades)
Grau de fracturação / “fracture intercept”	Distância média medida entre descontinuidades, independentemente da família, sucessivas segundo a intersecção com uma linha de amostragem
Espaçamento	Distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes que pertençam à mesma família
Continuidade ou persistência	Comprimento do traço da descontinuidade
Rugosidade	Aspereza na superfície de descontinuidades
Resistência da parede das descontinuidades	Resistência à compressão uniaxial nas superfícies das descontinuidades
Abertura	Distância da separação entre blocos que formam a descontinuidade, medida na perpendicular ao plano de descontinuidade
Enchimento	Material que preenche a abertura das descontinuidades
Percolação ou infiltração	Fluxo de água nas paredes das descontinuidades

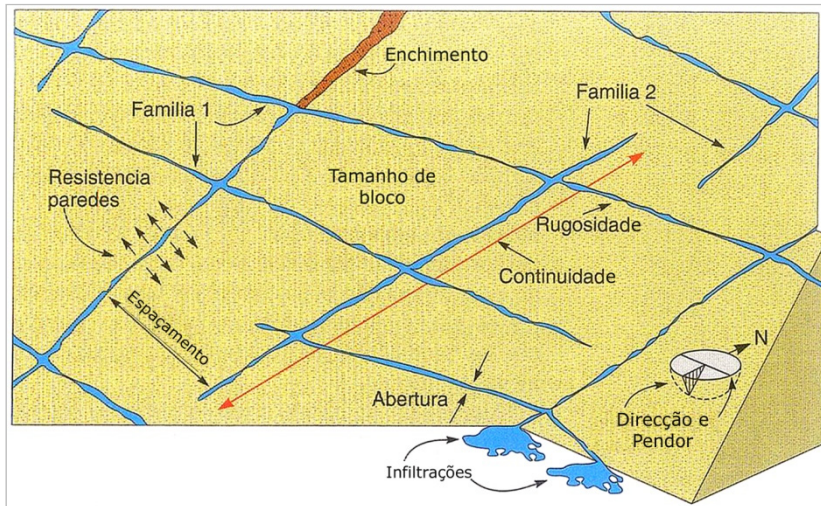


Figura 7. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de Hudson, 1989, in González de Vallejo *et al.*, 2002).

Atitude geológica

A orientação espacial de uma descontinuidade, representada na figura 8, é dada pela sua direcção (ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético) e inclinação (ângulo que a recta de maior declive da descontinuidade define com o plano horizontal). A medição da atitude das descontinuidades é efectuada com uma bússola dotada de um clinómetro ("bússola de geólogo").

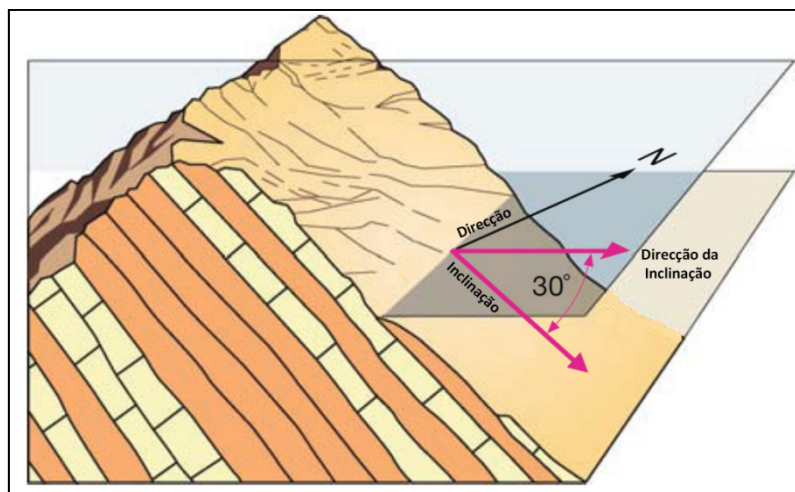


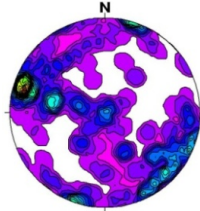
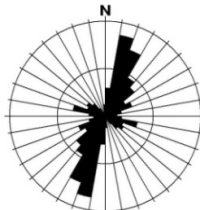
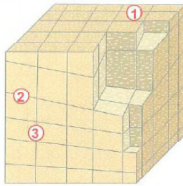
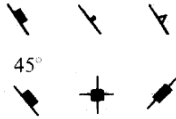
Figura 8. Atitude de uma descontinuidade (adaptado de Scesi & Gattinoni, 2009).

No estudo do maciço rochoso deve ser realizada uma medição representativa das atitudes das descontinuidades, sendo que orientações semelhantes ou muito próximas devem ser agrupadas numa mesma família, podendo existir vários conjuntos (famílias) diferentes. O número de medições dependerá da extensão da zona estudada, da aleatoriedade das orientações das descontinuidades e dos detalhes em análise adequados ao caso em estudo. Se as orientações são

relativamente constantes poder-se-á reduzir o número de medidas, mas aponta-se, como se referiu anteriormente, para um intervalo entre 150 a 200 descontinuidades (ISRM, 1978; Rocha, 1981).

Após a medição das orientações das descontinuidades no terreno, é efectuado o tratamento estatístico dos dados através de diagramas geológico-estruturais (ISRM, 1978; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Lisle & Leyshon, 2004), com recurso a projecções estereográficas polares (diagramas de contorno estrutural ou estereogramas) e diagramas de rosetas. No quadro 10 sintetizam-se os processos de representação gráfica da orientação das descontinuidades.

Quadro 10. Representações gráficas da atitude geológica.

Forma gráfica	Breve descrição	Esquema
Projecção estereográfica polar (estereograma)	Permite avaliar através dos pólos das descontinuidades as principais direcções e inclinações	
Diagrama de roseta	Afigura as principais direcções das descontinuidades e a sua representatividade	
Bloco-diagrama	Permite uma visão geral das famílias de descontinuidades e respectivas orientações	
Símbolos em mapas geológicos	Indicam valores médios de direcção e sentidos de inclinação para os diferentes tipos de descontinuidades	

Grau de fracturação

De acordo com a ISRM (1981), o termo “fractura” (ou diaclase ou junta; Rocha, 1981), aqui usado para definir o grau de fracturação, refere-se a qualquer superfície de descontinuidade natural com resistência à tracção muito baixa ou nula. Na prática, uma simples separação manual da rocha adjacente ao plano de descontinuidade pode ser usada como critério de avaliação.

O grau de fracturação (“*fracture intercept*”) define-se como a distância média entre descontinuidades sucessivas medida segundo a intersecção com uma linha recta de amostragem (*scanline*). Este conceito não pressupõe uma estimativa do espaçamento entre descontinuidades da mesma família, mas sim do espaçamento entre todas as descontinuidades cartografadas no maciço (ISRM, 1981). Desta forma, deve estimar-se, sempre que possível, o grau de fracturação global, independentemente das famílias consideradas.

A frequência média das descontinuidades designa-se como a média do número de descontinuidades cartografadas por unidade de comprimento ao longo de uma linha de amostragem, sendo por esta razão recíproca da média entre descontinuidades. A frequência média é, então, uma medida do grau de fracturação (Chaminé *et al.*, 2001) da rocha ao longo de referida linha numa dada direcção.

Espaçamento

O espaçamento corresponde ao afastamento médio entre descontinuidades, medido segundo a normal aos seus planos (ISRM, 1978, 1981). A medição deste parâmetro é geralmente realizada com o auxílio de uma fita graduada (e.g., Priest, 1993; Lamas, 1993; Chaminé & Gaspar, 1995; Dinis da Gama, 1995; Brady & Brown, 2004) e executada ao longo de um comprimento que seja suficientemente representativo da frequência das descontinuidades. Para cada família, o espaçamento entre as descontinuidades será calculado por subtracção das distâncias à origem da fita graduada.

O espaçamento tem grande influência no tamanho individual dos blocos de rocha intacta e um papel preponderante no comportamento do meio rochoso, afectando a deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade do maciço. Se várias famílias de descontinuidades possuírem espaçamentos apertados reúnem condições de baixa coesão na massa rochosa. Tal como acontece com a atitude geológica, a importância do espaçamento aumenta quando outras condições para a deformação estiverem presentes (e.g., reduzida resistência ao corte e um número suficiente de descontinuidades ou famílias de diaclases combinam-se para que um escorregamento possa ocorrer). O espaçamento individual de descontinuidades e a associação de

várias famílias influenciam fortemente a permeabilidade do maciço e as suas características de percolação (ISRM, 1978).

A ISRM (1981) propõe que seja utilizada uma terminologia, atendida no quadro 11, para caracterizar os maciços em função do afastamento das descontinuidades, quer para o cálculo do grau de fracturação, quer para o espaçamento entre descontinuidades da mesma família. A figura 9 mostra exemplos de descontinuidades com diferentes espaçamentos.

Quadro 11. Terminologia para caracterizar os maciços rochosos em função do espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1981).

Intervalos (cm)	Nomenclatura	Designação	Nomenclatura	Designação
> 200	F ₁	Muito afastadas	F ₁₋₂	Afastadas
60 – 200	F ₂	Afastadas		
20 – 60	F ₃	Medianamente afastadas	F ₃	Medianamente afastadas
6 – 20	F ₄	Próximas	F ₄₋₅	Próximas
<6	F ₅	Muito próximas		



Figura 9. Exemplos de maciços graníticos com diferentes espaçamentos (\leftrightarrow) entre descontinuidades.

Continuidade ou persistência

Persistência implica a extensão em área de uma descontinuidade, dando a noção do seu comprimento, sendo a sua medição realizada com o recurso a uma fita graduada. Este parâmetro está intimamente ligado ao grau de fracturação do maciço rochoso. Pode ser quantificada de forma expedita através da medição da extensão do traço do plano na superfície exposta do maciço. É importante, também, apurar a extremidade da superfície de descontinuidade, ou seja, se termina em rocha ou noutra descontinuidade.

Frequentemente, as superfícies expostas do maciço rochoso são pequenas comparadas com a área ou comprimento das descontinuidades, tornando difícil a análise da continuidade ou persistência dessas descontinuidades. A oportunidade de realizar esta medição está limitada aos afloramentos existentes e não é possível apurar o seu valor através de *logs* de sondagem. Este parâmetro tem influência relevante na definição das características mecânicas que definem potenciais superfícies de rotura.

Normalmente, uma das famílias presentes no afloramento em estudo possui maior continuidade que as demais famílias. As famílias podem ser distinguidas através dos termos *contínua*, *sub-contínua* e *descontínua*. A figura 10 ilustra a influência que a persistência das descontinuidades tem na fracturação do maciço. Esta influência varia entre forte, se as famílias presentes forem muito contínuas, e fraca, se apresentarem pouca continuidade.

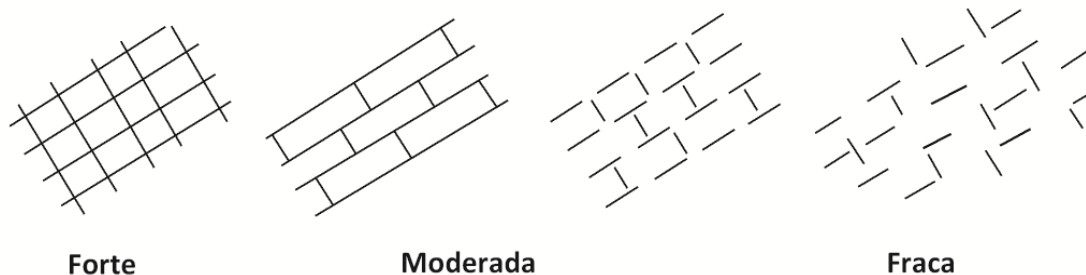


Figura 10. Influência da persistência das famílias de descontinuidades no grau de fracturação (adaptado de Singhal & Gupta, 2010).

É importante destacar as famílias mais contínuas, uma vez que, comumente, são estas que condicionam os planos de rotura do maciço rochoso.

A ISRM (1978) definiu o conceito de persistência, traduzido pelo comprimento das interações (L) da família de descontinuidades em estudo, numa superfície exposta e estabeleceu cinco termos (quadro 12). Se a extensão de uma descontinuidade for superior à dezena de metros, considera-se que tem grande continuidade. Por outro lado, se a descontinuidade não exceder os três metros, é pouco contínua.

Quadro 12. Descrição da continuidade (persistência) das descontinuidades (ISRM, 1981).

Continuidade	Comprimento (m)
Continuidade muito baixa	<1
Continuidade baixa	1 – 3
Continuidade média	3 – 10
Continuidade alta	10 – 20
Continuidade muito alta	>20

Rugosidade

A rugosidade corresponde à aspereza (em termos de ondulação) nas superfícies das descontinuidades. Este parâmetro tem influência na resistência ao corte apresentada destas superfícies, i.e., quanto maior for a rugosidade, maior será a resistência ao corte. A ondulação e a rugosidade dos planos podem controlar as possíveis direcções e facilidade de deslocamento relativo dos blocos.

Na recolha dos parâmetros geológico-geotécnicos *in situ*, normalmente faz-se distinção entre superfícies irregulares de pequena escala e ondulações da superfície de descontinuidade em larga escala (figura 11).

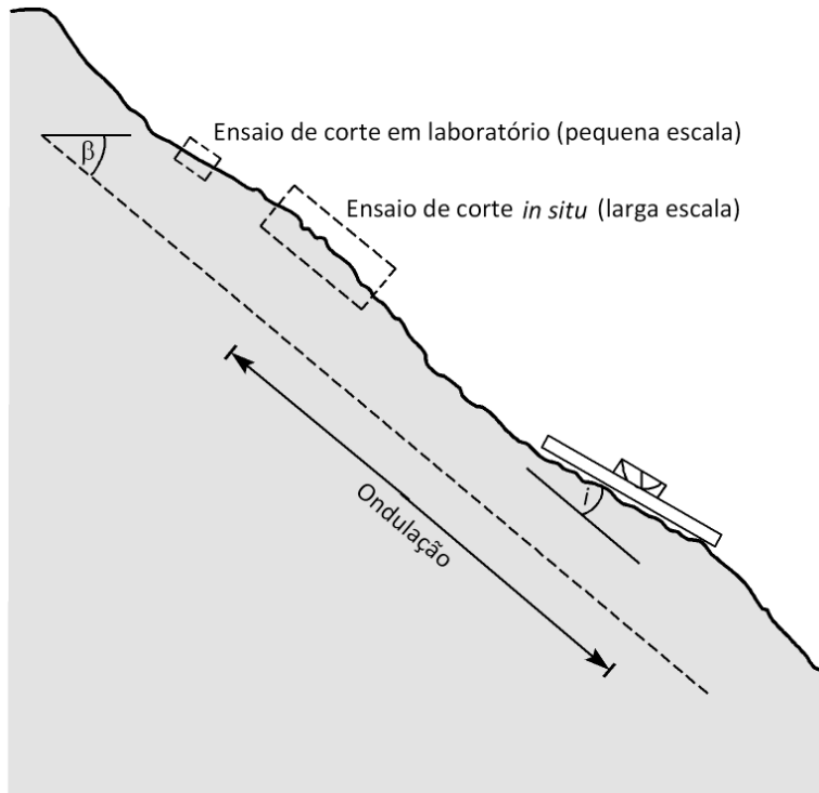


Figura 11. Diferentes escalas de rugosidade em descontinuidades. A ondulação pode ser caracterizada pelo ângulo i (adaptado de ISRM, 1978).

A ISRM (1978) sugere uma descrição da rugosidade em duas escalas (quadro 13):

- escala decimétrica e métrica para a ondulação das superfícies de descontinuidade: plana, ondulada e denteada;
- escala milimétrica e centimétrica para a rugosidade: superfícies estriadas, lisas ou rugosas.

A rugosidade pode ser medida no campo a partir de diversos métodos, dependendo, quer da exactidão requerida e da escala de medida, quer da acessibilidade ao (s) afloramento (s).

Quadro 13. Classificação da rugosidade (R) das discontinuidades (adaptado de ISRM, 1978).

Forma do perfil	Classe	Descrição	Nomenclatura	Perfil típico
Denteadada	I	Rugosa	R ₁₋₂ Pouco rugosa	
	II	Lisa		
	III	Estriada		
Ondulada	IV	Rugosa	R ₃ Medianamente rugosa	
	V	Lisa		
	VI	Estriada		
Plana	VII	Rugosa	R ₄₋₅ Muito rugosa	
	VIII	Lisa		
	IX	Estriada		

Resistência da parede das descontinuidades

A resistência da parede de uma descontinuidade influencia a sua resistência ao corte e a sua deformabilidade, especialmente no caso em que as paredes estão em contacto directo (*e.g.*, diaclasamento fechado). Este parâmetro depende do tipo de matriz rochosa, do grau de alteração e da existência ou não de preenchimento.

De forma expedita, a resistência pode ser estimada por resposta ao toque com o martelo de geólogo ou com recurso ao esclerómetro portátil (*martelo de Schmidt* do tipo L) aplicado directamente sobre o plano de descontinuidade. Para obtenção de dados quantitativos é recomendável a utilização do último.

Em descontinuidades pouco alteradas e limpas, a resistência seria semelhante à da matriz rochosa, mas é usual apresentar uma resistência menor devido aos processos de meteorização das suas paredes. Os processos erosivos afectam preferencialmente as superfícies de fracturação e por este motivo deve estimar-se o grau de meteorização juntamente com a resistência das paredes de descontinuidades.

Para apurar a resistência deve ser feita uma análise quanto ao grau de alteração do maciço rochoso, como referenciado no quadro 7, seguido de uma análise do material-rocha. A ISRM (1978) propõe uma metodologia qualitativa descritiva do grau de alteração do material rochoso e descontinuidades nele contidas (quadro 14).

Quadro 14. Descrição do grau de alteração do material rocha (ISRM, 1978).

Termo	Descrição
Fresca ou sã	Não se observam sinais de meteorização na matriz rochosa
Descolorada	Observam-se mudanças na coloração da matriz rochosa
Decomposta	A maioria dos minerais estão muito alterados e não se reconhece a petrofábrica original
Desagregada	A rocha é friável, apesar dos grãos minerais não estarem decompostos, mantendo-se a petrofábrica original

Pode também ser executado um ensaio índice de referência, aplicado nos planos de descontinuidade. O local e o número de ensaios a realizar dependem do detalhe pretendido. Em alternativa, ou como complemento, podem ser realizados ensaios de carga pontual (*Point Load Test*) para estimar a resistência à compressão uniaxial de blocos intactos de uma potencial superfície de rotura.

No quadro 15 apresenta-se a terminologia proposta pela ISRM (1978) para a caracterização do estado de resistência da parede das descontinuidades quando estas não se encontram preenchidas.

Quadro 15. Caracterização do estado de resistência da parede das discontinuidades (ISRM, 1978).

Grau (R – Rocha)	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R0	Rocha muito branda	Marcada pela unha do polegar	0,25 – 1,0
R1	Rocha branda (I)	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo. Pode ser cortada com um canivete	1,0 – 5,0
R2	Rocha branda (II)	Pode ser cortada, com dificuldade, por um canivete. Cortes superficiais obtidos com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo	5,0 – 25
R3	Rocha razoavelmente resistente	Não pode ser raspada ou cortada com canivete. Podem-se obter fragmentos de rocha com uma pancada seca do martelo de geólogo	25 – 50
R4	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo	50 – 100
R5	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias várias pancadas com o martelo de geólogo	100 – 250
R6	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de geólogo	>250

Abertura

Abertura de uma descontinuidade é a separação entre os blocos divididos pela fractura, medida perpendicularmente ao plano da descontinuidade quando se apresenta aberta ou preenchida por água ou ar. Quando o espaço entre os blocos divididos pela fractura apresenta enchimento, considera-se a largura de enchimento (figura 12).

Num maciço rochoso, a abertura tende a diminuir com a profundidade ao ponto de as descontinuidades se apresentarem praticamente fechadas. Sabendo que a meteorização incide preferencialmente sobre as superfícies de descontinuidade, pode afirmar-se que em rochas pouco meteorizadas, a abertura é tendencialmente inexistente.

Do ponto de vista geotécnico, importa determinar a amplitude da abertura da descontinuidade e a sua variação ao longo do plano descontínuo. Este parâmetro pode ser variável numa mesma

zona de um maciço rochoso. A figura 13 apresenta aspectos de aberturas em diferentes descontinuidades.

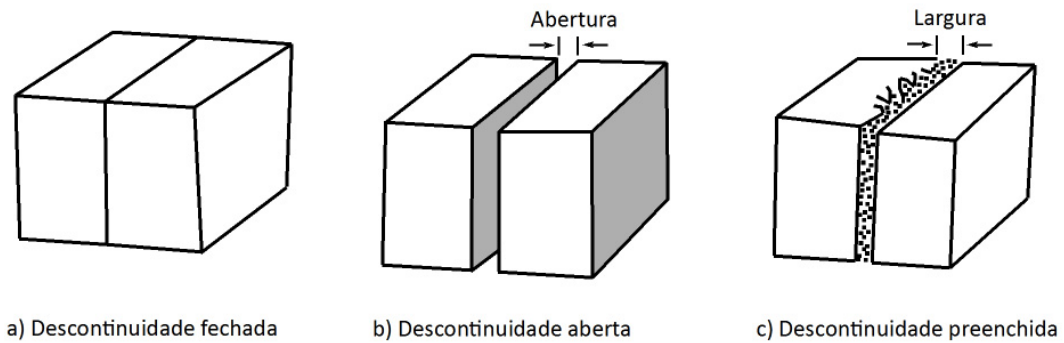


Figura 12. Definição de abertura em descontinuidades abertas e largura em descontinuidades preenchidas (ISRM, 1978).



Figura 13. Aspectos da abertura em descontinuidades.

Este parâmetro deve ser medido *in situ* com uma fita graduada em milímetros. A sua descrição realiza-se segundo a terminologia proposta pela ISRM (1978) apontada no quadro 16. Esta análise é realizada nas famílias de descontinuidades, i.e., cada família é analisada individualmente pela média das aberturas após tratamento estatístico.

Quadro 16. Caracterização da abertura das descontinuidades (ISRM, 1978).

Abertura (mm)	Descrição	Classificação
<0,1	Muito apertada	
0,1 – 0,25	Apertada	Fechada
0,25 – 0,5	Parcialmente aberta	
0,5 – 2,5	Aberta	
2,5 – 10	Razoavelmente aberta	Aberta
>10	Larga	
10 – 100	Muito larga	
100 – 1000	Extremamente larga	Muito aberta
>1000	Cavernosa	

Enchimento ou Preenchimento

Enchimento de uma descontinuidade pode definir-se como sendo o material existente entre as paredes da descontinuidade (figura 14). Tal material pode ser, por exemplo, rocha esmagada, calcite, quartzo, minerais de argila, etc. Os materiais de preenchimento são normalmente de baixa resistência, influenciando a resistência ao corte e deformabilidade das descontinuidades. Nas falhas, o material de enchimento corresponde, em geral, ao material rochoso esmagado pelo processo geodinâmico que as originou, podendo-se encontrar em fases mais ou menos avançadas de alteração. Assim, pode afirmar-se que as descontinuidades preenchidas têm menor resistência ao corte do que descontinuidades perfeitamente fechadas.



Figura 14. Exemplos de enchimento em descontinuidades.

O comportamento das descontinuidades com enchimento depende das várias propriedades do material que o constitui. As seguintes propriedades do material de enchimento devem ser registadas sempre que possível:

- mineralogia, textura e cor dos seus constituintes;

- espessura ou largura da camada;
- resistência ao corte e permeabilidade;
- classificação do tamanho das partículas;
- grau de alteração.

A ISRM (1978) propôs que em termos de enchimento a caracterização deve seguir a seguinte metodologia:

- a espessura do enchimento deve ser medida directamente com uma régua graduada em milímetros;
- a descrição do enchimento deve incluir a identificação do material, descrição mineralógica e tamanho do grão;
- a resistência pode ser estimada mediante os índices de campo (estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão simples dos solos e rochas a partir de índices de campo – ISRM, 1981);
- deve indicar-se o grau de humidade e estimar-se qualitativamente a permeabilidade do material de enchimento.

Percolação

A percolação da água nos maciços rochosos efectua-se, comumente, através do processo de permeabilidade secundária que corresponde ao fluxo circulante nas discontinuidades. Menos frequente, mas igualmente importante, é a permeabilidade primária que ocorre em rochas permeáveis, geralmente sedimentares, onde uma porção da percolação sucede através dos poros da matriz rochosa.

A previsão da posição do nível freático, assim como dos caminhos de percolação e a pressão da água nos poros e discontinuidades, proporcionam muitas vezes indicações da existência de potenciais problemas de instabilidade de um dado maciço rochoso. Assim, dever-se-á proceder à observação e descrição da percolação da água nas discontinuidades e apurar a sua tendência de fluxo nas famílias presentes. Dados sobre a hidroclimatologia, especialmente a precipitação local, são de extrema importância na análise da informação recolhida e, sempre que possível, deve obter-se informação sobre a variação sazonal dos níveis freáticos da região.

Bieniawski (1989) definiu uma descrição básica para análise da presença de água nas discontinuidades, como se pode constatar no quadro 17. A ISRM (1978) propôs uma avaliação descritiva da percolação da água em discontinuidades com ou sem preenchimento (quadro 18).

Quadro 17. Descrição da presença de água nas descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).

Nomenclatura	Designação
S	Seco
H	Húmido
G	Gotejante
F	Fluxo

Quadro 18. Avaliação da percolação da água em descontinuidades (ISRM, 1978).

Classe	Descrição	
	Descontinuidades sem enchimento	Descontinuidades com enchimento
I	A descontinuidade é apertada e seca, não aparenta ser possível a circulação de água	Material de enchimento fortemente consolidado e seco; um fluxo significativo é improvável devido à baixa permeabilidade
II	A descontinuidade é seca e sem evidência de fluxo de água	O material de enchimento é húmido mas sem presença de água livre
III	A descontinuidade é seca mas mostra evidências de fluxo de água, i.e., marcas de oxidação, etc	Material de enchimento está molhado, com gotejamento ocasional
IV	A descontinuidade é húmida mas sem presença de água livre	Material de enchimento mostra sinais de lavagem, fluxo de água contínuo [estimar o caudal (L/min)]
V	A descontinuidade apresenta percolação com gotejamento ocasional mas sem fluxo contínuo	Material de enchimento localmente lavado, fluxo considerável nos canais de circulação preferenciais [estimar o caudal (L/min) e pressão]
VI	A descontinuidade apresenta um fluxo de água contínuo [estimar o caudal (L/min) e pressão]	Material de enchimento completamente lavado, pressões de água elevadas [estimar o caudal (L/min) e pressão]

2.4.6. Técnica de amostragem linear aplicada à superfície de descontinuidades

A técnica de amostragem linear (figuras 15 e 16) consiste na colocação de uma fita graduada em superfícies expostas do maciço rochoso e no registo dos parâmetros geológico-geotécnicos de todas as descontinuidades que intersectam a fita ao longo do seu comprimento (*e.g.*, Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995). Esta técnica permite concentrar a amostragem

realizada ao longo da extensão da linha, segundo uma metodologia bem aferida. Desta forma, e não havendo a necessidade de medir todas as descontinuidades presentes numa dada face exposta do maciço, o risco de levantamentos repetidos é minorado e o estudo da compartimentação do maciço é mais exacto. As características de compartimentação do maciço são extrapoladas a partir dos dados obtidos.

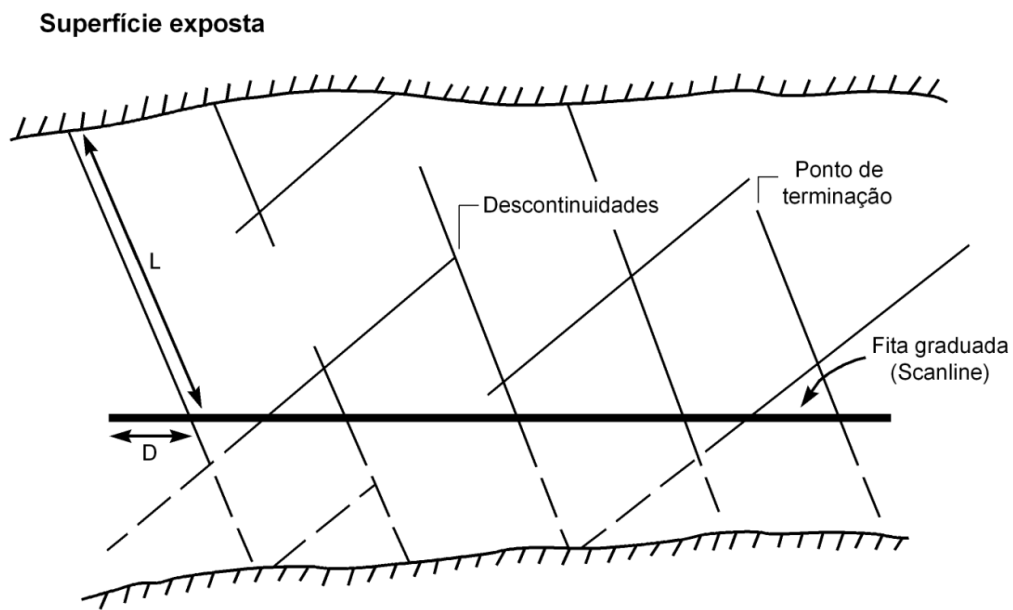


Figura 15. Esquema do dispositivo para levantamento de descontinuidades pela técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço rochoso (adaptado de Singhal & Gupta, 2010). D – distância à origem da fita graduada (“scanline”); L – semi-comprimento exposto.



Figura 16. Levantamento de descontinuidades pela técnica da amostragem linear.

Na prática, colocam-se suportes (pregos) na rocha, espaçados por intervalos de cerca de três metros, onde a fita graduada é ancorada. Este procedimento garante que a fita se mantenha o mais tensa possível, evitando assim um excessivo arqueamento desta, o que minimiza erros nas medições. Sempre que possível, o local onde se aplica a técnica deve ser fotografado, identificado

e numerado. Esta técnica está descrita, entre outros, por Priest & Hudson (1981), Hudson & Priest (1983), Dinis da Gama (1995), Chaminé & Gaspar (1995), Peacock *et al.* (2003), Brady & Brown (2004), Peacock (2006) e Martins *et al.* (2006).

A recolha dos dados deve ser sistemática e uniforme, registando-se as seguintes grandezas para cada descontinuidade que intersecte a fita (ISRM, 1978, 1981; Brady & Brown, 2004):

- distância à origem da fita graduada;
- altura ao solo da fita graduada;
- semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face exposta da rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
- tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R – na rocha; D – noutra descontinuidade; O – obscura);
- a atitude da descontinuidade (direcção e inclinação) medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem com a descontinuidade;
- curvatura (C), numa escala de C_1 a C_5 , em que C_1 representa superfícies planas e C_5 superfícies muito curvas;
- rugosidade (R), numa escala de R_1 a R_5 , representando R_1 uma superfície lisa e R_5 uma superfície muito rugosa;
- dureza (ou resistência) da superfície de descontinuidade;
- observações várias (e.g., natureza do preenchimento, abertura, percolação de água e qualquer outra característica relevante presente nas descontinuidades).

Estes dados são registados numa ficha de levantamento de descontinuidades, como exemplificado na figura 17, juntamente com a seguinte informação sobre a linha de amostragem, superfície exposta do maciço e dados gerais:

- número da linha de amostragem;
- localização da linha de amostragem;
- atitude da linha de amostragem;
- sentido da leitura;
- direcção do hasteal (ou talude) estudado;
- litologia;
- grau de alteração;
- data do levantamento;
- rubrica do responsável pelo levantamento.

A principal vantagem dos ensaios *in situ* é a maior representatividade no que respeita às condições reais do terreno, quando comparados com ensaios de laboratório, pois envolvem um volume consideravelmente maior de material, sem riscos da amostra analisada estar remexida.

Para fins de apurar a resistência à compressão uniaxial dos maciços rochosos, o método *in situ* mais largamente utilizado é o ensaio esclerométrico. A resistência ao corte dos maciços rochosos é amplamente influenciada pelo estado de alteração da rocha junto às paredes das discontinuidades. Os maciços tendem a encontrar-se mais alterados à superfície do que em profundidade e os agentes de meteorização incidem preferencialmente nas superfícies de descontinuidade; como tal, a resistência das superfícies descontínuas representa apenas uma fracção daquela que se regista no material-rocha.

O ensaio esclerométrico é realizado com o esclerómetro portátil, também conhecido como martelo de Schmidt, ilustrado na figura 18.



Figura 18. Esclerómetro portátil para material-rocha, tipo L da Proceq© (<http://www.proceq.com/>).

Este foi desenvolvido em 1948 como ensaio de natureza não destrutivo de dureza de betão (Schmidt, 1951), e usado a partir da década de 60, do século XX, para estimar a resistência em rocha (Cargill & Shakoore, 1990). O ensaio avalia a qualidade da rocha através de valores de ressalto (“Rebound”, R) de uma massa de aço quando percutida sobre a superfície da rocha. O ensaio pode ser aplicado tanto no material-rocha como nas descontinuidades e deverá ser executado numa superfície limpa, livre da camada superficial meteorizada e sem fissuras para que a leitura seja válida. De acordo com Sumner & Nel (2002), a presença de humidade diminui os valores de ressalto, factor que também influencia no juízo dos resultados.

Através de correlações, os valores de ressalto permitem fazer uma avaliação aproximada da resistência à compressão uniaxial. Sendo rápido, barato, portátil e não destrutivo, o ensaio esclerométrico é um importante indicador na caracterização de uma matriz rochosa. Actualmente existem vários tipos de esclerómetros portáteis, com diferentes energias de impacto, entre os quais (Goudie, 2006):

- tipo N – Possui uma energia de impacto de 2,207 N.m sendo apropriado para o estudo de betões;
- tipo L – Com energia de impacto três vezes inferior ao do tipo N (0,735 N.m) é o mais utilizado no estudo de maciços rochosos; ajustado para rochas medianamente alteradas.

Para uma correcta execução do ensaio, o martelo deve colocar-se perpendicularmente ao plano da superfície a testar. No movimento compressivo em direcção ao plano, a perpendicularidade deve ser mantida tanto quanto possível até se efectuar o disparo (figura 19).



Figura 19. Aplicação do martelo de Schmidt em superfícies rochosas num maciço granítico (observa-se a limpeza da superfície e aplicação do martelo perpendicularmente à superfície de descontinuidade).

O valor do ressalto sofrido pela massa de aço é tanto maior quanto mais elevada for a dureza da rocha sendo que a sua grandeza, que varia entre 10 e 100 numa escala adimensional, fica registada no aparelho. Antes de se efectuar novo disparo, o martelo deve ser armado, i.e., a mola do aparelho deve estar ligeiramente comprimida. A ISRM (1978) sugere, para estudos de mecânica das rochas ou de geologia de engenharia, que se executem 10 percussões por cada superfície testada, das quais as cinco mais baixas são retiradas, contabilizando-se o valor médio das cinco leituras de ressalto (R) mais altas.

A densidade média da rocha investigada associada ao valor médio obtido da dureza de Schmidt e à orientação do martelo em relação à superfície de rocha ensaiada (i.e., perpendicular à superfície de ensaio, e normalizada para as direcções sub-horizontal, 45° e sub-vertical (Basu & Aydin, 2004) permite, através do ábaco de Miller, exposto na figura 20, fazer uma correlação a fim de apurar a resistência à compressão uniaxial. Com esta quantificação, o maciço rochoso é classificado quanto

à sua resistência à compressão simples, σ_c , numa escala que varia entre resistência muito elevada (S_1) e resistência muito baixa (S_5), proposta pela ISRM (1981), como se pode visualizar no quadro 19.

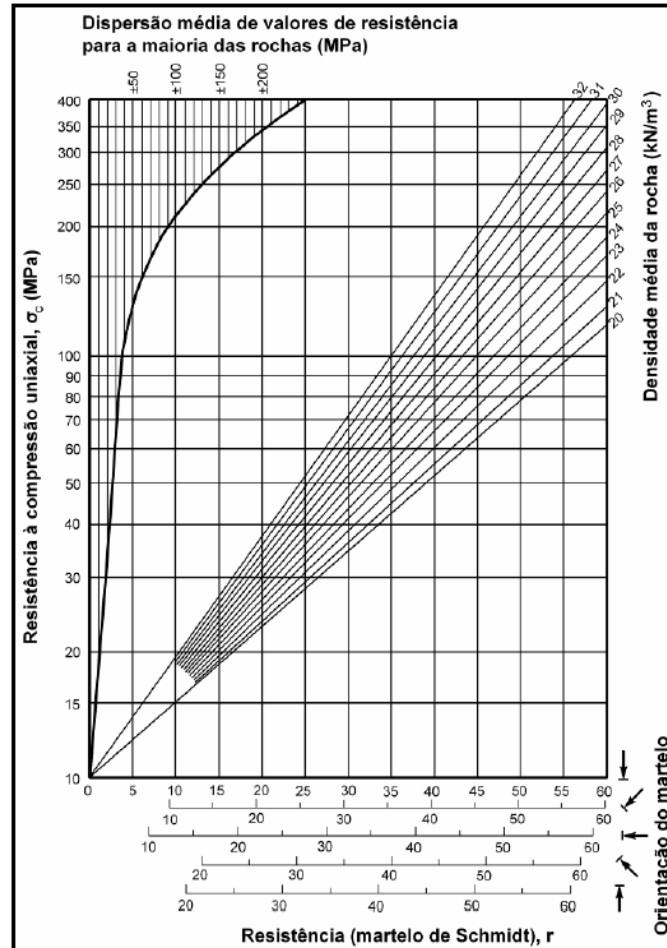


Figura 20. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão simples a partir da resistência de Schmidt (adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2002).

Goudie, 1977; Day, 1980; Kolaiti & Papadopoulos, 1993; Goudie, 2006; Teixeira *et al.*, 2007) e da geotecnia de maciços rochosos (e.g., Cargill & Shakoor, 1990; Katz *et al.*, 2000; Kahraman, 2001; Kahraman *et al.*, 2002; Yassar & Erdogan, 2004; Aydin & Basu, 2005; Aydin, 2008). Pelo facto do ensaio ser executado um pouco por todo o mundo, é possível verificar uma convergência de valores de ressalto em rochas com a mesma génese.

2.4.8. Técnicas laboratoriais

Num estudo geológico-geomecânico, sempre existiu a tendência para recorrer a ensaios laboratoriais com o objectivo de equacionar problemas geomecânicos e, portanto, estes ensaios têm assumido um papel desproporcional neste tópico. Para Hoek (2007), tal facto não implica que os ensaios laboratoriais não sejam importantes, mas recomenda que apenas 10% de um estudo geológico-geomecânico equilibrado deva ser atribuído a testes de laboratório.

Uma grande lacuna dos ensaios laboratoriais em provetes rochosos é que estes são limitados no seu tamanho, logo, representam uma amostra muito pequena e altamente selectiva do maciço rochoso de onde foram removidas. De acordo com Brady & Brown (2004), em condições ideais, os provetes devem simular as condições impostas no ambiente natural, o que raramente se consegue. Com a recolha e transporte, a amostra fica sempre algo remexida para além da quebra do equilíbrio tensional no confinamento existente *in situ*. Por outro lado, o elevado custo e, na sua maioria, a demora na execução sugere ponderação e método na decisão de os realizar.

Não obstante o anteriormente referido, os ensaios laboratoriais são necessários para determinar as propriedades das rochas, constituindo uma ferramenta importante na caracterização de maciços rochosos. O tipo e número de ensaios a realizar depende principalmente da finalidade das investigações e do tipo de projecto. O tamanho, número e local de recolha de amostras para ensaio deriva dos problemas a resolver e dos condicionamentos económicos.

Existem diversas técnicas laboratoriais, para apurar as propriedades dos materiais (e.g., composição mineralógica e química, densidade, etc.), parâmetros geológico-geotécnicos (e.g., porosidade, permeabilidade, módulo de elasticidade, coesão, resistência, etc.) e propriedades empíricas (Price & de Freitas, 2009).

2.4.9. Zonamento Geotécnico

González de Vallejo *et al.* (2002) postulam que o zonamento geotécnico se baseia na classificação de unidades geotecnicamente homogéneas que podem incluir diferentes idades geológicas ou

estratigráficas. Entende-se esta homogeneidade geotécnica como zonas que possuam litologia e comportamento geológico-geomecânico semelhantes. Por sua vez, as unidades geotécnicas podem ser divididas em sub-unidades; o detalhe e grau de homogeneidade depende da escala, objectivo do mapa e dados disponíveis.

As unidades geotécnicas e a sua distribuição espacial estabelecem-se vulgarmente a partir da litologia, origem e características geológicas dos materiais (e.g., estrutura, grau de alteração, etc.), determinadas a partir da informação geológica básica (e.g., mapas geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos, fotogeologia e ensaios de prospecção geotécnica), das principais características geotécnicas dos maciços (e.g., grau de fracturação, grau de resistência, etc.) e dos fenómenos e processos geológicos existentes. Uma vez caracterizadas, estabelecidas e delimitadas, as diferentes zonas podem ser classificadas e legendadas de forma interpretativa, por exemplo, na análise da delimitação territorial para o fim pretendido, em zonas aptas, aptas com restrições e não aptas.

Diversas entidades propuseram procedimentos e orientações para a elaboração de zonamentos geotécnicos (e.g., ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCFF, 1996). No entanto, e devido à complexidade do meio geológico e divergência na finalidade dos mapas geotécnicos, não existe um procedimento regularizado; contudo, um zonamento geotécnico de um maciço requer a seguinte informação:

- descrição das características gerais do afloramento (geologia estrutural, tipo de descontinuidades, composição mineralógica/geoquímica e grau de alteração);
- divisão em zonas e sua descrição geral (unidades geotécnicas);
- descrição pormenorizada de cada zona (descontinuidades);
- descrição dos parâmetros do maciço rochoso (compilação dos dados geológico-geotécnicos recolhidos no trabalho de campo);
- caracterização global e classificação geomecânica do maciço rochoso (com o objectivo de definir a qualidade e resistência do maciço, quantificação de parâmetros geotécnicos e modelação físico-matemática).

**3. ESTUDO DA COMPARTIMENTAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO GRANÍTICO SUBTERRÂNEO DE
ARCA D'ÁGUA (SECTOR DE CARVALHIDO – BURGÃES)**

3. Estudo da compartimentação do maciço rochoso granítico subterrâneo de Arca d'Água (sector de Carvalhido – Burgães)

3.1. Enquadramento geotectónico, geomorfológico e hidrogeológico regional

3.1.1. Geotectónica regional

A região do Porto (figura 22) circunscreve-se num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (MI), i.e., entre os terrenos da faixa metamórfica de Porto – Albergaria-a-Velha – Coimbra e o Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (Chaminé, 2000; Pinto de Jesus, 2001; Chaminé *et al.*, 2003). Assim, a zona em estudo localiza-se ao longo da faixa de cisalhamento de Porto-Coimbra-Tomar, com direcção geral NNW-SSE (Ribeiro *et al.*, 1990, 2007). O conjunto anterior pertence ao megadomínio de cisalhamento de Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (Chaminé *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2007).

No MI a evolução tectónica posterior é imposta pela orogenia Alpina (*e.g.*, Ribeiro *et al.*, 1990; Cabral, 1995) correspondendo à reactivação das falhas tardi-variscas estando, como consequência, na origem dos actuais traços morfoestruturais da região (Gomes, 2008). A presença de alguns depósitos plio-quadernários, discordantes sobre o substrato ante-Mesozóico, representa o testemunho do arrasamento do relevo e a modelação da superfície do MI ou o entalhe da rede hidrográfica actual (Martín-Serrano, 1994) e o retoque marinho quadernário no litoral da área (Araújo, 1991). De um modo geral, a região do Porto é caracterizada pela preponderância de rochas graníticas de idade varisca e/ou pré-varisca (*e.g.*, Noronha & Leterrier, 2000; Almeida, 2001; Chaminé *et al.*, 2003), sendo estas, maioritariamente, granitóides de duas micas, de grão médio e textura granular (fácies granítica do Porto) ou porfiróide (fácies granítica de Ermesinde). O granito do Porto aflora em grande parte da cidade do Porto, estendendo-se ainda para os concelhos de Vila Nova de Gaia, Matosinhos e Maia.

Em termos de fracturação regional, as orientações dominantes manifestam direcções NW-SE e NE-SW, predominando em termos de inclinação as descontinuidades subverticais a verticais. A análise do estado de alteração/alterabilidade permite constatar que o resultado da meteorização das rochas graníticas da região é frequentemente evidenciada pela arenização e/ou decomposição do maciço (*cf.* Begonha & Sequeira Braga, 1995, 2002; Begonha, 2001), que pode alcançar profundidades de mais de 100 m.

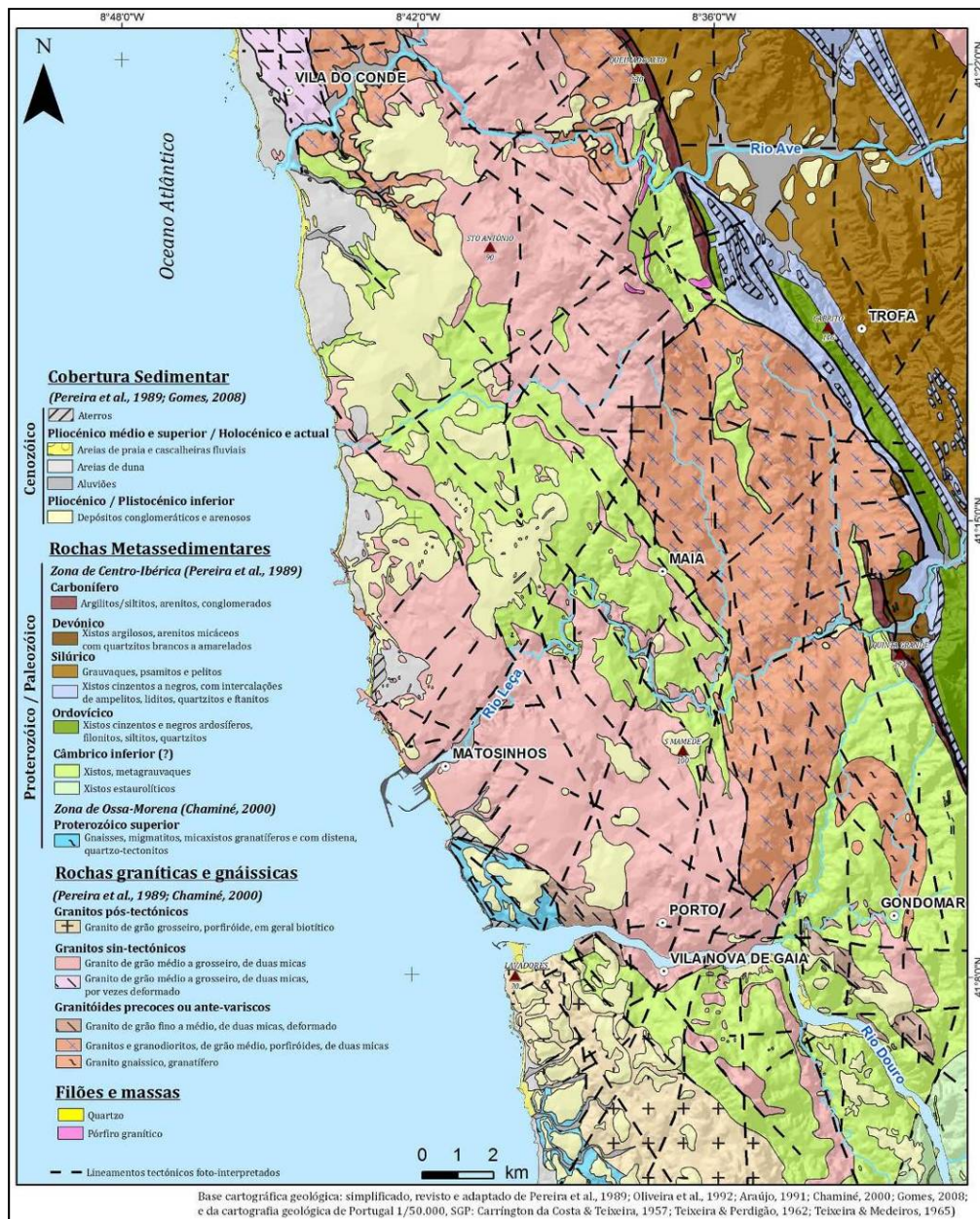


Figura 22. Mapa geológico regional da região do Porto (adaptado de Chaminé et al., 2003; Afonso 2011).

3.1.2. Geomorfologia regional

Regionalmente, em termos geomorfológicos, a zona em estudo está enquadrada no MI (Araújo et al., 2003), e corresponde a uma vasta área aplanada, designada como *Plataforma Litoral*, a qual se desenvolve a partir de cotas inferiores a 125 m, subindo um pouco para Sul do Porto (figura 23).

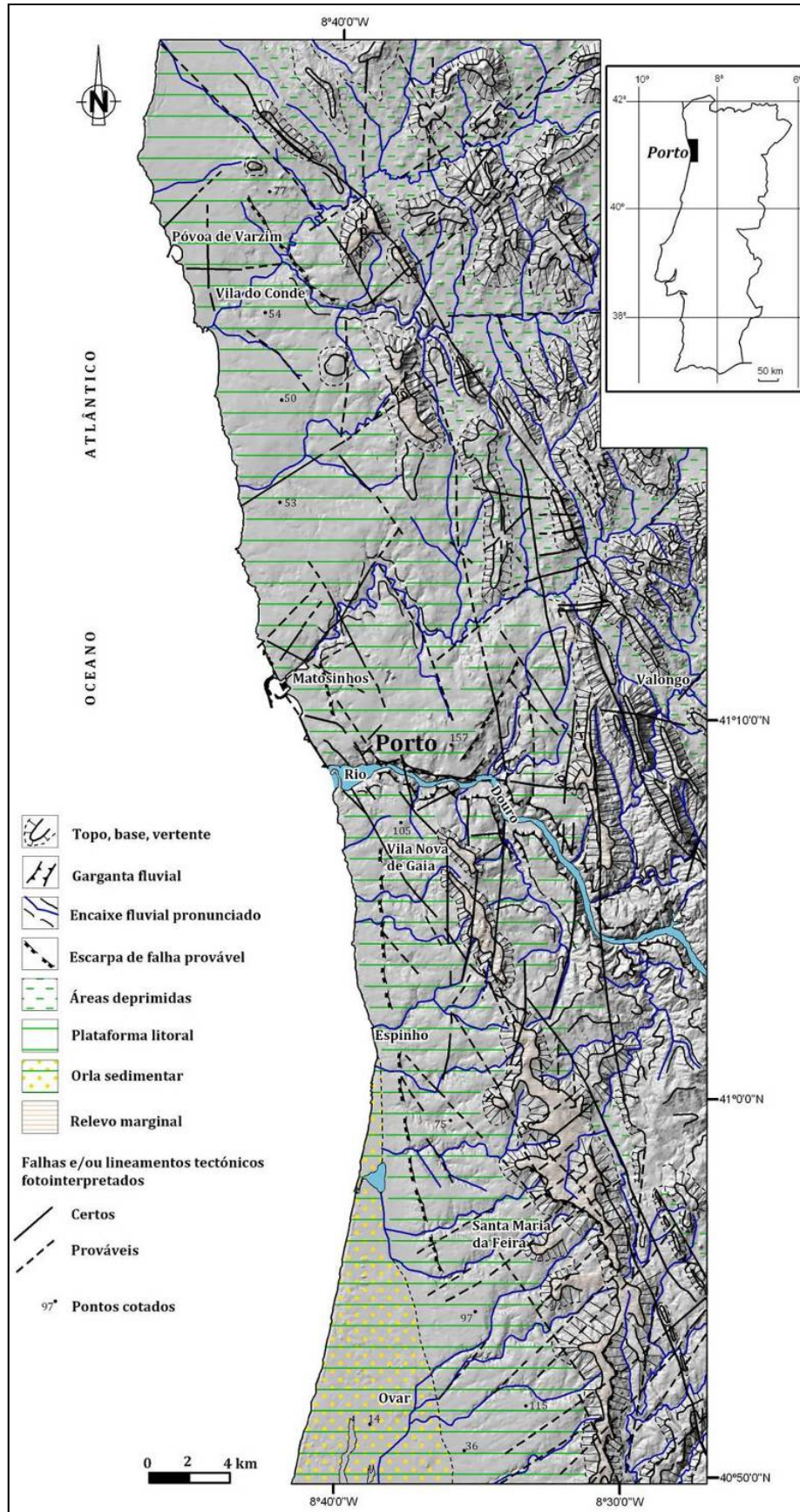


Figura 23. Esboço geomorfológico da região do Porto (adaptado de Afonso *et al.* 2004; Gomes, 2008; Afonso, 2011).

A organização da rede de drenagem reflecte a tectónica da área, sobretudo, dos sistemas de fracturação regional (NW-SE a NNW-SSE, NE-SW a NNE-SSW e W-E; *cf.* Conde, 1983; Araújo, 1991; Cabral, 1995; Pedrosa, 1998; Chaminé, 2000; Araújo *et al.*, 2003; Gomes, 2008), impondo os traços morfoestruturais à região. Assim, estas estruturas maiores produzem uma compartimentação tectónica que, por sua vez, condiciona a distribuição das linhas de água, e consoante a litologia e a estrutura geram-se as redes hidrográficas, em geral, do tipo rectangular e/ou dendrítico. A principal linha de água na região em estudo é o rio Douro, bem como uma série de tributários (*e.g.*, rio Tinto) e outros sistemas fluviais (*e.g.*, rio Leça). O rio Douro assume, no seu troço terminal (*ca.* 7km) uma orientação aproximada W-E, rodando para NNW-SSE na zona de confluência deste com o seu afluente da margem direita, o rio Tinto. Este rio apresenta uma orientação geral NNE-SSW, e o rio Leça exhibe orientações de NE-SW e NW-SE, com um traçado típico em baioneta o que denuncia condicionamento estrutural.

3.1.3. Hidrogeologia regional

A existência dos recursos hídricos subterrâneos na região do Porto está condicionada pelas condições geológicas, morfoestruturais, tectónicas e hidroclimatológicas (*e.g.*, Carvalho, 1996; Pedrosa, 1999; Carvalho, 2000; Carvalho *et al.*, 2003; Afonso *et al.*, 2004; Afonso, 2011).

As principais unidades hidrogeológicas presentes na região correspondem, genericamente, às unidades geológicas maiores definidas, nomeadamente:

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

3.2. Geologia e geotecnia do túnel de Arca d'Água (sector de Carvalhido-Burgães)

3.2.1. Generalidades. Materiais e métodos

Este estudo apresenta, numa abordagem multidisciplinar, uma caracterização geológica, geotécnica e geomecânica do subsolo granítico da cidade do Porto. Para tal, foi tido como objecto de investigação, uma das galerias subterrâneas correspondente a uma parte do traçado do antigo Manancial de Paranhos (também conhecido como Manancial de Arca d'Água ou Arca das Três Fontes). Esta galeria prolonga-se desde a Rua de S. Dinis até à Rua dos Burgães, numa extensão de aproximadamente 1225 m, com uma profundidade máxima de 15 m (figura 24).

Inicialmente, produziu-se uma compilação, uniformização e tratamento de dados geológico-geotécnicos e geomecânicos das superfícies de descontinuidade e material-rocha recolhidos em várias campanhas de terreno levadas a cabo no período entre 2005 e 2011. Os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos tratados resultaram do levantamento “in situ” de 1223 descontinuidades e 217 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico com martelo Schmidt, tipo L). Todos os dados foram compilados, uniformizados e tratados de forma exaustiva em duas bases de dados dinâmicas (figuras 25 e 26), criadas em Microsoft® Excel 2007 – *ScanGeoData|BGD* e *SchmidtData|UCS* (Fonseca, 2008; Ramos, 2008; Galiza *et al.*, 2009; Fonseca *et al.* 2010; Galiza *et al.*, 2011).

A análise estatística das descontinuidades que permitiu o seu agrupamento em famílias foi efectuada com recurso ao *software* geo-informático Dips v. 5.1 da RocScience®. Numa fase posterior, foi realizado o estudo da compartimentação do maciço granítico com vista ao zonamento geotécnico e geomecânico do maciço rochoso.

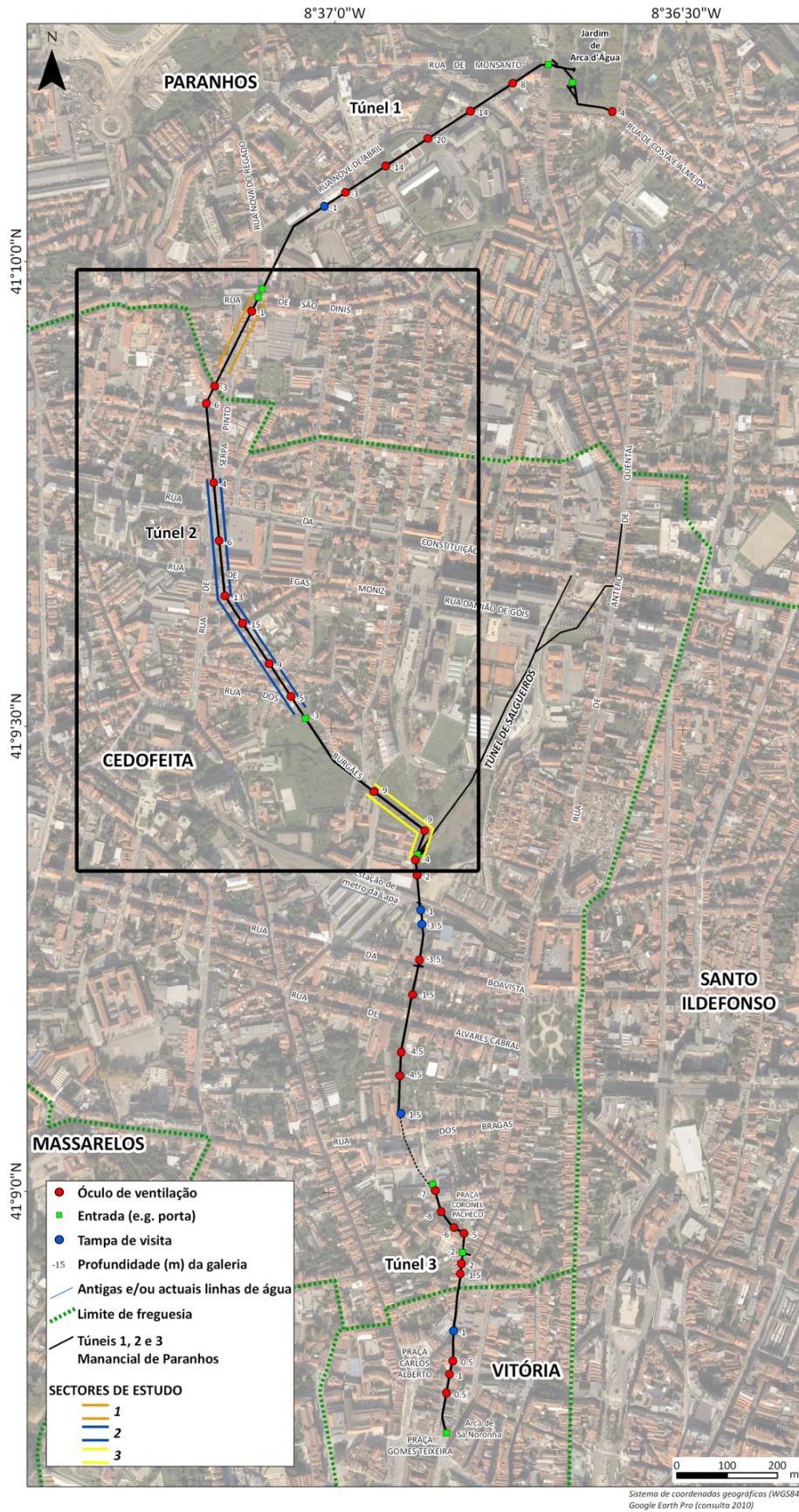


Figura 24. Imagem de satélite da área de estudo (adaptado de *Google Earth Pro*). Rectângulo a preto corresponde ao túnel de Arca d'Água (sector de Carvalhido-Burgães).

1908; Carrington da Costa, 1938, Afonso *et al.*, 2009; Chaminé *et al.*, 2010; Freitas *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 (*e.g.*, Bourbon e Noronha, 1885; Fontes, 1908). As três nascentes mais importantes eram reunidas em duas arcas denominadas “Arca Velha” e “Arca Nova”, construídas em cantaria em forma de abóbada, ligadas entre si por um aqueduto também em abóbada (figura 27). 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 intersectar com o novo traçado do aqueduto do Manancial de Paranhos (figura 28), 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, Amorim & Pinto 2001). 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.

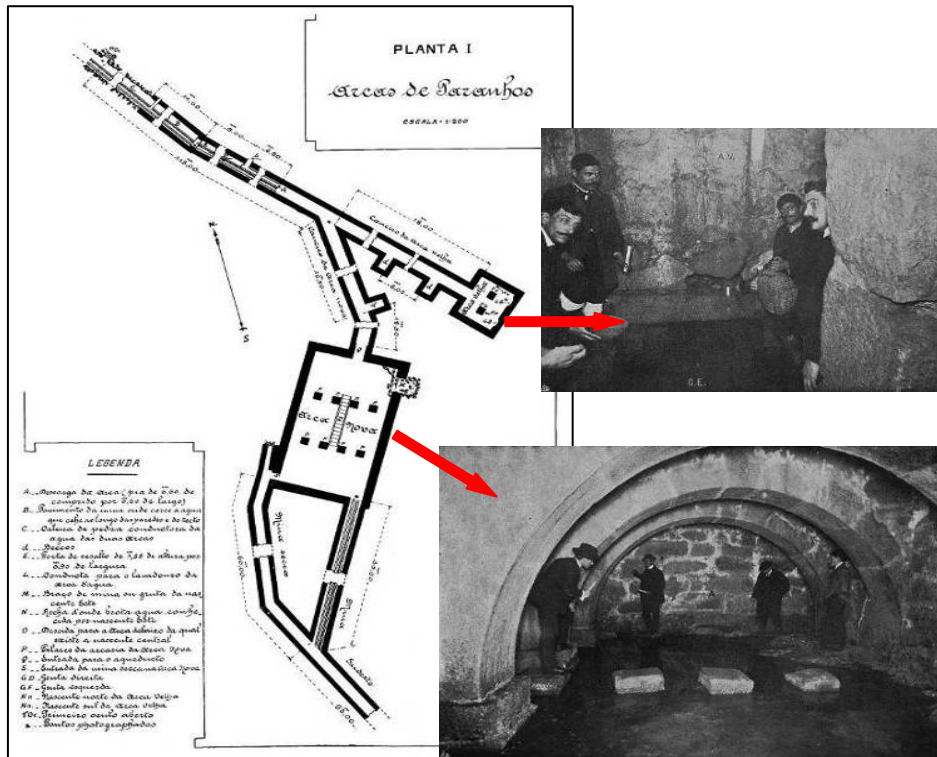


Figura 27. Plantas da “Arca Nova” e da “Arca Velha” e aspectos de ambas as arcas (Fontes 1908).

3.2.3. Geologia de superfície

A geologia de superfície, à escala local, na região circundante ao traçado das galerias do Manancial de Paranhos, em geral, e em particular do sector em estudo (Rua de S. Dinis - Rua dos Burgães) consiste, basicamente em:

- rochas graníticas, representadas pela fácies conhecida como “Granito do Porto” (Almeida, 2001), grão médio a grosseiro, de duas micas, deformado e ligeiramente orientado, de cor acinzentada, passando a amarelado quando se encontra alterado. O granito é atravessado por filões de quartzo e aplito-pegmatíticos, os quais se apresentam com um grau de alteração inferior ao do granito (Babendererde *et al.*, 2004);
- depósitos aluvionares, essencialmente constituídos por sedimentos argilosos e arenosos com espessuras inferiores a 6 m (COBA, 2003).

A rede de fracturação é intensa e define algumas orientações preferenciais: NNE-SSW a NE-SW, nomeadamente N20°-30°E, com inclinações que oscilam entre os 70°-80° para NW. São também reconhecidos diversos sistemas de falhas com orientações médias de NE-SW, N-S e NNW-SSE.

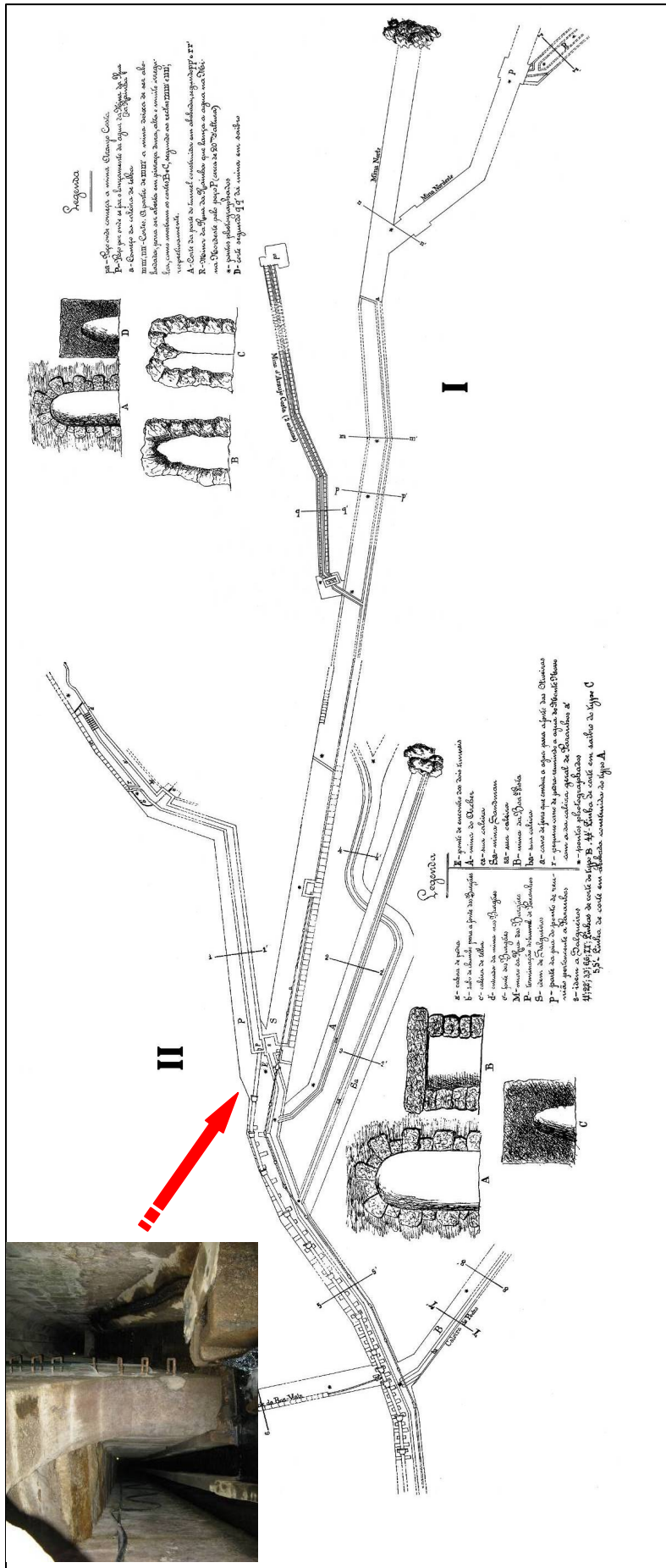


Figura 28. Planta do Manancial de Salgueiros e do troço terminal do Manancial de Paranhos, bem como do início da galeria comum aos dois mananciais (adaptada das Plantas III e IV de Fontes, 1908).

3.2.4. Geologia e geotecnia subterrânea

O maciço granítico do Porto é muito heterogéneo quanto ao tipo de alteração que apresenta, podendo-se encontrar, às cotas interessadas pela escavação, desde rocha sã até decomposta (Begonha, 2001; Begonha & Sequeira Braga, 2002; Gaj *et al.*, 2003; Afonso *et al.*, 2010). Genericamente, o maciço apresenta-se bastante fracturado, podendo as descontinuidades apresentarem, ou não, preenchimento argiloso, o que, em conjunto com as características geológico-estruturais do maciço conferem grande complexidade ao regime de percolação da água.

Do ponto de vista geológico-estrutural são reconhecidas duas unidades geológicas ao longo do traçado da galeria Rua de S. Dinis - Rua dos Burgães, designadamente:

- granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado. Em alguns locais do traçado subterrâneo o granitóide encontra-se muito a completamente alterado (W_{4-5}) e, mesmo, caulinizado; sendo esta a razão da descoloração do granito em muitas zonas do maciço. Foram registadas zonas de mais intensa feldspatização e caulinização. O granito apresenta, ainda, uma tonalidade esbranquiçada-amarelada. Na proximidade das descontinuidades e em zonas de maior densidade de fracturação ou esmagamento, a alteração caracteriza-se pela ocorrência de pontuações ferruginosas (particularmente da biotite), conferindo globalmente ao material-rocha uma tonalidade amarelada-acastanhada. Algumas descontinuidades apresentam frequentemente impregnações de sulfuretos conferindo às superfícies de descontinuidades um aspecto amarelado. A análise dos dados do grau de alteração permite constatar que, nos cerca de 1200 m estudados, predomina um material-rocha medianamente alterado (W_3);
- filões e/ou filonetes de quartzo leitoso, com possanças que não ultrapassam os 30 cm e, em regra, se encontram muito tectonizados.
- Rosas da Silva (1935, 1936), Carrington da Costa (1938), Carrington da Costa & Teixeira (1957) e Sanchez-Moral *et al.* (2011) reportam a ocorrência de evansite (fosfato de alumínio hidratado), que se mostra em camadas pouco espessas de estrutura pisolítica ou estalagmítica, de cor branco-creme ou amarelo ligeiramente avermelhado. A este respeito salienta-se que nas galerias dos mananciais de Paranhos e Salgueiros a evansite é muito abundante, em especial, no preenchimento de diaclases e falhas (figura 29).

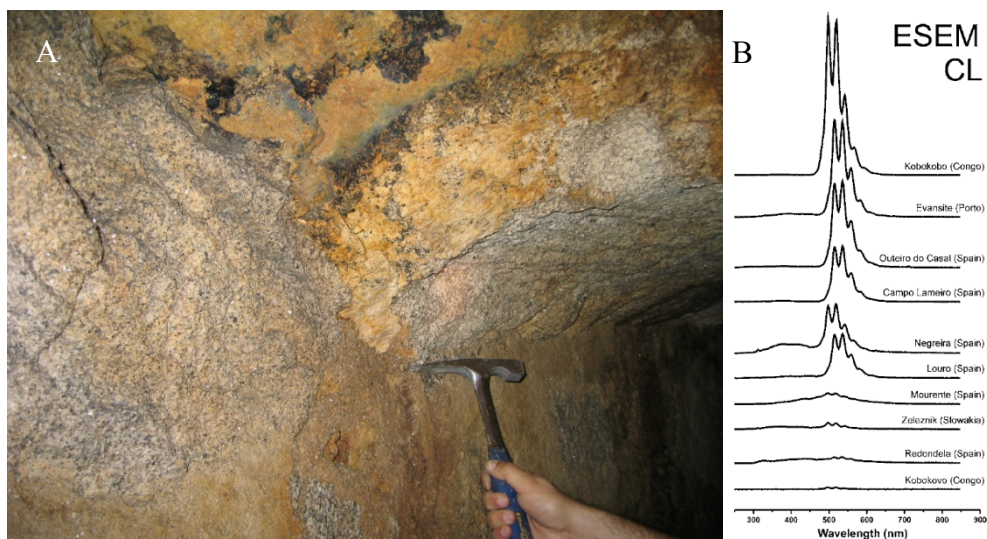


Figura 29. A: Aspecto da evansite nas galerias de Paranhos; B: Relação entre a evansite do Porto e as evansites mundiais (Sanchez-Moral *et al.*, 2011).

Foram recolhidas 4 amostras de granito ao longo de todo o traçado do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) para análise geoquímica dos principais elementos maiores, bem como de alguns dos elementos menores (quadro 20). Estas análises foram realizadas no Laboratório de fluorescência de raio-X do Centro GeoBioTec da Universidade de Aveiro. Para permitir uma comparação, inclui-se uma análise característica do granito do Porto, realizada numa amostragem na Pedreira da Trindade (Almeida, 2001). Em termos de elementos maiores, as 4 amostras apresentam-se com valores idênticos, com exceção da amostra MT2_3 que exhibe valores de MgO, TiO₂ e Fe₂O₃ superiores às restantes amostras. Comparativamente com a análise do granito da Pedreira da Trindade, ressaltam-se os valores mais elevados das 4 amostras em Al₂O₃ e P₂O₅. Este facto poder-se-á dever à presença muito frequente de evansite nestas amostras. Globalmente, estas análises corroboram a fácies do granito aflorante no túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) como sendo do granito do Porto.

Quadro 20. Análise geoquímica de 4 amostras do granito aflorante no túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) bem como de uma amostra de Granito do Porto, da Pedreira da Trindade (Almeida 2001).

Análise Geoquímica	MT2_1	MT2-2	MT2_3	MT2_4	Amostra de Granito do Porto (Pedreira da Trindade), Almeida (2001)
	Afonso MJ (2011), dados inéditos				
Elementos maiores (%)					
SiO ₂	71,29	71,51	69,08	72,02	73,24
Na ₂ O	2,95	2,97	2,55	2,51	3,61
MgO	0,27	0,22	0,43	0,24	0,11
Al ₂ O ₃	17,34	17,37	18,81	17,04	15,11
P ₂ O ₅	0,78	0,79	0,58	0,86	0,35
K ₂ O	3,99	4,39	4,39	3,99	4,60
CaO	0,49	0,48	0,42	0,37	0,35
TiO ₂	0,16	0,11	0,25	0,15	0,19
Fe ₂ O ₃	1,11	0,92	1,74	1,15	1,36
F	0,25	0,20	0,29	0,29	nd
Elementos menores (ppm)					
V	5,60	3,7	8,6	3,9	nd
Cr	12,80	11,5	7,4	6,5	nd
Mn	171,30	148,2	249,0	113,5	nd
Ni	nd	2,0	nd	nd	nd
Cu	11,30	4,6	17,5	3,7	nd
Zn	60,80	39,4	104,2	64,7	nd
Ga	22,40	18,6	28,8	20,6	nd
As	4,00	nd	4,9	11,6	nd
Br	4,50	3,7	2,3	8,1	nd
Rb	347,00	340,0	456,6	337,7	379
Sr	30,70	34,9	25,9	26,6	35
Zr	61,60	45,4	79,2	57,6	74
Nb	9,20	7,0	13,9	8,2	9
Sn	18,70	17,8	28,9	20,4	18
Cs	40,10	40,6	80,5	37,7	nd
Ba	103,90	135,6	99,9	103,7	154
Tl	3,40	3,9	5,0	3,4	nd
Pb	22,90	27,2	27,4	26,7	nd
Th	9,10	5,3	11,7	8,5	nd
U	11,70	9,2	8,5	10,9	nd

3.2.5. Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos: apresentação e discussão dos dados

A galeria subterrânea Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto) tem uma extensão de 1227 m e vai desde a Rua Nova do Regado até à Rua dos Bragas (figura 30). Na galeria existem duas secções, com aproximadamente 200 m e 259 m, em que se encontra revestida a alvenaria e/ou argamassa e/ou betão, dividindo assim a galeria em três segmentos distintos (i.e., sectores de estudo).

No estudo dos três sectores do maciço rochoso recorreu-se à técnica de amostragem linear para a caracterização e avaliação geotécnica e geomecânica das superfícies expostas e do material-rocha granítico. Para o tratamento dos dados recolhidos no terreno, recorreu-se a diagramas geológico-

estruturais (diagramas de contorno estrutural e diagramas de rosetas), que permitiram definir o número de famílias de descontinuidades e a sua representatividade. Através desta análise, apurou-se a dominância de cada uma das famílias principais e suas atitudes. A avaliação da resistência à compressão uniaxial nas superfícies de descontinuidade e no material-rocha foi realizada *in situ* a partir do ensaio esclerométrico (martelo de Schmidt, tipo L). Os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos foram caracterizados para cada um dos três sectores estudados, de acordo com os critérios propostos pela ISRM (1978, 1981, 2007) e GSE (1995).

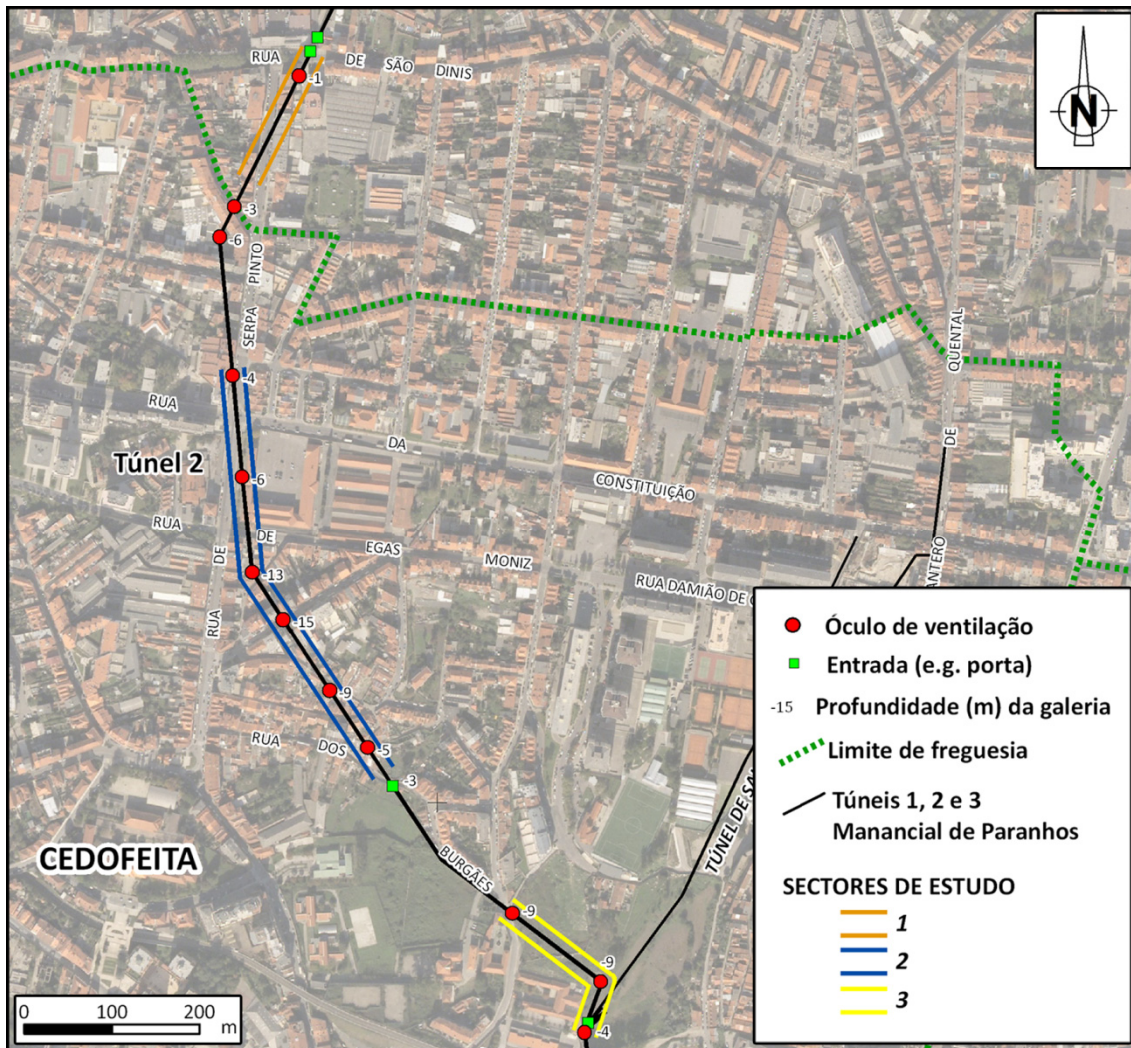


Figura 30. Imagem de satélite do túnel de Arca d'Água (sector de Carvalhido-Burgães) (adaptado de *Google Earth Pro*).

SECTOR 1

Este sector tem um comprimento de 140 m e uma direcção aproximada de N30°E (figura 31). Neste segmento foram recolhidos dados com recurso à técnica de amostragem linear, referentes a um universo de 202 descontinuidades (anexo 1).

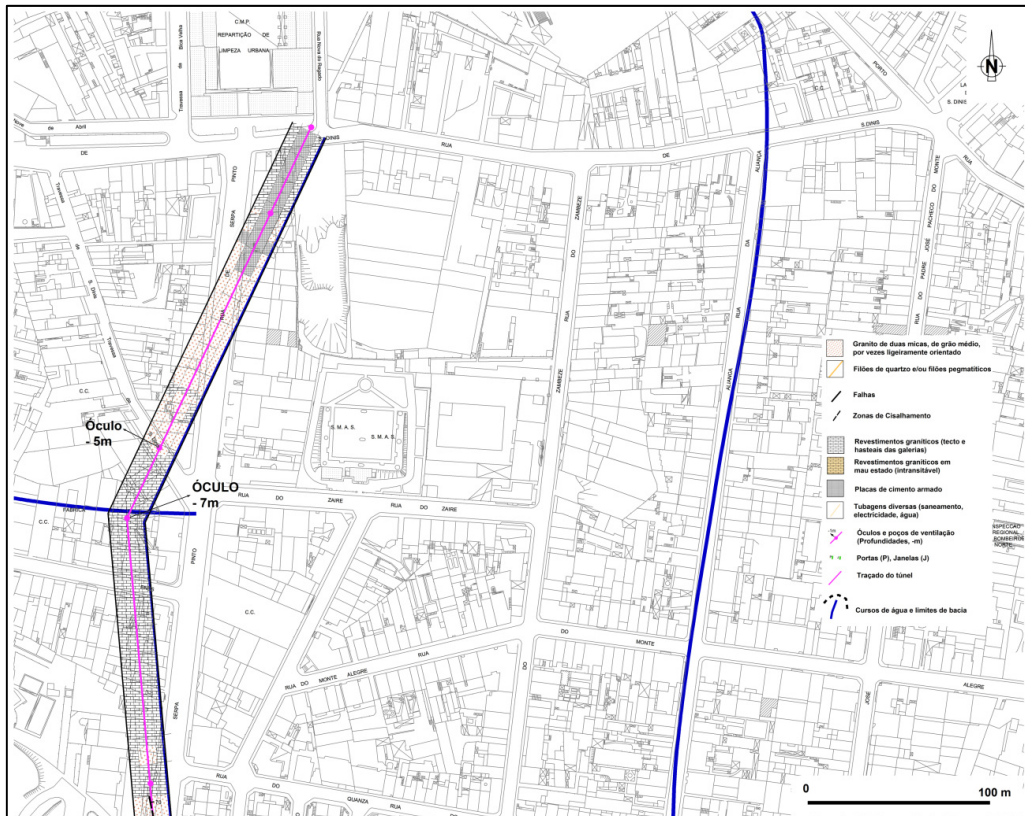


Figura 31. Sector 1 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães).

Verifica-se, através da análise da figura 32, que o maciço se encontra na sua quase totalidade (ca. 92%), como medianamente alterado (W_3), ocorrendo em percentagens pouco expressivas (5% e ca. 3%), são a pouco alterado (W_{1-2}) e muito alterado a decomposto (W_{4-5}), respectivamente.

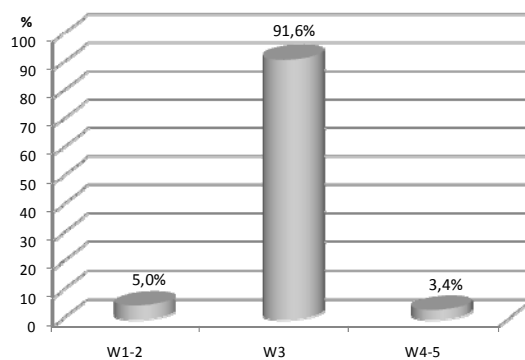


Figura 32. Grau de alteração do maciço no Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A figura 33 mostra, de entre as 202 descontinuidades analisadas, que há uma clara predominância (ca. 79%) de diaclases. As restantes descontinuidades (ca. 21%) correspondem a falhas.

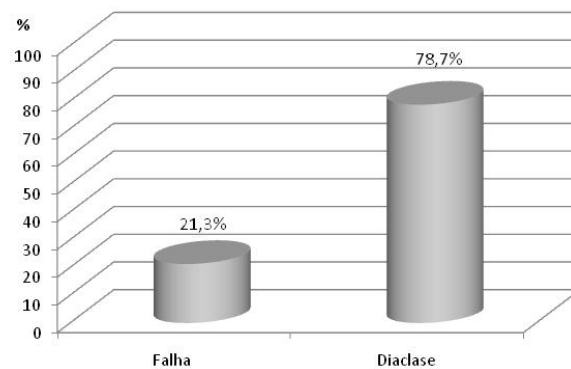


Figura 33. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Existe um equilíbrio ao longo deste sector no que ao espaçamento entre descontinuidades diz respeito, como se pode verificar na figura 34. Cerca de 22% das descontinuidades apresentam afastamento inferior a 20 cm, *i.e.*, espaçamento próximo (F_{4-5}), com valor médio de 10,4 cm. Aproximadamente 41% das descontinuidades situam-se entre os 20 cm e os 60 cm de afastamento entre si, ou seja, são medianamente afastadas (F_3) com valor médio de espaçamento de 37,9 cm. As restantes superfícies descontínuas (ca. 37%) têm espaçamentos superiores a 60 cm, em média 104,1 cm, sendo afastadas (F_{1-2}).

Numa análise global do maciço neste sector, o espaçamento médio entre descontinuidades (independentemente da família, ou seja, o “fracture intercept”; ISRM, 1981) situa-se nos 56,0 cm.

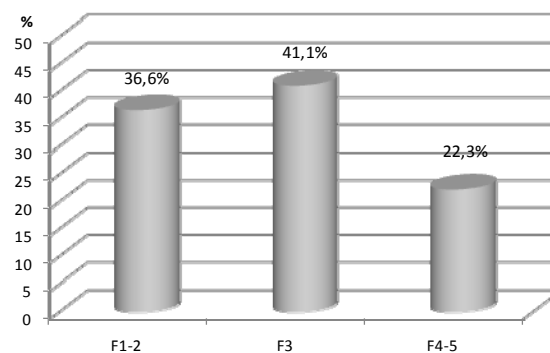


Figura 34. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Relativamente à abertura, analisando a figura 35, verifica-se que as descontinuidades se apresentam na sua maioria (ca. 66%) com aberturas inferiores a 0,5 mm, classificando-se como

fechadas. Existe, porém, uma percentagem significativa (ca. 32%) de descontinuidades com aberturas compreendidas entre 0,5 mm e 10 mm, classificando-se como abertas. No total das descontinuidades averiguadas neste sector, apenas 4 se classificam como muito abertas, *i.e.*, com aberturas superiores a 10 mm, representando 2% da totalidade. Os valores médios para cada uma das classes são de 0,1 mm, 2,5 mm e 59,5 mm, respectivamente.

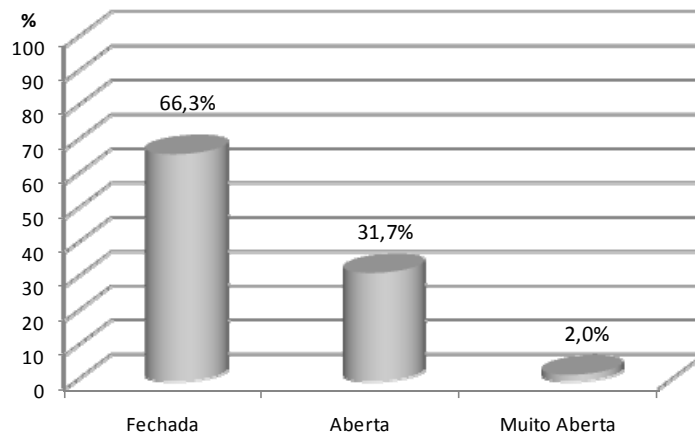


Figura 35. Abertura das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Quanto à continuidade, constata-se, através da análise da figura 36, que as descontinuidades são maioritariamente pouco contínuas (ca. 63%), com comprimentos que variam entre 1 e 3 m, com um valor médio de 1,8 m. Ocorrem ainda descontinuidades muito pouco contínuas (ca. 27%) com comprimentos inferiores a 1 m (com um valor médio de 0,7 m) e, com menor representatividade, as descontinuidades de continuidade média (ca. 10%) que se enquadram entre 3 e 10 m possuindo um valor médio de 4,6 m.

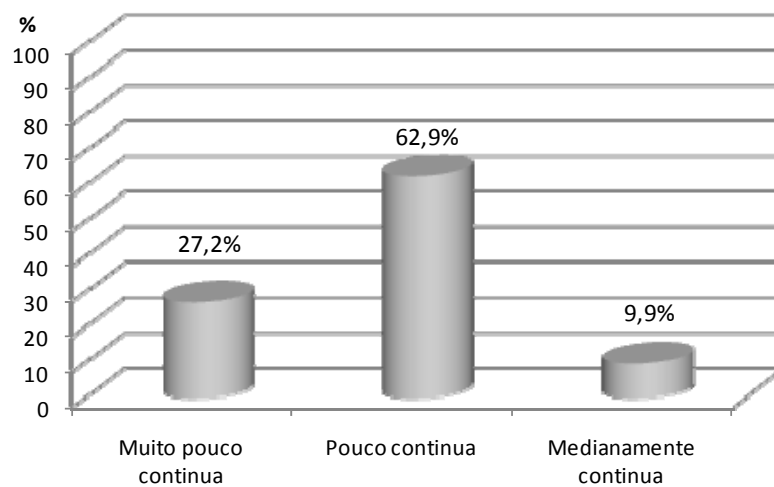


Figura 36. Continuidade das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

No que diz respeito à terminação, as superfícies das discontinuidades terminam na sua maioria noutras discontinuidades (ca. 53%); contudo, existe uma representatividade considerável nas terminações obscuras (ca. 26%) e em rocha (ca. 21%), como se pode certificar através da figura 37.

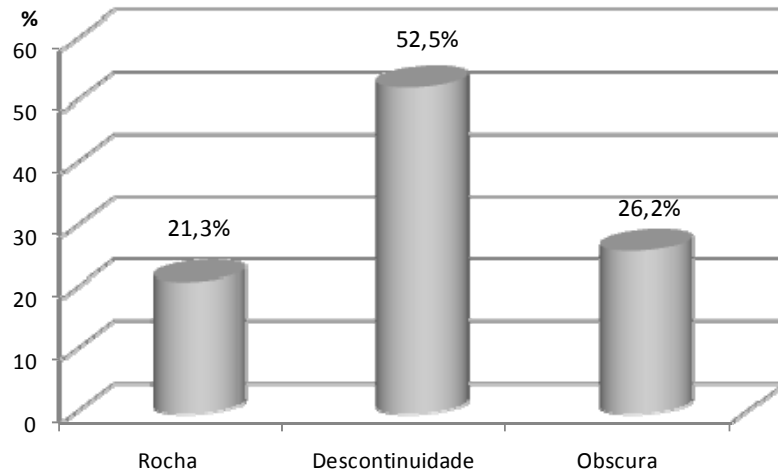


Figura 37. Tipo de terminação das discontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Quanto à curvatura, verifica-se que neste sector as discontinuidades são maioritariamente (ca. 73%) planas a ligeiramente curvas (C_{1-2}). Com menor expressão (ca. 20%) aparecem as discontinuidades curvas (C_3). A ocorrência de discontinuidades muito curvas (C_{4-5}) é muito pouco manifesta (ca. 7%) (figura 38).

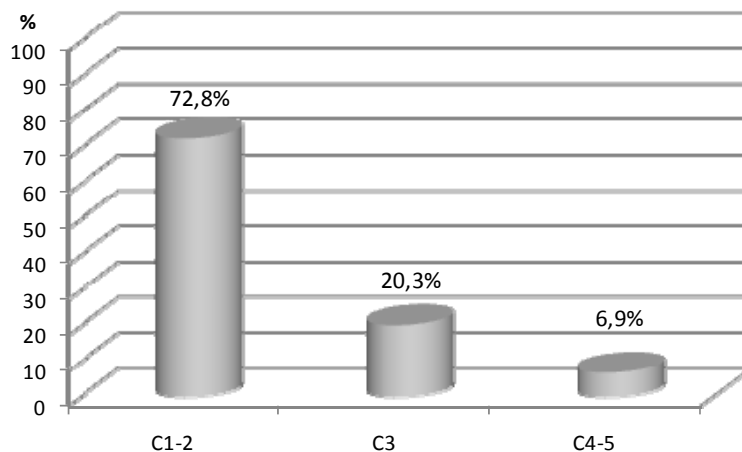


Figura 38. Curvatura das discontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Na avaliação da rugosidade, a figura 39 indica a clara predominância (ca. 80%) de superfícies medianamente rugosas (R_3), ocorrendo ainda, aproximadamente, 17% de planos pouco rugosos (R_{1-2}), apresentando as superfícies muito rugosas (R_{4-5}) pouca relevância (ca. 3%).

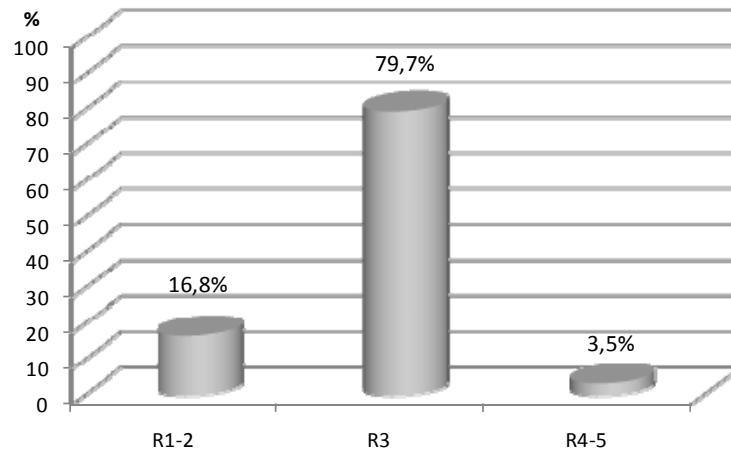


Figura 39. Rugosidade das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Relativamente ao preenchimento, a maioria das descontinuidades não tem qualquer tipo de enchimento (ca. 57%), associado ao facto de serem maioritariamente fechadas. Quando estas se encontram preenchidas, é comum que o tipo de enchimento seja argiloso (ca. 16%), composto por rocha/rocha esmagada (ca. 10%) ou pelo mineral evansite (ca. 13%) como se afere na figura 40.

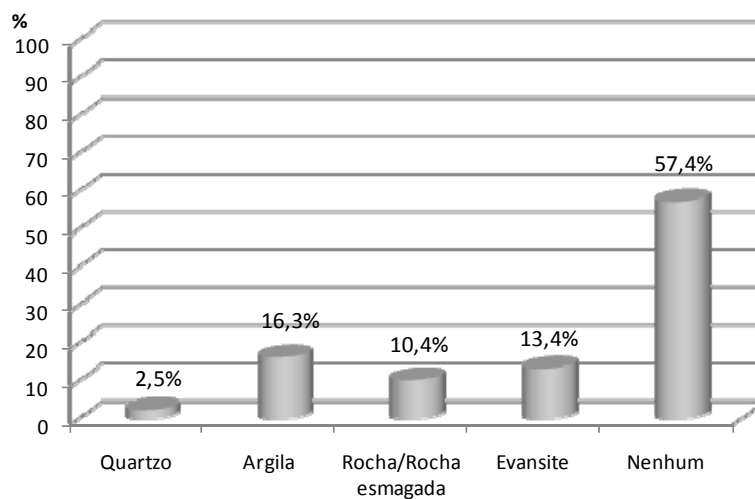


Figura 40. Tipo de enchimento das descontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Quanto à água no maciço, apreende-se, através da figura 41, que em aproximadamente, 58% das discontinuidades esta se encontra presente, salientando-se que em 28% das superfícies o fluxo é húmido a gotejante e abundante. A percentagem de discontinuidades secas não é contudo desprezável (ca. 42%).

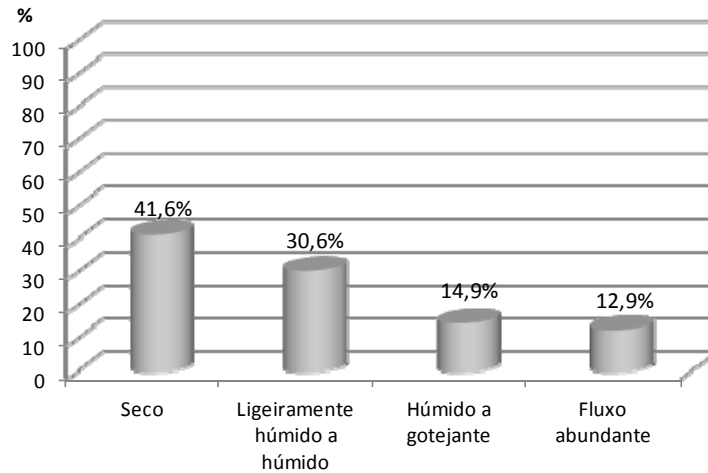


Figura 41. Presença de água nas discontinuidades do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). (Dados recolhidos no período entre 24 de Outubro e 21 de Novembro de 2009)

Verifica-se, através do diagrama de rosetas expresso na figura 42, que existem direcções preferenciais de circulação de água subterrânea. Na direcção N50°-60°E as discontinuidades apresentam-se tendencialmente ligeiramente húmidas a húmidas; enquanto que nas direcções N0°-10°E e N100°-110°E as discontinuidades mostram-se na sua maioria húmidas a gotejantes. Segundo a direcção N10°-30°E é evidente a predominância de fluxo abundante.

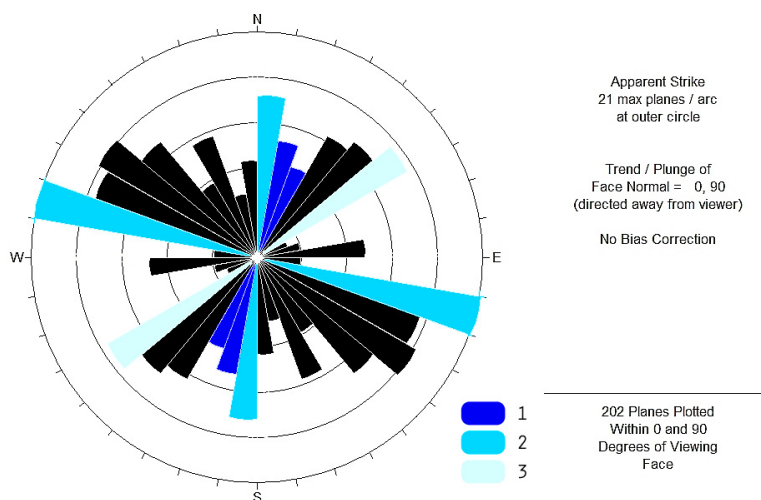


Figura 42. Diagramas de rosetas relativo ao tratamento estatístico das discontinuidades (n=202) do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), com indicação das direcções das discontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.

Através dos diagramas geológico-estruturais presentes na figura 43, foram identificadas quatro famílias principais de descontinuidades:

- a família N100°-130°E, com inclinações que oscilam entre 80°-90°, tanto para o quadrante NE como para o quadrante SW;
- a família N0°-20°E, com inclinações que oscilam entre 40°-60° para o quadrante NW;
- a família N50°-60°E, inclinações variáveis, tanto para o quadrante NW como para o quadrante SE.
- uma família sub-horizontal com inclinações entre 0°-30° para o quadrante NE, tendencialmente com direcção N100°-130°E.

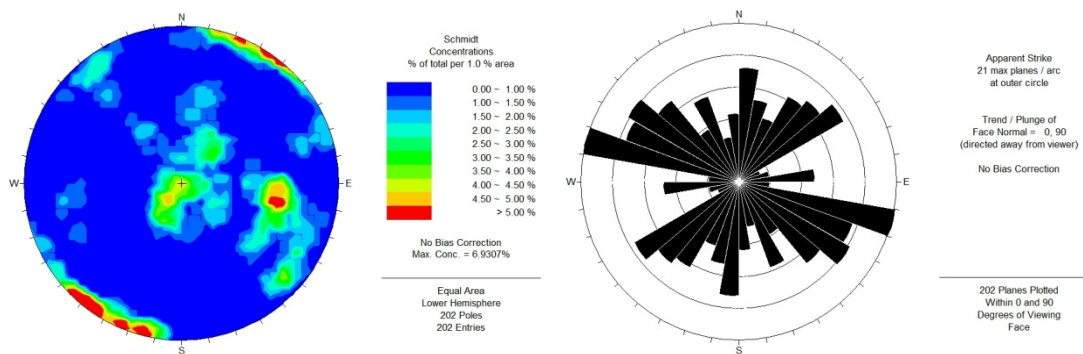


Figura 43. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=202) do maciço do Sector 1 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto).

Para esta secção, foram medidas 48 superfícies sub-horizontais, na sua maioria com orientação N120°-130°E e uma inclinação 0°-30°NE (figura 44). Do total de descontinuidades sub-horizontais analisadas, 15 correspondem a superfícies do tipo falha e 33 a estruturas do tipo diaclase.

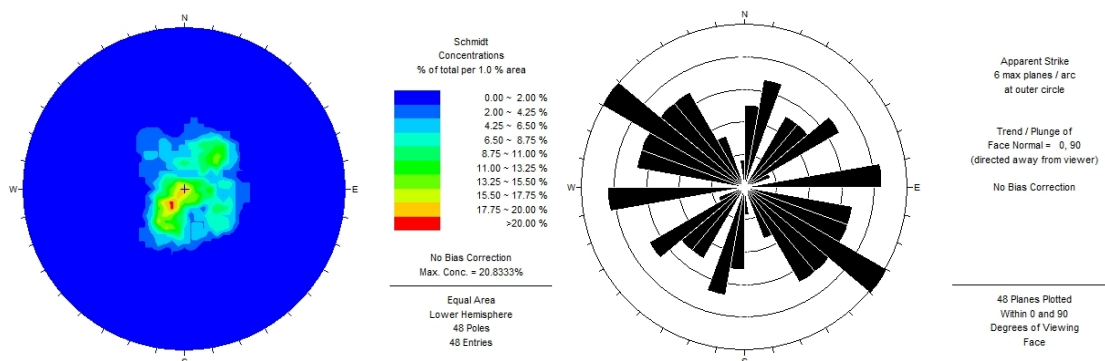


Figura 44. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades sub-horizontais (n=48) do maciço do Sector 1 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto).

A figura 45 exhibe um mapa relativo ao Sector 1 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) em que sintetiza os diagramas de contorno estrutural e de rosetas analisados anteriormente.

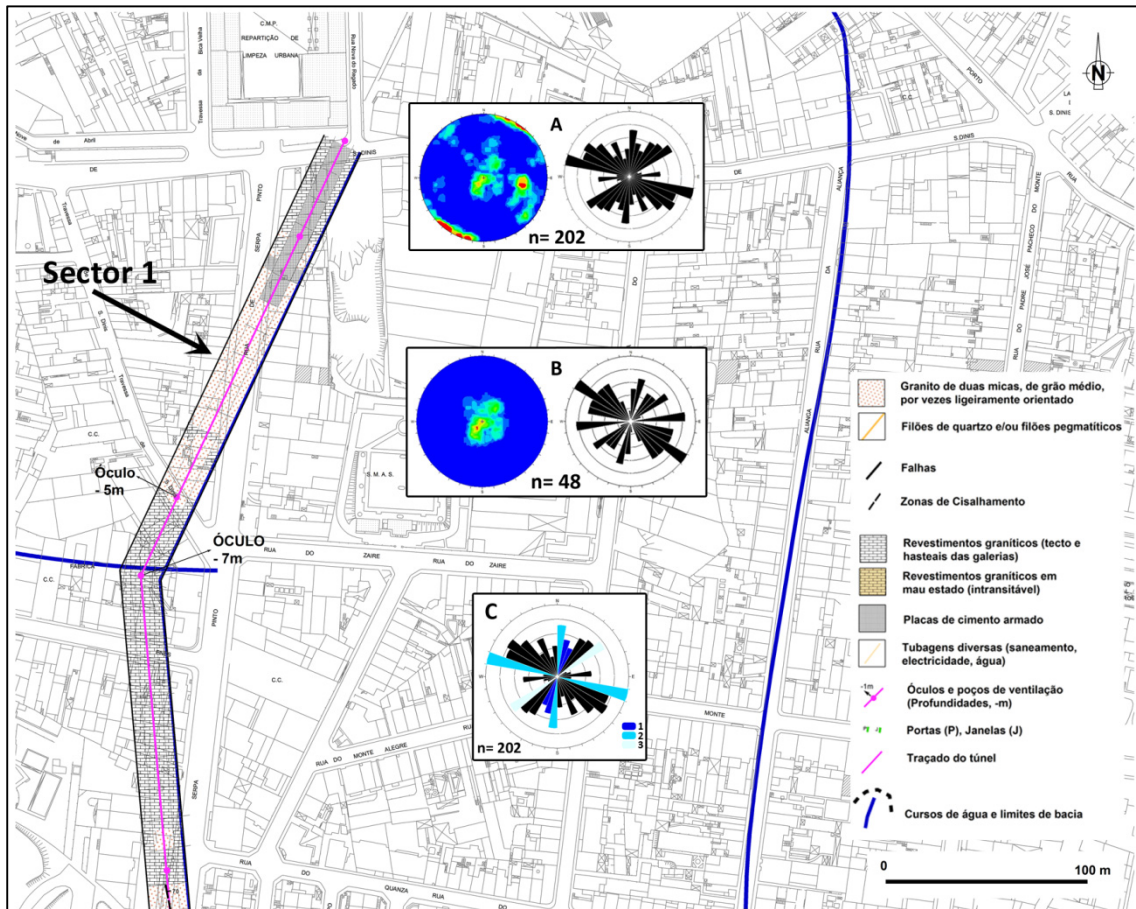


Figura 45. Sector 1 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) com diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico de: A – Total de descontinuidades (n= 202) presentes no maciço; B – descontinuidades sub-horizontais (n=48) presentes no maciço; C - descontinuidades (n=202) do maciço com indicação das direcções das descontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.

A resistência à compressão uniaxial avaliada por intermédio do ensaio esclerométrico (martelo de Schmidt, tipo L) teve origem nos dados obtidos a partir de 37 estações geomecânicas distribuídas pelo Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (anexo 2). Nos cerca de 140 m de extensão deste sector foram executados ensaios de, aproximadamente, 3 em 3 m. Das 37 estações geomecânicas, 26 foram aplicadas na superfície de descontinuidades e 11 no maciço rochoso.

As descontinuidades (figura 46) apresentam valores de resistência entre a considerada média (S_3) e a elevada (S_2) (ca. 46%) com um valor médio de 37,8 e 97,4 MPa, respectivamente. Apenas 7,7% das estações avaliadas nas descontinuidades se afiguram com classe de resistência baixa (S_4) com valor médio de 13,2 MPa. Quanto às estações geomecânicas realizadas no maciço rochoso, apenas uma se enquadra como tendo uma classe de resistência elevada (S_2), representando

aproximadamente 9% do total de estações. Cerca de 64% das superfícies do maciço ensaiadas assumem uma resistência média (S_3) e valor médio de 39,1 MPa, sendo que as restantes (ca. 27%) enquadram-se na classe de resistência baixa (S_4), com valor médio de 15,8 MPa.

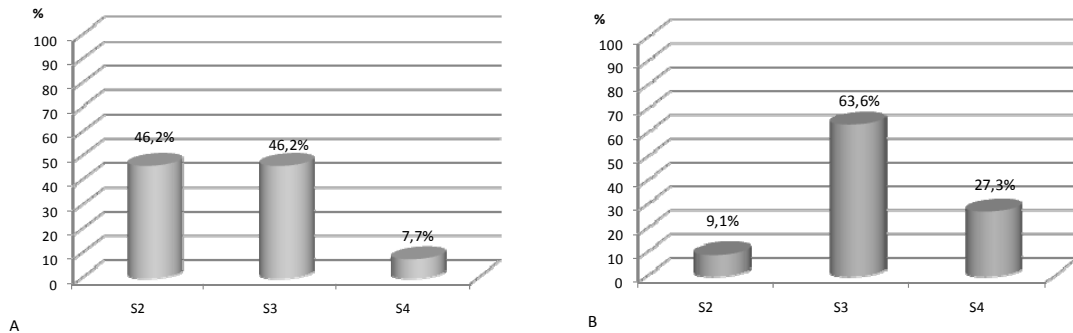


Figura 46. Resistência à compressão uniaxial nas discontinuidades (A) e no maciço (B) do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A nível global, para o total de estações geomecânicas e analisando a figura 47, verifica-se que a maioria das superfícies ensaiadas (ca. 51%) apresenta uma resistência média (S_3) com um valor médio de 38,3 MPa. Cerca de 35% das superfícies ensaiadas exibem uma classe de resistência elevada (S_2) com valor médio de 95,1 MPa, e somente 14% assume classe de resistência baixa (S_4) com 14,8 MPa de valor médio. Globalmente, o valor médio de resistência à compressão medido situa-se nos 55,1 MPa.

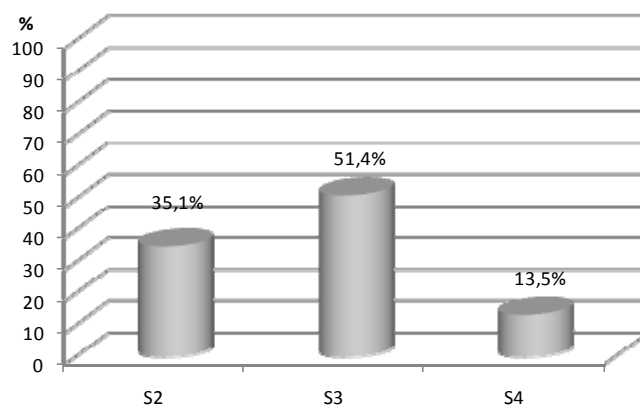


Figura 47. Resistência à compressão uniaxial do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Neste sector foram identificadas duas zonas de maior instabilidade, consideradas de potencial perigosidade. A primeira surge aos 44,17 m com presença de descontinuidades tendencialmente sub-horizontais que sugerem instabilidade no tecto da galeria; a segunda estende-se dos 102,85 m aos 104,85 m com descontinuidades muito próximas a próximas (5cm a 10cm) e atitudes médias de N134°E; 28°SW. Nos últimos 10 m do sector, identificaram-se algumas superfícies ferruginosas, presença de biofilme preto e musgo, o que aponta para um ambiente de provável acréscimo de humidade.

Nos quadros 21 e 22 apresentam-se a síntese e o resumo estatístico dos parâmetros geológico-geotécnicos registados no Sector 1. A figura 48 mostra algumas imagens que indicam o aspecto global do maciço presente no Sector 1.

Quadro 21. Síntese dos parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Galeria Carvalhido – Burgães		Sector 1 (n= 202)			
Litologia	Granito				
Grau de Alteração	W ₁₋₂	W ₃	W ₄₋₅		
	5,0%	91,6%	3,4%		
Grau de Fracturação					
<i>Tipo de descontinuidade</i>	Falha	Diaclase			
	21,3%	78,7%			
<i>Famílias principais</i>	N 100° - 130° E; 80° - 90° NE/SW				
	N 0° - 20° E; 40° - 60° NW				
	N50°-60°E; variável NW/SE				
	N 100° - 130° E; 0° - 30° NE				
Abertura	Fe.	Ab.	M.A.		
	66,3%	31,7%	2,0%		
Espaçamento	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅		
	36,6%	41,1%	22,3%		
Continuidade	M.P.C.	P.C.	M.C.		
	27,2%	62,9%	9,9%		
Terminação	R	D	O		
	21,3%	52,5%	26,2%		
Curvatura	C ₁₋₂	C ₃	C ₄₋₅		
	72,8%	20,3%	6,9%		
Rugosidade	R ₁₋₂	R ₃	R ₄₋₅		
	16,8%	79,7%	3,5%		
Enchimento	Qua.	Arg.	Ro./R.	Evan.	Nen.
	2,5%	16,3%	10,4%	13,4%	57,4%
Presença de água	Seco	Lig.H.	H.a G.		Flu. A.
	41,6%	30,6%	14,9%		12,9%
Resistência à compressão uniaxial	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
<i>Descontinuidades</i>	-	46,2%	46,2%	7,7%	-
<i>Maciço</i>	-	9,1%	63,6%	27,3%	-

Fe.	Fechada	M.P.C.	Muito pouco contínua	C ₁₋₂	Planas a ligeiramente curvas
Ab.	Aberta	P.C.	Pouco contínua	C ₃	Curvas
M.A.	Muito aberta	M.C.	Medianamente contínua	C ₄₋₅	Muito curvas
F ₁₋₂	Muito afastadas a afastadas	R	Rocha	R ₁₋₂	Lisas a algo rugosas
F ₃	Medianamente afastadas	D	Descontinuidade	R ₃	Medianamente rugosas
F ₄₋₅	Próximas a muito próximas	O	Obscura	R ₄₋₅	Muito rugosas
Qua.	Quartzo	S ₁	Resistência muito elevada	Lig.H.	Ligeiramente húmido a húmido
Arg.	Argila	S ₂	Resistência elevada	H.a G.	Húmido a gotejante
Ro./R.	Rocha/Rocha esmagada	S ₃	Resistência média	Flu. A.	Fluxo abundante
Evan.	Evansite	S ₄	Resistência baixa		
Nen.	Nenhum	S ₅	Resistência muito baixa		

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

Quadro 22. Resumo estatístico dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Sector 1 (n= 202)																										
	Abertura (mm)			Continuidade (m)					Resistência à compressão uniaxial - Descontinuidades (MPa)					Resistência à compressão uniaxial – Material-rocha (MPa)					Resistência à compressão uniaxial - Global (MPa)					Grau de Fracturação – “Fracture Intercept” (cm)		
	Valor médio global			Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global		
Média	2,0			1,8					63,4					35,2					55,1					56,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
	0,1	2,5	59,5	0,7	1,8	4,6	-	-	-	97,4	37,8	13,2	-	-	66,5	39,1	15,8	-	-	95,1	38,3	14,8	-	104,1	37,9	10,4
Moda	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	0,09			2,0					NA					NA					NA					35,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,09	1,0	99,0	0,8	2,0	4,0	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	65,0	35,0	10,0
Mediana	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	0,09			1,7					50,1					32,0					45,8					45,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,09	2,0	59,5	0,8	1,8	4,0	-	-	-	94,0	37,1	13,2	-	-	66,5	33,9	14,6	-	-	89,6	33,9	14,6	-	85,0	35,0	10,0	
Mínimo	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	0,09			0,1					10,9					13,6					10,9					1,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,09	0,5	20,0	0,1	1,0	3,0	-	-	-	66,5	25,9	10,9	-	-	66,5	29,2	13,6	-	-	66,5	25,9	10,9	-	60,0	20,0	1,0	
Máximo	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	99,0			9,0					134,2					66,5					134,2					355,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,4	9,0	99,0	0,98	2,7	9,0	-	-	-	134,2	50,7	15,4	-	-	66,5	53,0	19,1	-	-	134,2	53,0	19,1	-	355,0	58,0	19,0	
Desvio Padrão	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	10,0			1,2					37,3					16,9					34,9					52,4		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,1	2,2	45,6	0,2	0,4	1,9	-	-	-	25,3	8,9	3,2	-	-	NA	10,2	2,9	-	-	25,7	9,1	3,0	-	58,9	11,7	5,5	

NA - Não Aplicável

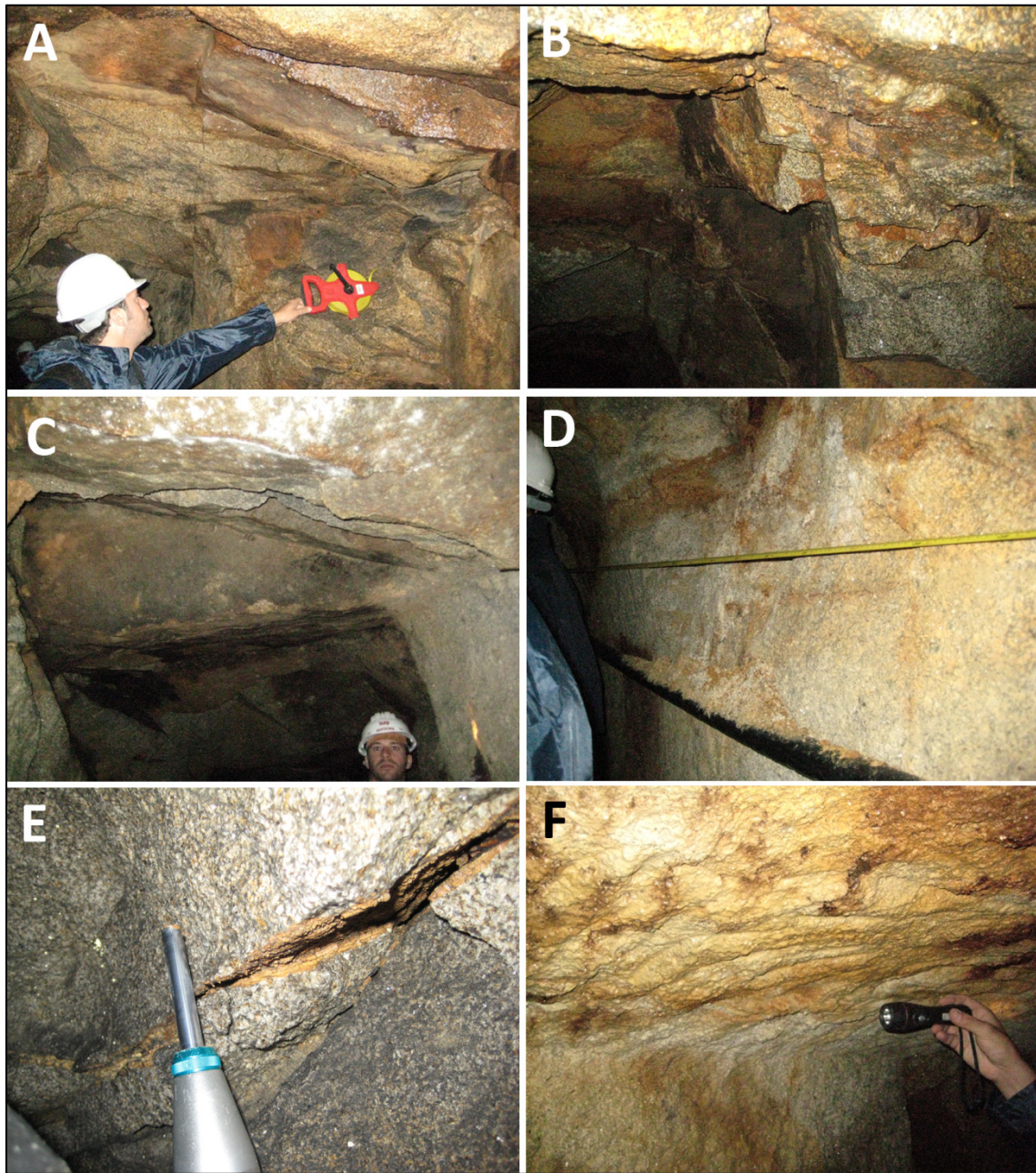


Figura 48. Diferentes aspectos presentes no Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto): A, B e C – Aspecto global do maciço com evidentes planos de descontinuidade; D e F – Zonas de menor competência em que o maciço se encontra muito alterado a decomposto (W_{4-5}); E – Descontinuidade preenchida por Evansite.

Proposta de um zonamento geotécnico – geomecânico: análise preliminar

Para o Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães do manancial de Paranhos (Porto), foram definidas três zonas geotécnicas distintas. A descrição geral para cada zona encontra-se descrita no quadro 23. A figura 49 apresenta uma proposta preliminar do zonamento geotécnico-geomecânico do maciço subterrâneo de Paranhos neste sector.

Quadro 23. Descrição geral das zonas geotécnicas do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Zonas Geotécnicas	Litologia	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Resistência à compressão uniaxial (S)/ σ_c (MPa)	Grau de fracturação (F)/cm
ZG1_S1	Granito, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos	0 – 19,5	W ₃ a W ₁₋₂	S ₃ /40-55	F ₁₋₂ a F ₃ /75-50
		39,8 – 51,0			
ZG2_S1		19,5 – 39,8	W ₃	S ₂ /85-100	F ₃ /40-50
		51,0 – 91,2			
ZG3_S1		91,2 – 96,8	W ₃	S ₃ a S ₄ /30-15	F ₃ a F ₁₋₂ /35-65
		120,5 – 139,9			

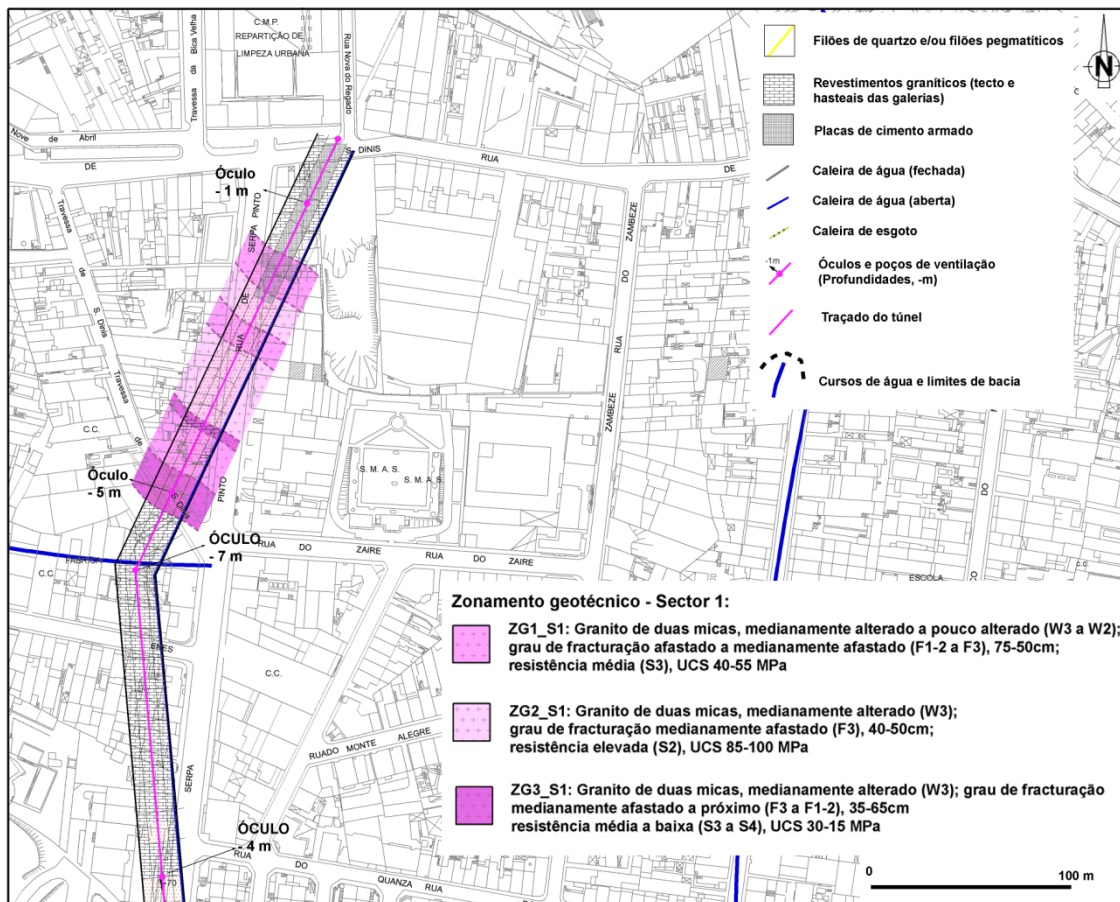


Figura 49. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A Zona Geotécnica 1 (ZG1_S1) tem uma extensão total de 54,4 m, onde se registaram 61 descontinuidades e foram realizadas 14 estações geomecânicas. Esta zona caracteriza-se por apresentar um maciço na sua maioria (77%) medianamente alterado (W_3). Revela valores de resistência à compressão uniaxial que variam, predominantemente, entre 40 e 55 MPa, com valor médio global de 45 MPa, enquadrando-se na classe de resistência média (S_3). Quanto ao espaçamento, verifica-se uma predominância das descontinuidades afastadas (F_{1-2}), situando-se o grau de fracturação médio nos 65 cm.

A Zona Geotécnica 2 (ZG2_S1) é a mais representativa, com uma extensão total de 60,5 m, na qual foram cartografadas 113 superfícies de descontinuidade e se realizaram 10 estações geomecânicas. Nesta unidade o maciço encontra-se na sua totalidade medianamente alterado (W_3), e apresenta uma classe de resistência elevada (S_2), variando os valores de resistência, fundamentalmente, entre 85 e 100 MPa, com valor médio de 102 MPa. Este parâmetro permite identificar a ZG2_S1 como unidade de maior competência em termos de resistência. O grau de fracturação médio é de 54 cm, caracterizando-se as descontinuidades como medianamente afastadas (F_3).

A Zona Geotécnica 3 (ZG3_S1) perfaz um total de 25 m e é caracterizada pelo levantamento de 28 descontinuidades e a realização de 14 estações geomecânicas. Tal como nas restantes zonas geotécnicas definidas, o maciço é maioritariamente (*ca.* 89%) medianamente alterado (W_3). Apresenta valores de resistência à compressão uniaxial que variam, nomeadamente, entre 30 e 15 MPa, onde a maioria (*ca.* 72%) se enquadra na classe de resistência média (S_3), no entanto, os valores obtidos para esta classe de resistência mostram-se sempre próximos do limite mínimo (20 MPa), para além de que cerca de 21% das estações se enquadram na classe de resistência baixa (S_4). Globalmente, a resistência à compressão uniaxial apresenta um valor médio de 35 MPa. Quanto ao grau de fracturação, as descontinuidades apresentam um espaçamento global médio de 57 cm, situando-se entre medianamente afastadas (F_3) a afastadas (F_{1-2}).

O quadro 24 aclara em síntese os principais parâmetros geológicos e geomecânicos das diferentes zonas geotécnicas.

Quadro 24. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

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)		
Litologia	Granito				
Grau de alteração	W ₁₋₂ 16,4%	W ₁₋₂ 0,0%	W ₁₋₂ 0,0%		
	W ₃ 77,0%	W ₃ 100,0%	W ₃ 89,3%		
	W ₄₋₅ 6,6%	W ₄₋₅ 0,0%	W ₄₋₅ 10,7%		
Resistência à compressão uniaxial	S ₂ 28,6%	S ₂ 90,0%	S ₂ 7,1%		
	S ₃ 57,1%	S ₃ 10,0%	S ₃ 71,5%		
	S ₄ 14,3%	S ₄ 0,0%	S ₄ 21,4%		
	Valor médio= 44,8 MPa				
Grau de Fracturação – "Fracture Intercept"	F ₁₋₂ 42,6%	F ₁₋₂ 34,5%	F ₁₋₂ 39,3%		
	F ₃ 31,1%	F ₃ 48,7%	F ₃ 32,1%		
	F ₄₋₅ 26,3%	F ₄₋₅ 16,8%	F ₄₋₅ 28,6%		
	Valor médio= 65,1 cm				
W ₁₋₂	Sã a pouco alterada	S ₂	Resistência elevada	F ₁₋₂	Muito afastadas a afastadas
W ₃	Medianamente alterada	S ₃	Resistência média	F ₃	Medianamente afastadas
W ₄₋₅	Muito alterada a decomposta	S ₄	Resistência baixa	F ₄₋₅	Próximas a muito próximas

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

O quadro 25 apresenta as diferentes características das descontinuidades em cada unidade geotécnica. Realça-se o facto de as descontinuidades se apresentarem tendencialmente fechadas nas zonas ZG1_S1 e ZG2_S1 e abertas na zona ZG3_S1. Verifica-se que na zona ZG3_S1 as descontinuidades são mais persistentes que em ZG1_S1 e ZG2_S1. A zona ZG3_S1 destaca-se ainda pelo facto das descontinuidades apresentarem, de forma dominante, um enchimento por evansite e/ou rocha esmagada e ainda por ser uma zona mais húmida que as restantes.

Quadro 25. Síntese dos parâmetros das descontinuidades do zonamento geotécnico do Sector 1 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

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%
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%
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%
Fe. Fechada	M.P.C. Muito pouco contínua	R Rocha	Qua. Quartzo
Ab. Aberta	P.C. Pouco contínua	D Descontinuidade	Arg. Argila
M.A. Muito aberta	M.C. Medianamente contínua	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).

SECTOR 2

Dos três sectores de estudo, este é o mais extenso, com um comprimento aproximado de 473 m. O primeiro troço de 230 m apresenta uma direcção média de N160°-170°E e nos restantes 243 m a direcção é aproximadamente de N150°E (figura 50).

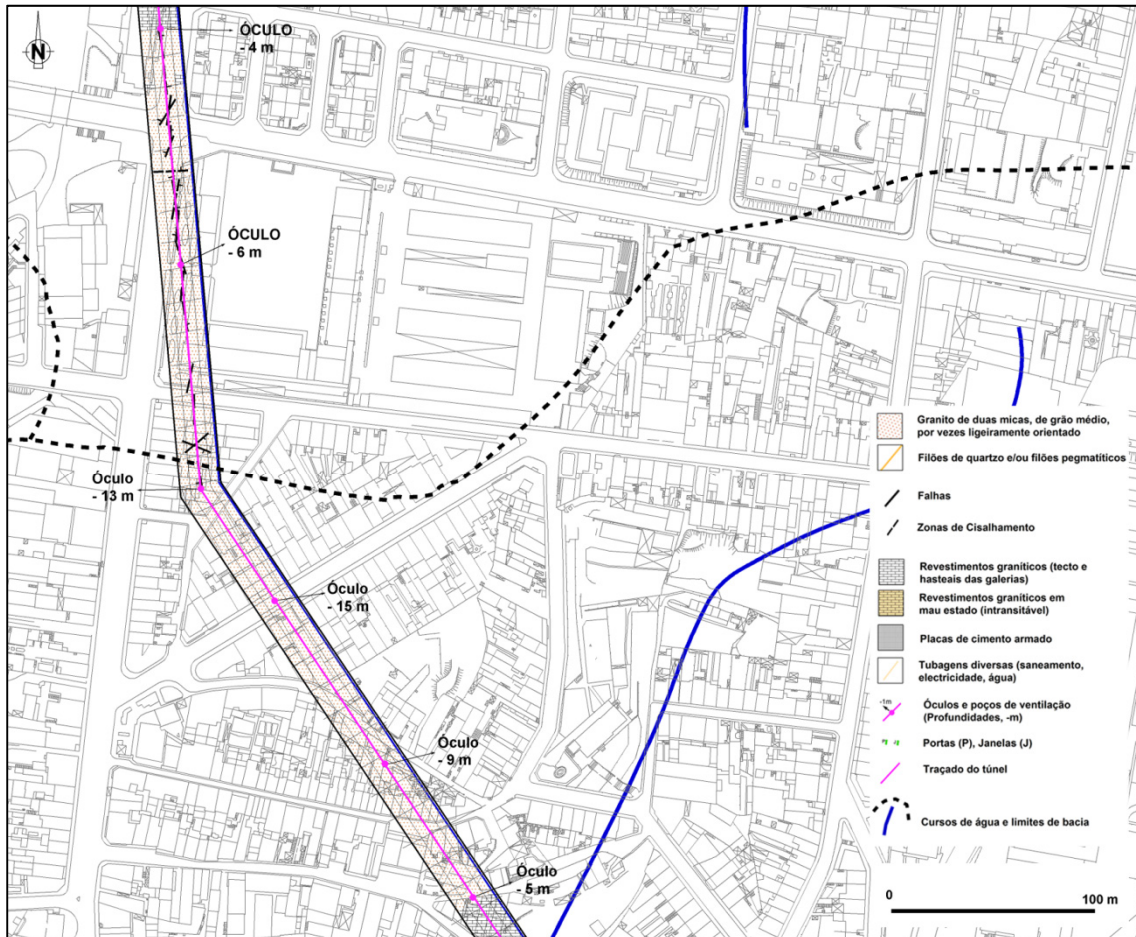


Figura 50. Sector 2 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães).

Foram recolhidos dados com recurso à técnica de amostragem linear respeitantes a um universo de 801 descontinuidades (anexo 3). Analisando a figura 51, percebe-se que o maciço se encontra maioritariamente (*ca.* 60%) como medianamente alterado (W_3), ocorrendo ainda numa percentagem bastante significativa (*ca.* 36%), são a pouco alterado (W_{1-2}), ocorrendo como muito alterado a decomposto (W_{4-5}) numa percentagem reduzida (*ca.* 5%).

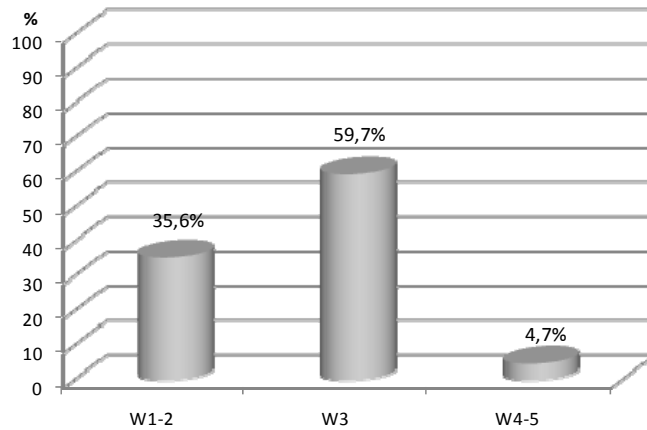


Figura 51. Grau de alteração do maciço no Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

As estruturas identificadas e medidas correspondem essencialmente a planos de descontinuidade do tipo diaclase (*ca.* 81%), representando as falhas os restantes 19% (figura 52).

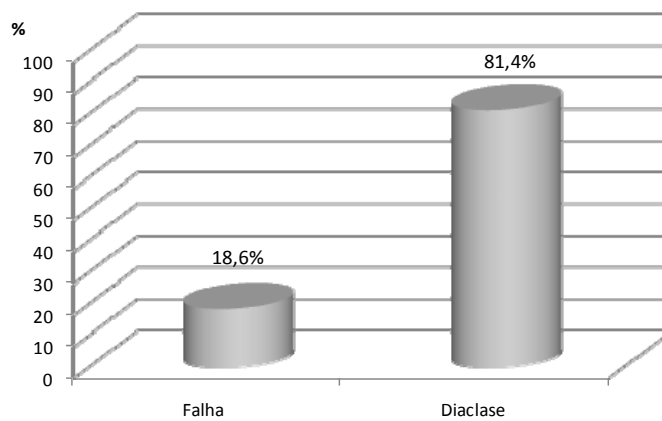


Figura 52. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Quanto ao espaçamento entre descontinuidades, verifica-se uma tendência semelhante à do Sector 1. Cerca de 37% dos planos de descontinuidade apresentam-se afastados (F_{1-2} , espaçamentos superiores a 60 cm) com um valor médio de 111,8 cm. As descontinuidades medianamente afastadas (F_3 , afastamentos entre 20 e 60 cm), surgem em maior percentagem (*ca.* 43%) e com um valor médio de espaçamento de 34,8 cm. Menos representativo (*ca.* de 20%) é o espaçamento próximo (F_{4-5} , afastamento inferior a 20 cm), com um valor médio de 9,8 cm (figura 53).

Globalmente, para este sector, o espaçamento médio entre o total de descontinuidades é de 57,8 cm.

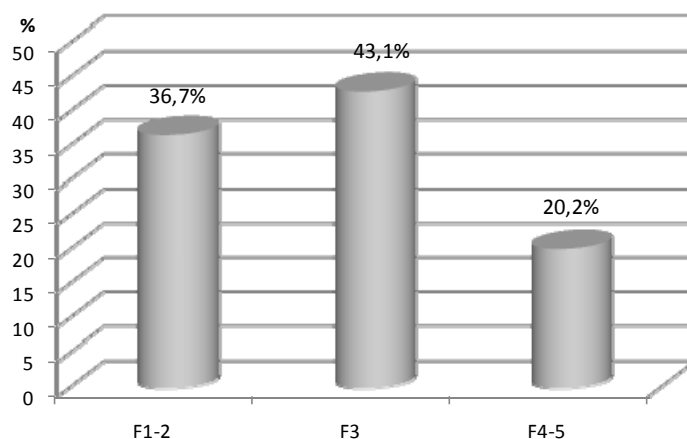


Figura 53. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Através da figura 54, verifica-se que a maioria das descontinuidades (*ca.* 83%) se encontram fechadas (aberturas inferiores a 0,5 mm), com um valor médio de 0,1 mm. Cerca de 15% dos planos de descontinuidade apresentam-se abertas (valores entre 0,5 e 10 mm), com um valor médio de 4,7 mm. As descontinuidades muito abertas (aberturas superiores a 10 mm) têm pouco representatividade (*ca.* 2%) e um valor médio de 231,3 mm.

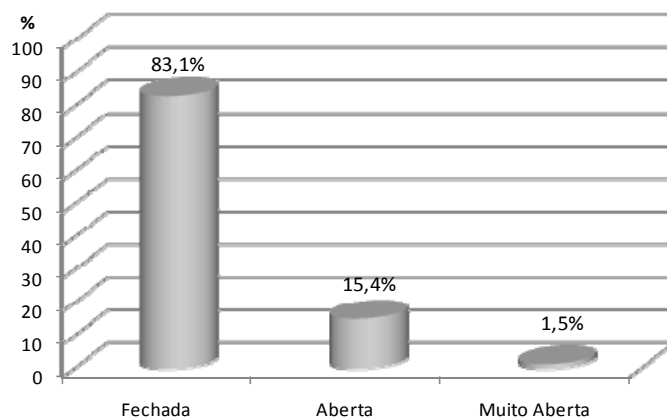


Figura 54. Abertura das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A figura 55 indica uma grande representatividade (*ca.* 77%) de descontinuidades pouco contínuas (comprimentos entre 1 e 3 m), com uma média de valores de 1,6 m. Ocorrem com menor expressão (*ca.* 19%) descontinuidades muito pouco contínuas (valores inferiores a 1 m), em média com 0,7 m, e descontinuidades medianamente contínuas (comprimentos entre 3 e 10 m) são pouco representativas (*ca.* 3%), tendo estas um valor médio de 3,9 m.

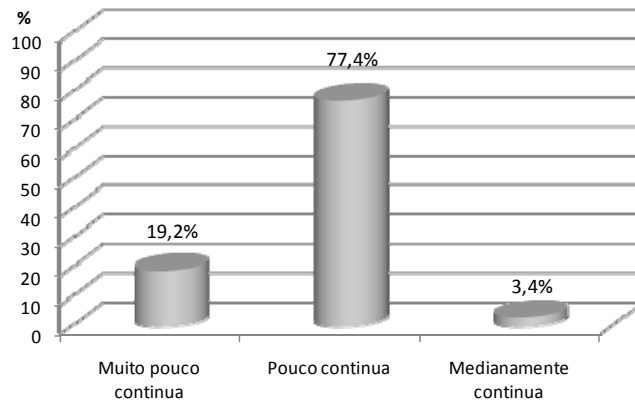


Figura 55. Continuidade das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Quanto à terminação, este sector é pautado pelo equilíbrio, verificando-se que cerca de 32% das descontinuidades analisadas termina em rocha, 28% termina noutras descontinuidades e 40% indicam uma terminação obscura (figura 56).

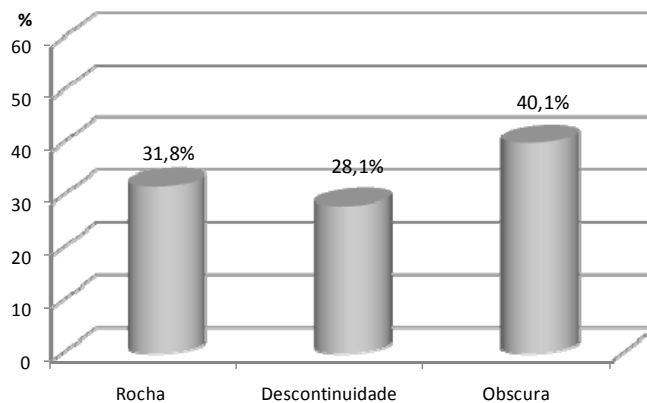


Figura 56. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Analisando a curvatura, apura-se através da figura 57, que as superfícies de descontinuidade são na sua maioria (*ca.* 60%) planas a ligeiramente curvas (C_{1-2}). Ocorrem ainda planos curvos (C_3) com aproximadamente 36% de representatividade e, com pouca expressividade (*ca.* 4%), muito curvos (C_{4-5}).

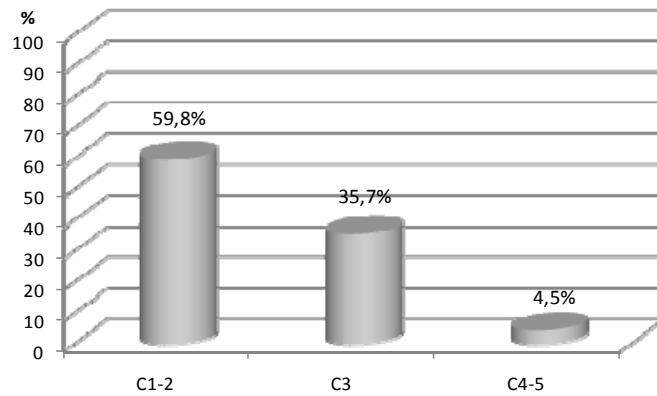


Figura 57. Curvatura das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Aproximadamente 45% das descontinuidades são pouco rugosas (R_{1-2}) e 51% medianamente rugosas (R_3). As superfícies muito rugosas (R_{4-5}) apresentam-se pouco expressivas (*ca.* 4%), como se afere na figura 58.

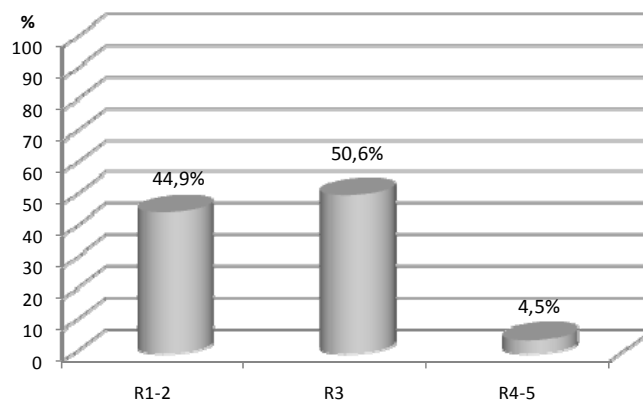


Figura 58. Rugosidade das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Na sua maioria, as descontinuidades não apresentam qualquer tipo de enchimento (*ca.* 73%). Quando preenchidas, o enchimento é maioritariamente composto por argila (*ca.* 13%), quartzo (6,5%) ou rocha/rocha esmagada (6,5%) (figura 59).

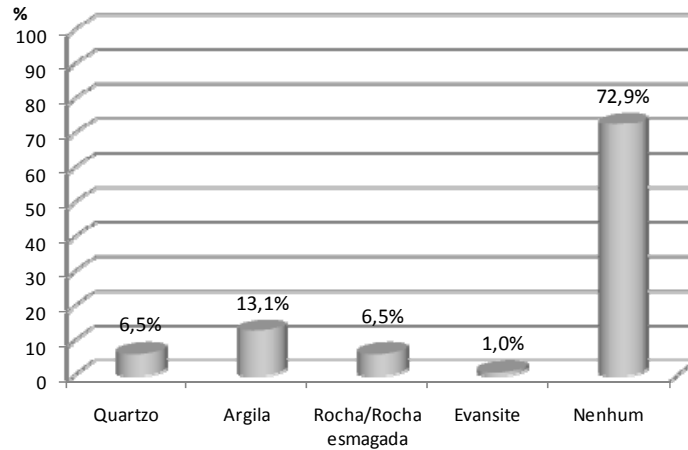


Figura 59. Tipo de enchimento das descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Relativamente à presença de água no maciço rochoso, constata-se, através da figura 60, que a maioria das descontinuidades se apresenta ligeiramente húmida a húmida (*ca.* 45%), a seca (*ca.* 36%). Em 9% das superfícies analisadas o fluxo é abundante e 11% destas encontram-se húmidas a gotejantes.

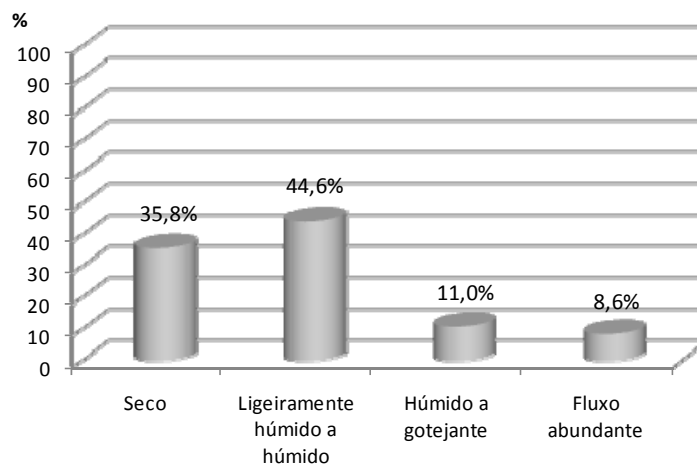


Figura 60. Presença de água nas descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). (Dados recolhidos no período entre 9 de Outubro e 20 de Dezembro de 2010)

As direcções preferenciais de circulação de água subterrânea são N170°-180°E para descontinuidades ligeiramente húmidas a húmidas, N110°-120°E quando estas se apresentam húmidas a gotejantes e N10°-20°E para maiores escorrências e fluxos de água (fluxo abundante). A figura 61 expõe esta tendência através de um diagrama de rosetas.

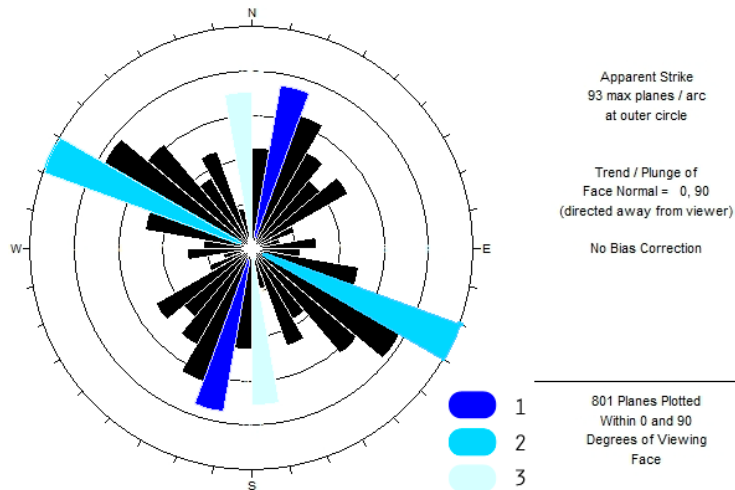


Figura 61. Diagramas de rosetas relativo ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=801) do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), com indicação das direcções das descontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.

Os diagramas geológico-estruturais, revelados na figura 62, permitem identificar três famílias principais de descontinuidades neste sector:

- a família N110°-130°E, com inclinações que oscilam entre 70°-90°, tanto para o quadrante NE como para o quadrante SW;
- a família N10°-30°E, com inclinações que oscilam entre 80°-90° para o quadrante SE;
- a família N170°-180°E, com inclinações que variam entre 60°-80° para o quadrante NE.

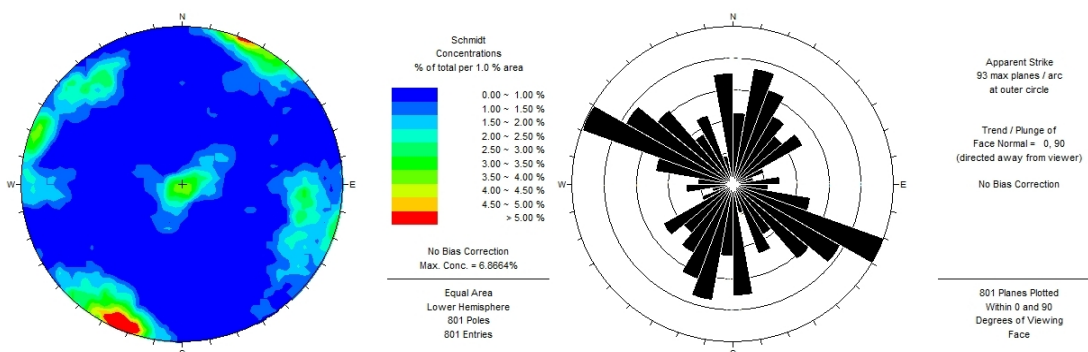


Figura 62. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=801) do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Foram recolhidos e analisados dados referentes a 117 descontinuidades sub-horizontais, 35 do tipo falha e 82 diaclases, com maior representatividade nas orientações N110°-120°E e N150°-160°E, com inclinação preferencial 0°-30°NE/SW (figura 63).

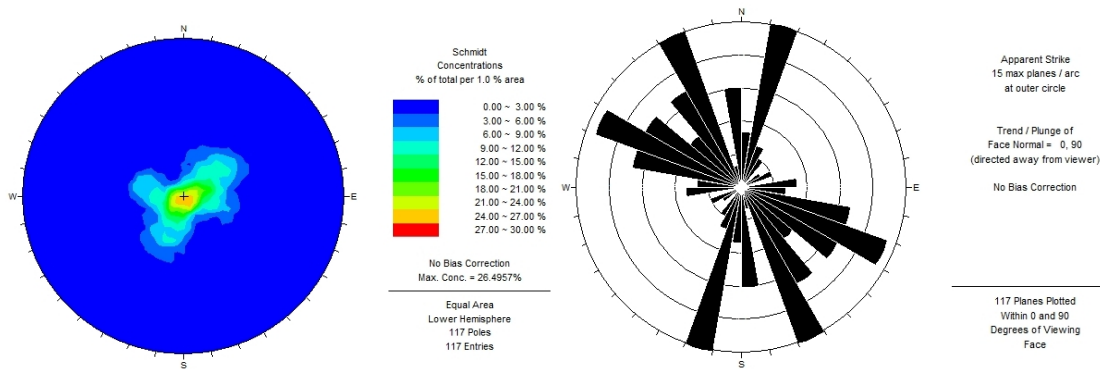


Figura 63. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades sub-horizontais (n=117) do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Pode-se observar, através da figura 64, o mapa do Sector 2 com os respectivos diagramas de contorno estrutural e de rosetas estudados.

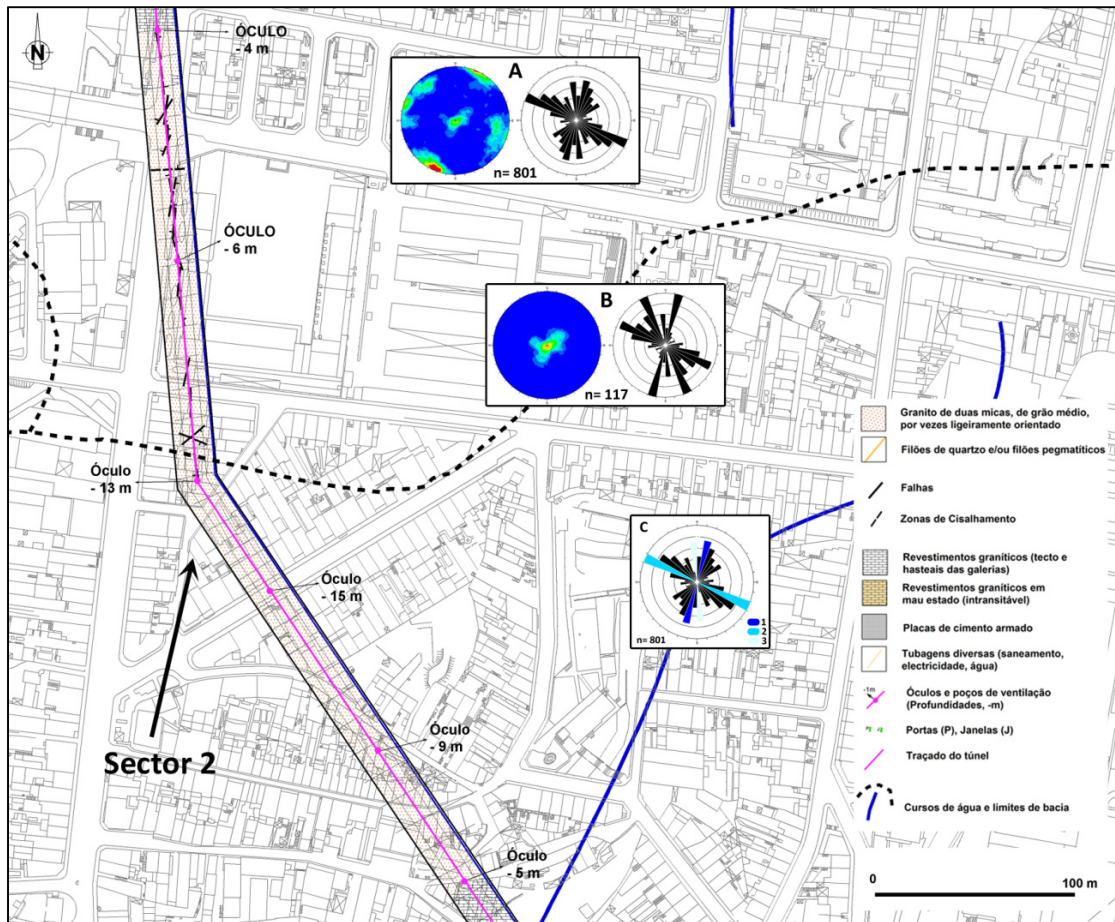


Figura 64. Sector 2 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) com diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico de: A – Total de discontinuidades ($n= 801$) presentes no maciço; B – discontinuidades sub-horizontais ($n=117$) presentes no maciço; C - discontinuidades ($n=801$) do maciço com indicação das direcções das discontinuidades onde foi registado fluxo de água abundante (1), húmido a gotejante (2) e ligeiramente húmido a húmido (3). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.

A resistência à compressão uniaxial avaliada por intermédio do ensaio esclerométrico (martelo de Schmidt, tipo L) teve origem nos dados obtidos a partir de um total de 146 estações geomecânicas, 106 aplicadas na superfície de discontinuidades e 40 no maciço rochoso granítico (anexo 4). A figura 65 permite aferir que cerca de 35% das superfícies de discontinuidade se afiguram com classe de resistência elevada (S_2), surgindo com maior representatividade a classe de resistência média (S_3) (ca. 64%). Os valores médios de resistência para cada uma das classes referidas são de 82,5 e 37,4 MPa respectivamente. Apenas uma estação se revela como sendo de classe de resistência baixa (S_4), com resistência de 19,6 MPa, representando aproximadamente 1% do total de estações geomecânicas recolhidas na superfície de discontinuidades. A tendência mantém-se nas estações geomecânicas realizadas no maciço rochoso. A classe de resistência elevada (S_2) verifica-se em 25% das estações com um valor médio de 87,3 MPa. A maioria das estações enquadra-se na classe de resistência média (S_3) (ca. 68%), com média de 41,8 MPa. Com

menor representatividade, aproximadamente 7 %, surge a classe de resistência baixa (S_4), com valor médio de 16,7 MPa.

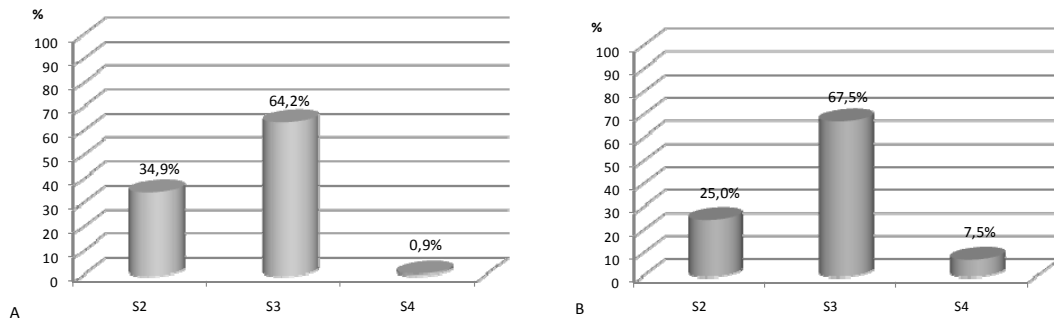


Figura 65. Resistência à compressão uniaxial nas descontinuidades (A) e no maciço (B) do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Globalmente, verifica-se que a maioria das superfícies ensaiadas (ca. 65%) se agrupa na classe de resistência média (S_3) com valor médio de 38,6 MPa; aproximadamente 32% correspondem à classe de resistência elevada (S_2) com 83,5 MPa de valor médio, e apenas cerca de 3% assume uma resistência baixa (S_4) com valor médio de 17,4% (figura 66).

Em termos globais, o Sector 2 apresenta um valor médio de resistência à compressão uniaxial de 52,5 MPa.

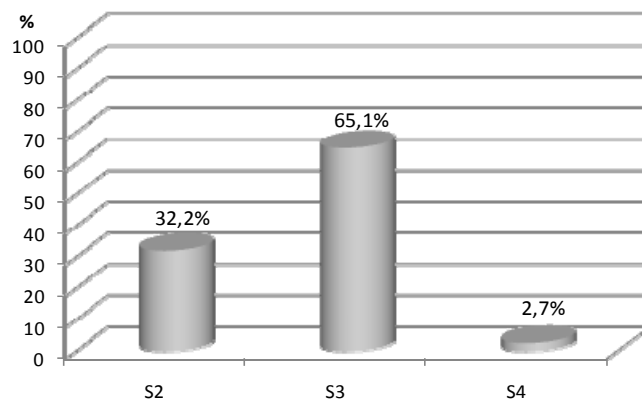


Figura 66. Resistência à compressão uniaxial do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Verificam-se, para este sector, zonas em que a presença de água é uma constante, com fluxos consideráveis, principalmente nos primeiros 230 m da sua extensão. Existe ao longo de todo o sector, a presença de óxidos de ferro (cor avermelhada), biofilme carbonatado conhecido na literatura como *moonmilk* (cor branca) e biofilme preto (óxidos de manganês).

Nos quadros 26 e 27 apresentam-se a síntese e o resumo estatístico dos parâmetros geológico-geotécnicos registados no Sector 2. A figura 67 indica algumas imagens recolhidas no Sector 2, mostrando algumas das suas características.

Quadro 26. Síntese dos parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Galeria Carvalhido – Burgães		Sector 2 (n= 801)			
Litologia	Granito				
Grau de Alteração	W ₁₋₂	W ₃	W ₄₋₅		
	35,6%	59,7%	4,7%		
Grau de Fracturação					
<i>Tipo de descontinuidade</i>	Falha	Diaclase			
	18,6%	81,4%			
<i>Famílias principais</i>	N 110° - 130° E; 70° - 90° NE/SW				
	N 10° - 30° E; 80° - 90° SE				
	N 170° - 180° E; 60° - 80° NE				
Abertura	Fe.	Ab.	M.A.		
	83,2%	15,4%	1,5%		
Espaçamento	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅		
	36,7%	43,1%	20,2%		
Continuidade	M.P.C.	P.C.	M.C.		
	19,2%	77,4%	3,4%		
Terminação	R	D	O		
	31,8%	28,1%	40,1%		
Curvatura	C ₁₋₂	C ₃	C ₄₋₅		
	59,8%	35,7%	4,5%		
Rugosidade	R ₁₋₂	R ₃	R ₄₋₅		
	44,9%	50,6%	4,5%		
Enchimento	Qua.	Arg.	Ro./R.	Evan.	Nen.
	6,5%	13,1%	6,5%	1,0%	72,9%
Presença de água	Seco	Lig.H.	H.a G.	Flu. A.	
	35,8%	44,6%	11,0%	8,6%	
Resistência à compressão uniaxial	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
<i>Descontinuidades</i>	-	34,9%	64,2%	0,9%	-
<i>Maciço</i>	-	25,0%	67,5%	7,5%	-

Fe.	Fechada	M.P.C.	Muito pouco contínua	C ₁₋₂	Planas a ligeiramente curvas
Ab.	Aberta	P.C.	Pouco contínua	C ₃	Curvas
M.A.	Muito aberta	M.C.	Medianamente contínua	C ₄₋₅	Muito curvas
F ₁₋₂	Muito afastadas a afastadas	R	Rocha	R ₁₋₂	Lisas a algo rugosas
F ₃	Medianamente afastadas	D	Descontinuidade	R ₃	Medianamente rugosas
F ₄₋₅	Próximas a muito próximas	O	Obscura	R ₄₋₅	Muito rugosas
Qua.	Quartzo	S ₁	Resistência muito elevada	Lig.H.	Ligeiramente húmido a húmido
Arg.	Argila	S ₂	Resistência elevada	H.a G.	Húmido a gotejante
Ro./R.	Rocha/Rocha esmagada	S ₃	Resistência média	Flu. A.	Fluxo abundante
Evan.	Evansite	S ₄	Resistência baixa		
Nen.	Nenhum	S ₅	Resistência muito baixa		

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

Quadro 27. Resumo estatístico dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Sector 2 (n= 801)																													
	Abertura (mm)			Continuidade (m)					Resistência à compressão uniaxial - Descontinuidades (MPa)					Resistência à compressão uniaxial – Material-rocha (MPa)					Resistência à compressão uniaxial - Global (MPa)					Grau de Fracturação – “Fracture Intercept” (cm)					
	Valor médio global			Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					
Média	4,3			1,5					52,9					51,3					52,5					57,8					
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅			
	0,1	4,7	231,3	0,7	1,6	3,9	-	-	-	82,5	37,4	19,6	-	-	87,3	41,8	16,7	-	-	83,5	38,6	17,4	-	111,8	34,8	9,8			
Moda	Global			Global					Global					Global					Global					Global					
	0,09			2,0					NA					NA					NA					30,0					
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅			
	0,09	9,0	99,0	0,8	2,0	5,0	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	60,0	30,0	10,0
Mediana	Global			Global					Global					Global					Global					Global					
	0,09			1,5					46,6					46,6					46,6					40,0					
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅			
	0,09	2,4	99,0	0,7	1,7	4,0	-	-	-	78,2	38,4	19,6	-	-	79,9	43,1	16,3	-	-	78,2	39,2	17,9	-	95,0	30,0	10,0			
Mínimo	Global			Global					Global					Global					Global					Global					
	0,00			0,4					19,6					14,1					14,1					1,0					
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅			
	0,00	0,5	15,0	0,4	1,0	3,0	-	-	-	60,0	20,0	19,6	-	-	61,3	20,9	14,1	-	-	60,0	20,0	14,1	-	60,0	20,0	1,0			
Máximo	Global			Global					Global					Global					Global					Global					
	999,0			6,0					139,4					124,4					139,4					310,0					
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅			
	0,4	10,0	999,0	0,97	2,8	6,0	-	-	-	139,4	57,1	19,6	-	-	124,4	56,9	19,6	-	-	139,4	57,1	19,6	-	310,0	57,0	18,0			
Desvio Padrão	Global			Global					Global					Global					Global					Global					
	50,7			0,7					25,5					25,6					25,4					54,1					
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅			
	0,0	3,4	359,9	0,2	0,4	0,9	-	-	-	17,3	10,5	NA	-	-	21,3	9,8	2,7	-	-	18,1	10,4	2,7	-	55,2	11,2	4,0			

NA - Não Aplicável

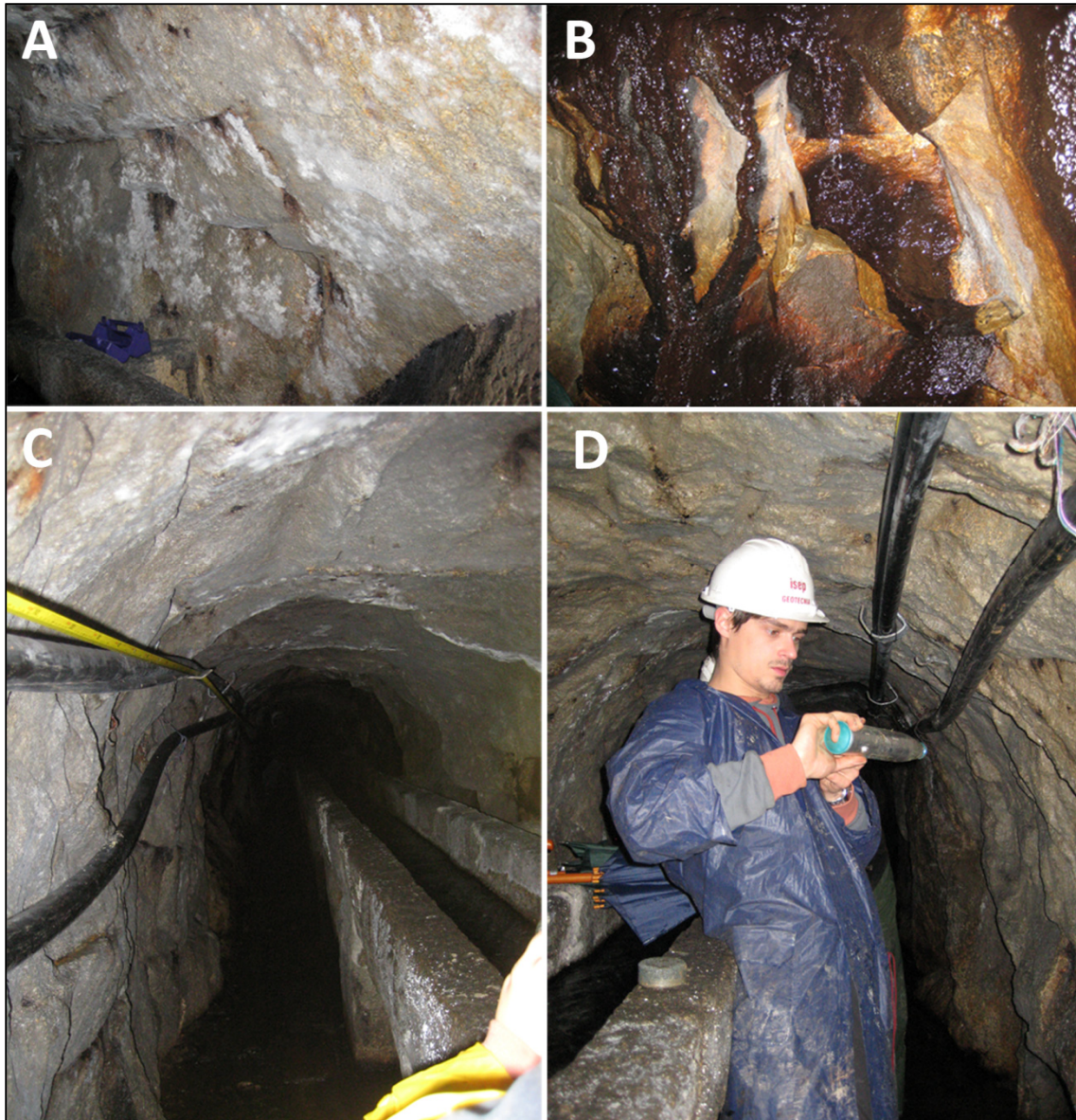


Figura 67. Diferentes aspectos presentes no Sector 2 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto): A – Presença de biofilme carbonatado de cor branca (*moonmilk*); B – Fluxo de água considerável e presença de óxidos de ferro de cor avermelhada. C e D – Aspecto global do maciço.

Proposta de um zonamento geotécnico – geomecânico: análise preliminar

No Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães do manancial de Paranhos (Porto), definiram-se três zonas geotécnicas descritas genericamente no quadro 28. A proposta preliminar do zonamento geotécnico-geomecânico do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães do manancial de Paranhos está patente na figura 68.

Quadro 28. Descrição geral das zonas geotécnicas do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Zonas Geotécnicas	Litologia	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Resistência à compressão uniaxial (S)/ σ_c (MPa)	Grau de fracturação (F)/cm
ZG1_S2	Granito, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos	0 – 33,8 141 – 162 226,3 – 246,9 266,4 – 422,6	W ₃	S ₃ / 40-55	F ₃ / 40-55
ZG2_S2		33,8 – 141 162 – 226,3 246,9 – 266,4 422,6 – 434,4 463,5 – 472,2			
ZG3_S2		434,4 – 463,5			

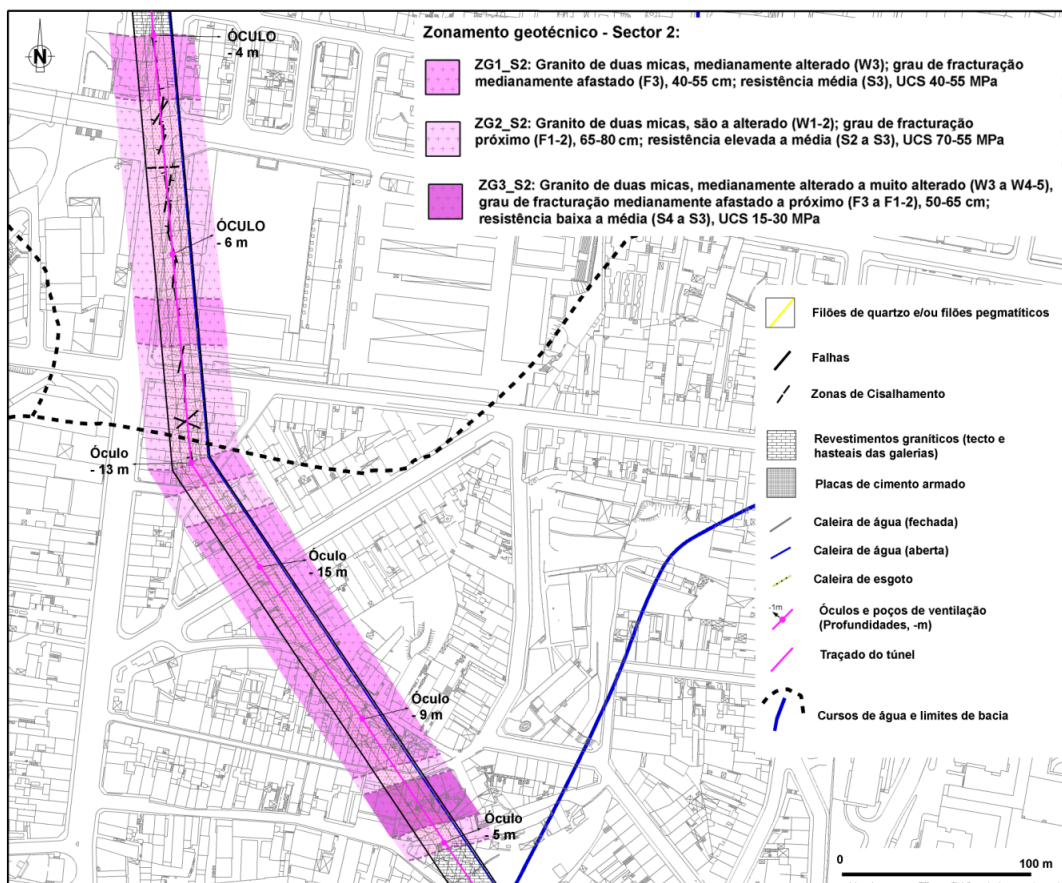


Figura 68. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A zona geotécnica 1 (ZG1_S2) é a mais representativa das três zonas definidas, com uma extensão global de 231,6 m, onde se enquadra uma amostragem de 478 descontinuidades e 99 estações geomecânicas. O maciço apresenta-se quase na sua totalidade (*ca.* 92%) medianamente alterado (W_3). Exibe uma resistência média (S_3), num intervalo predominantemente entre 40 e 55 MPa, com um valor médio de 47 MPa. Quanto ao grau de fracturação, as descontinuidades ocorrem maioritariamente (*ca.* 46%) medianamente afastadas (F_3), com um valor médio de 47,2 cm.

Com uma extensão integral de 208,5 m, foi definida a zona geotécnica 2 (ZG2_S2) que contempla a análise de 274 descontinuidades e a realização de 44 estações geomecânicas. Nesta zona, o maciço é visivelmente de melhor qualidade, são a pouco alterado (W_{1-2}). A resistência à compressão uniaxial apresenta um valor médio global de 68 MPa de entre uma gama de valores que varia, essencialmente, entre 70 e 55 Mpa, enquadrando-se nas classes de resistência elevada (S_2) a média (S_3). O valor médio para o afastamento entre descontinuidades é de 76 cm, correspondendo a descontinuidades afastadas (F_{1-2}).

Foi delimitada uma terceira zona geotécnica (ZG3_S2), com comprimento de 29,1 m, onde foram estudadas 49 descontinuidades e 4 estações geomecânicas. Neste troço, o maciço encontra-se medianamente alterado (W_3) a muito alterado a decomposto (W_{4-5}). A resistência à compressão uniaxial enquadrou-se, fundamentalmente, no intervalo sempre entre 15 a 30 MPa, correspondendo a uma resistência baixa a média (S_4 a S_3), sendo o valor médio de 24 MPa.

As descontinuidades apresentam-se maioritariamente (*ca.* 47%) medianamente afastadas (F_3), no entanto, há uma percentagem considerável (*ca.* 39%) destas que estão afastadas (F_{1-2}). Globalmente, para esta unidade geotécnica, o espaçamento médio entre descontinuidades situa-se nos 59,4 cm.

Os parâmetros geológicos e geotécnicos supramencionados para as diferentes zonas geotécnicas encontram-se expostos no quadro 29.

Quadro 29. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

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)						
Litologia	Granito								
Grau de alteração	W _{1,2}	5,0%		W _{1,2}	95,3%		W _{1,2}	0,0%	
	W ₃	92,1%		W ₃	4,7%		W ₃	51,0%	
	W _{4,5}	2,9%		W _{4,5}	0,0%		W _{4,5}	49,0%	
Resistência à compressão uniaxial	S ₂	24,3%		S ₂	54,5%		S ₂	0,0%	
	S ₃	72,7%		S ₃	43,2%		S ₃	100,0%	
	S ₄	3,0%		S ₄	2,3%		S ₄	0,0%	
	Valor médio= 47,0 MPa			Valor médio= 67,5 MPa			Valor médio= 24,0 MPa		
Grau de Fracturação – “Fracture Intercept”	F _{1,2}	26,8%		F _{1,2}	53,6%		F _{1,2}	38,8%	
	F ₃	46,4%		F ₃	36,5%		F ₃	46,9%	
	F _{4,5}	26,8%		F _{4,5}	9,9%		F _{4,5}	14,3%	
	Valor médio= 47,2 cm			Valor médio= 76,0 cm			Valor médio= 59,4 cm		
W _{1,2}	São a pouco alterada		S ₂	Resistência elevada		F _{1,2}	Muito afastadas a afastadas		
W ₃	Medianamente alterada		S ₃	Resistência média		F ₃	Medianamente afastadas		
W _{4,5}	Muito alterada a decomposta		S ₄	Resistência baixa		F _{4,5}	Próximas a muito próximas		

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

As características das discontinuidades presentes em cada uma das três zonas geotécnicas estão compiladas no quadro 30. As características são idênticas, com excepção da presença de água, uma vez que as zonas ZG1_S2 e ZG2_S2 se apresentam ligeiramente húmidas e na zona ZG3_S2 o maciço se apresenta totalmente seco.

Quadro 30. Síntese dos parâmetros das descontinuidades do zonamento geotécnico do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

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% Diaclase 85,1%	Falha 24,5% Diaclase 75,5%	Falha 22,4% Diaclase 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%	Fe. 93,1% Ab. 4,7% M.A. 2,2%	Fe. 71,4% Ab. 20,4% M.A. 8,2%
Continuidade	M.P.C. 19,5% P.C. 75,5% M.C. 5,0%	M.P.C. 20,8% P.C. 78,1% M.C. 1,1%	M.P.C. 8,2% P.C. 91,8% M.C. 0,0%
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 Ab. Aberta M.A. Muito aberta	M.P.C. Muito pouco contínua P.C. Pouco contínua M.C. Medianamente contínua	R Rocha D Descontinuidade O Obscura
	C ₁₋₂ Planas a ligeiramente curvas C ₃ Curvas C ₄₋₅ Muito curvas	R ₁₋₂ Lisas a algo rugosas R ₃ Medianamente rugosas R ₄₋₅ Muito rugosas	Qua. Quartzo Arg. Argila Ro./R. Rocha/Rocha esmagada Evan. Evansite Nen. Nenhum
		Lig.H. Ligeiramente húmido H.a G. Húmido a gotejante Flu. A. Fluxo abundante	

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

SECTOR 3

Este é o último dos três sectores definidos para a galeria subterrânea Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). Com uma extensão de aproximadamente 157 m, apresenta uma direcção 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 (anexo 5). Através da análise da figura 69, constata-se que neste segmento o maciço granítico se encontra maioritariamente (55%) são a pouco alterado (W_{1-2}). Ocorre em percentagens menos expressivas (ca. 28% e 17%), como medianamente alterado (W_3) e muito alterado a decomposto (W_{4-5}), respectivamente.

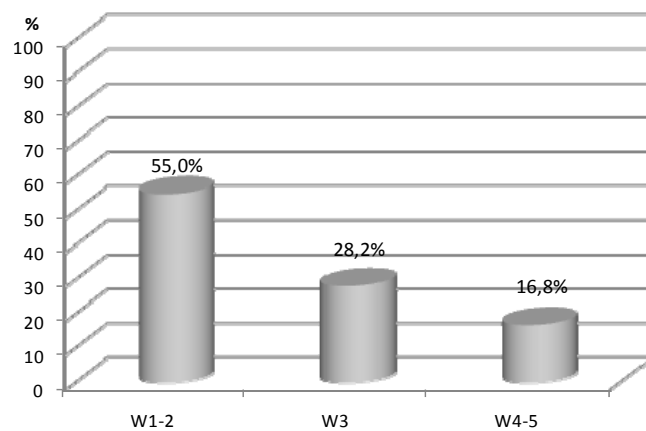


Figura 69. Grau de alteração do maciço no Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

À semelhança do verificado nos anteriores sectores, existe uma clara predominância de superfícies descontínuas do tipo diaclase, neste caso, com uma representatividade de cerca de 86%. As demais descontinuidades (ca. 14%) equivalem a falhas (figura 70).

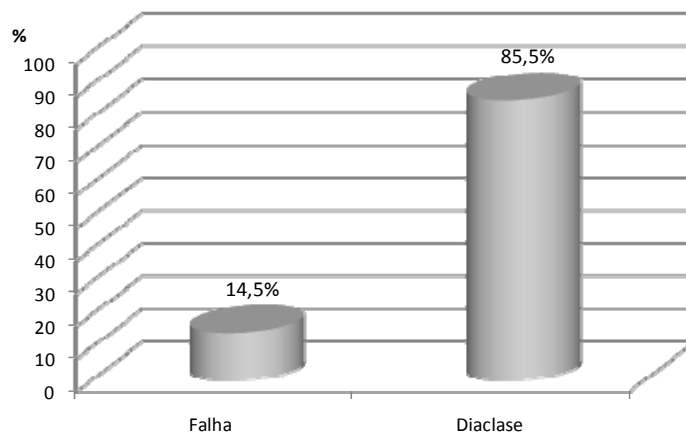


Figura 70. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A figura 71 mostra que 45% das descontinuidades têm espaçamentos superiores a 60 cm, em média de 122,2 cm, sendo portanto afastadas (F_{1-2}). Cerca de 34% dos planos de descontinuidade afiguram-se como medianamente afastadas (F_3), com afastamentos entre 20 e 60 cm e um valor médio de 33,6 cm. As restantes descontinuidades (ca. 21%), assumem espaçamento próximo (F_{4-5}), com afastamentos inferiores a 20 cm e um valor médio de 9,8 cm.

Globalmente, para este sector, o espaçamento médio entre descontinuidades situa-se nos 67,9 cm.

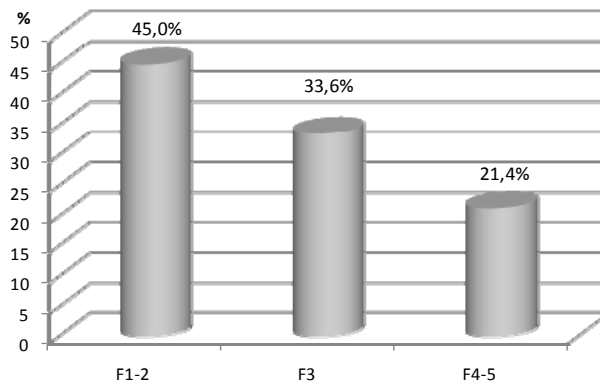


Figura 71. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do Sector 2 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A maioria das descontinuidades (ca. 75%) manifesta-se com aberturas inferiores a 0,5 mm, classificando-se como fechadas, apresentando um valor médio de abertura de 0,1 mm. Não obstante, não são de descurar as descontinuidades com aberturas compreendidas entre 0,5 e 10 mm (ca. 23%) com valor médio de 3,2 mm. Numa percentagem claramente inferior (ca. 2%), surgem descontinuidades muito abertas, com valor médio de 25 mm (figura 72).

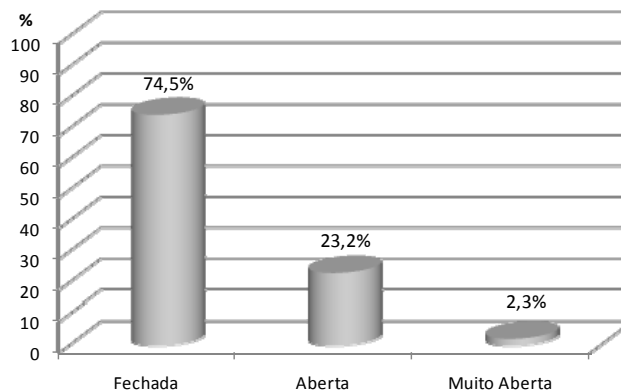


Figura 72. Abertura das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Relativamente à continuidade, verifica-se através da figura 73, que a grande maioria das descontinuidades (ca. 89%) são pouco contínuas (comprimentos variam entre 1 e 3 m), com um valor médio de 1,8 m. Ocorrem ainda, com representatividade baixa (ca. 11%), descontinuidades muito pouco contínuas com um valor médio de 0,8 m.

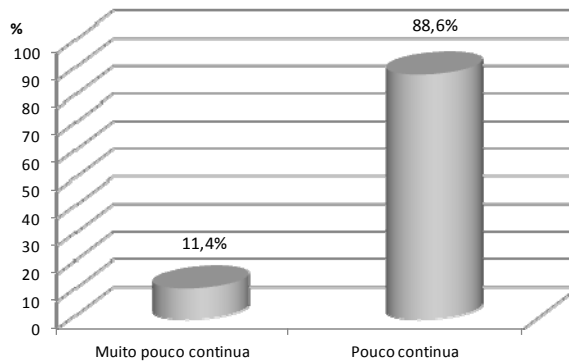


Figura 73. Continuidade das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Analisando a terminação (figura 74), reconhece-se que cerca de 47% das descontinuidades apresenta terminação obscura, aproximadamente 33% termina em rocha e 20% termina noutras descontinuidades.

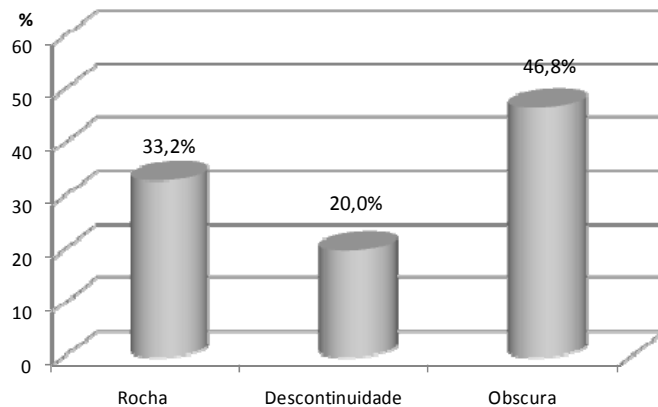


Figura 74. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Quanto à curvatura, verifica-se através da figura 75, que neste sector as descontinuidades são maioritariamente (ca. 69%) planas a ligeiramente curvas (C_{1-2}). Com menor representatividade (ca. 27% e 4%) surgem as descontinuidades curvas (C_3) e muito curvas (C_{4-5}).

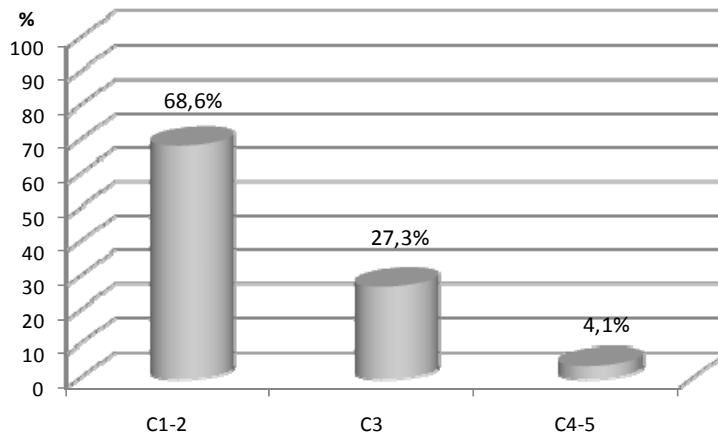


Figura 75. Curvatura das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Das superfícies investigadas, cerca de 56% são pouco rugosas (R_{1-2}), 43% surgem como medianamente rugosas (R_3) e somente 1% se enquadra no grupo das superfícies muito rugosas (R_{4-5}) (figura 76).

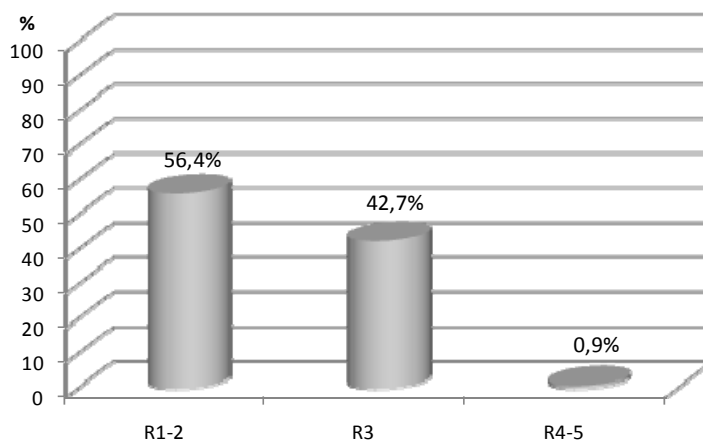


Figura 76. Rugosidade das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A grande maioria das descontinuidades neste sector (ca. 81%) não apresenta qualquer tipo de preenchimento. A figura 77 permite observar que somente cerca de 19% das descontinuidades se encontra preenchida, cerca de 13% por argila e 6% por rocha/rocha esmagada. Salienta-se o facto de neste sector não se terem encontrado descontinuidades preenchidas por quartzo ou evansite.

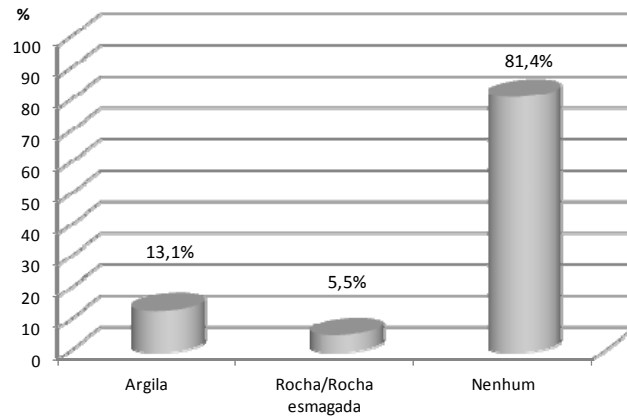


Figura 77. Tipo de enchimento das descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A presença de água neste sector praticamente não se faz notar, uma vez que cerca de 85% das descontinuidades permanecem secas. Existe um grupo reduzido de descontinuidades (ca. 14%) que se apresentam ligeiramente húmidas a húmidas. Somente cerca de 1% dos planos descontínuos se apresentam húmidos a gotejantes e não há registo de fluxos abundantes. (figura 78).

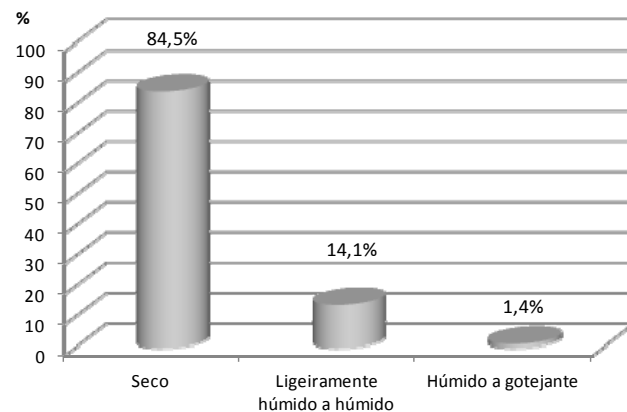


Figura 78. Presença de água nas descontinuidades do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto). (Dados recolhidos no período entre 9 de Outubro e 6 de Novembro de 2010)

Neste sector existem 31 descontinuidades ligeiramente húmidas a húmidas que surgem tendencialmente segundo a direcção N170°-180°E. As superfícies de descontinuidade que se revelam húmidas a gotejantes enquadram-se na direcção N50°-60°E, como se pode visualizar através da figura 79.

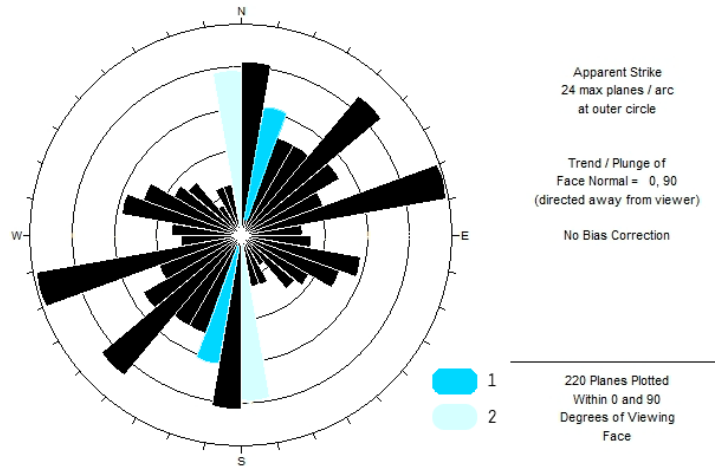


Figura 79. Diagramas de rosetas relativo ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=220) do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto), com indicação das direcções das descontinuidades que se apresentam húmidas a gotejantes (1) e ligeiramente húmidas a húmidas (2). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.

Através dos diagramas geológico-estruturais presentes na figura 80, foram identificadas quatro famílias principais de descontinuidades:

- a família N10°W-20°E, com inclinações que variam entre 55°-75°, tanto para o quadrante NW como para o quadrante SW;
- a família N40°-50°E, com inclinações que oscilam entre 65°-85° para o quadrante SE;
- a família N70°-80°E, com inclinações predominantemente no intervalo entre 60°-70° para o quadrante SE;
- a família N100°-120°E, com inclinações que oscilam entre 80°-90°, tanto para o quadrante NE como para o quadrante SW.

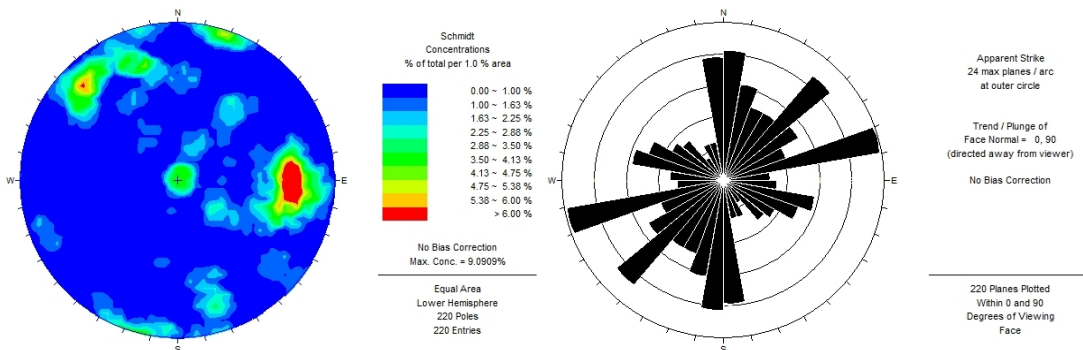


Figura 80. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=220) do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Nesta secção foram medidas 32 descontinuidades sub-horizontais, das quais 23 correspondem a diaclases e 9 a estruturas do tipo falha (figura 81). As direcções preferenciais destas superfícies de descontinuidade são N110°-120°E e N20°-30°E com inclinação 0°-30°NE. Não se verifica a presença de água nas falhas e apenas 6 diaclases se encontram húmidas.

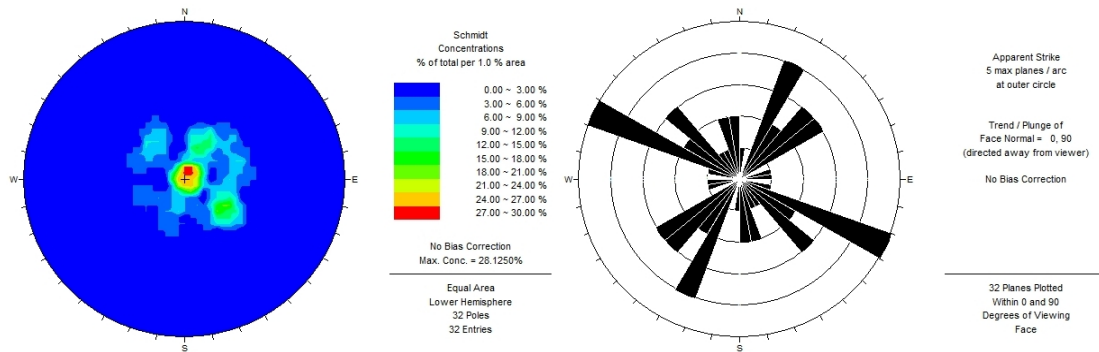


Figura 81. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades sub-horizontais (n=32) do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A figura 82 compila o mapa do Sector 3 e os respectivos diagramas de contorno estrutural e de rosetas.

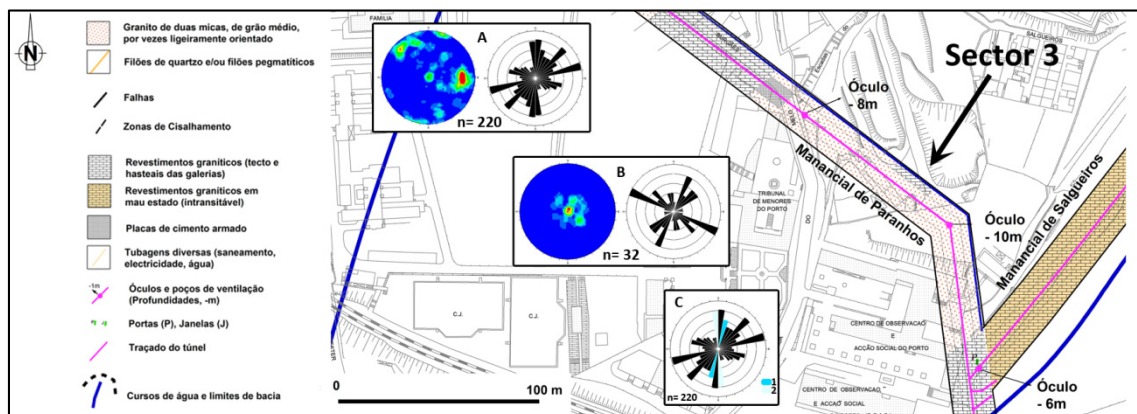


Figura 82. Sector 3 do túnel de Arca d'Água (Carvalhido-Burgães) com diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico de: A – Total de descontinuidades (n= 220) presentes no maciço; B – descontinuidades sub-horizontais (n=32) presentes no maciço; C - descontinuidades (n=220) do maciço com indicação das direcções das descontinuidades que se apresentam húmidas a gotejantes (1) e ligeiramente húmidas a húmidas (2). Nas restantes direcções (a negro) não há circulação de água.

A resistência à compressão uniaxial avaliada por intermédio do ensaio esclerométrico (martelo de Schmidt, tipo L) teve origem nos dados obtidos a partir de 32 estações geomecânicas distribuídas pelo Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães, as quais correspondem a dados recolhidos na

superfície de descontinuidades (anexo 6). Para o total de estações geomecânicas verifica-se que, examinando a figura 83, a grande maioria das superfícies analisadas (ca. 91%) apresenta uma resistência média (S_3) com um valor médio de 34,2 MPa e aproximadamente 9% mostra uma classe de resistência elevada (S_2) com valor médio de 84,7 MPa. Globalmente, o valor médio de resistência à compressão mensurado situa-se nos 39,0 MPa.

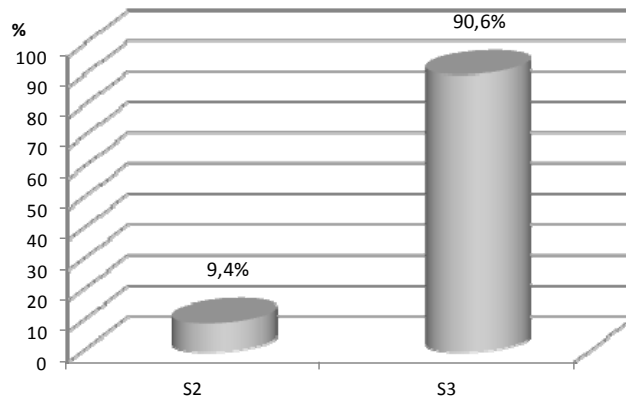


Figura 83. Resistência à compressão uniaxial do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Toda a água presente neste sector surge nos primeiros 25 m analisados, onde também se regista ocorrência de biofilme preto, musgo e escorrências de origem desconhecida (cor preta a acastanhada). Nos restantes cerca de 132 m a galeria encontra-se completamente seca. Verifica-se um emparedamento em cimento no hastear esquerdo da galeria com uma extensão de aproximadamente 18 m que se prolonga dos 48,7 aos 66,65 m.

Nos quadros 31 e 32 apresenta-se a síntese e o resumo estatístico dos parâmetros geológico-geotécnicos registados no Sector 3. São apontados na figura 84 alguns aspectos do Sector 3.

Quadro 31. Síntese dos parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Galeria Carvalhido – Burgães	Sector 3 (n= 220)				
Litologia	Granito				
Grau de Alteração	W₁₋₂	W₃	W₄₋₅		
	55,0%	28,2%	16,8%		
Grau de Fracturação					
<i>Tipo de descontinuidade</i>	Falha	Diaclase			
	14,6%	85,5%			
<i>Famílias principais</i>	N 10° W - N20° E; 55° - 75° NW/SW				
	N 40° - 50° E; 65° - 85° SE				
	N 70° - 80° E; 60° - 70° SE				
	N 100° - 120° E; 80° - 90° NE/SW				
Abertura	Fe.	Ab.	M.A.		
	74,6%	23,2%	2,3%		
Espaçamento	F₁₋₂	F₃	F₄₋₅		
	45,0%	33,6%	21,4%		
Continuidade	M.P.C	P.C.	M.C.		
	11,4%	88,6%	-		
Terminação	R	D	O		
	33,2%	20,0%	46,8%		
Curvatura	C₁₋₂	C₃	C₄₋₅		
	68,6%	27,3%	4,1%		
Rugosidade	R₁₋₂	R₃	R₄₋₅		
	56,4%	42,7%	0,9%		
Enchimento	Qua.	Arg.	Ro./R.	Evan.	Nen.
	-	13,1%	5,5%	-	81,4%
Presença de água	Seco	Lig.H.	H.a G.		Flu. A.
	84,6%	14,1%	1,4%		-
Resistência à compressão uniaxial	S₁	S₂	S₃	S₄	S₅
<i>Descontinuidades</i>	-	9,4%	90,6%	-	-
<i>Maciço</i>	-	-	-	-	-

Fe.	Fechada	M.P.C.	Muito pouco contínua	C ₁₋₂	Planas a ligeiramente curvas
Ab.	Aberta	P.C.	Pouco contínua	C ₃	Curvas
M.A.	Muito aberta	M.C.	Medianamente contínua	C ₄₋₅	Muito curvas
F ₁₋₂	Muito afastadas a afastadas	R	Rocha	R ₁₋₂	Lisas a algo rugosas
F ₃	Medianamente afastadas	D	Descontinuidade	R ₃	Medianamente rugosas
F ₄₋₅	Próximas a muito próximas	O	Obscura	R ₄₋₅	Muito rugosas
Qua.	Quartzo	S ₁	Resistência muito elevada	Lig.H.	Ligeiramente húmido a húmido
Arg.	Argila	S ₂	Resistência elevada	H.a G.	Húmido a gotejante
Ro./R.	Rocha/Rocha esmagada	S ₃	Resistência média	Flu. A.	Fluxo abundante
Evan.	Evansite	S ₄	Resistência baixa		
Nen.	Nenhum	S ₅	Resistência muito baixa		

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

Quadro 32. Resumo estatístico dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Sector 3 (n= 220)																										
	Abertura (mm)			Continuidade (m)					Resistência à compressão uniaxial - Descontinuidades (MPa)					Resistência à compressão uniaxial – Material-rocha (MPa)					Resistência à compressão uniaxial - Global (MPa)					Grau de Fracturação – “Fracture Intercept” (cm)		
	Valor médio global			Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global					Valor médio global		
Média	1,4			1,7					39,0					NA					39,0					67,9		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
	0,1	3,2	25,0	0,8	1,8	-	-	-	-	84,7	34,2	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	-	84,7	34,2	-	-	122,2	33,6	9,8
Moda	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	0,09			1,9					NA					NA					NA					20,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,09	1,0	20,0	0,6	1,9	-	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70,0	20,0	10,0
Mediana	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	0,09			1,8					35,1					NA					35,1					46,5		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,09	2,0	20,0	0,8	1,8	-	-	-	-	76,5	33,9	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	-	76,5	33,9	-	-	100,0	30,0	10,0	
Mínimo	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	0,09			0,5					21,8					NA					21,8					2,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,09	0,5	20,0	0,5	1,0	-	-	-	-	66,5	21,8	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	-	66,5	21,8	-	-	60,0	20,0	2,0	
Máximo	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	35,0			2,9					111,2					NA					111,2					365,0		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,1	10,0	35,0	0,96	2,9	-	-	-	-	111,2	53,6	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	-	111,2	53,6	-	-	365,0	58,0	17,0	
Desvio Padrão	Global			Global					Global					Global					Global					Global		
	4,3			0,4					17,8					NA					17,8					66,8		
	Fechada	Aberta	Muito Aberta	<1	1-3	3-10	10-20	>20	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅
0,0	3,3	7,1	0,2	0,3	-	-	-	-	23,4	8,1	-	-	NA	NA	NA	NA	NA	-	23,4	8,1	-	-	66,6	11,3	4,2	

NA - Não Aplicável

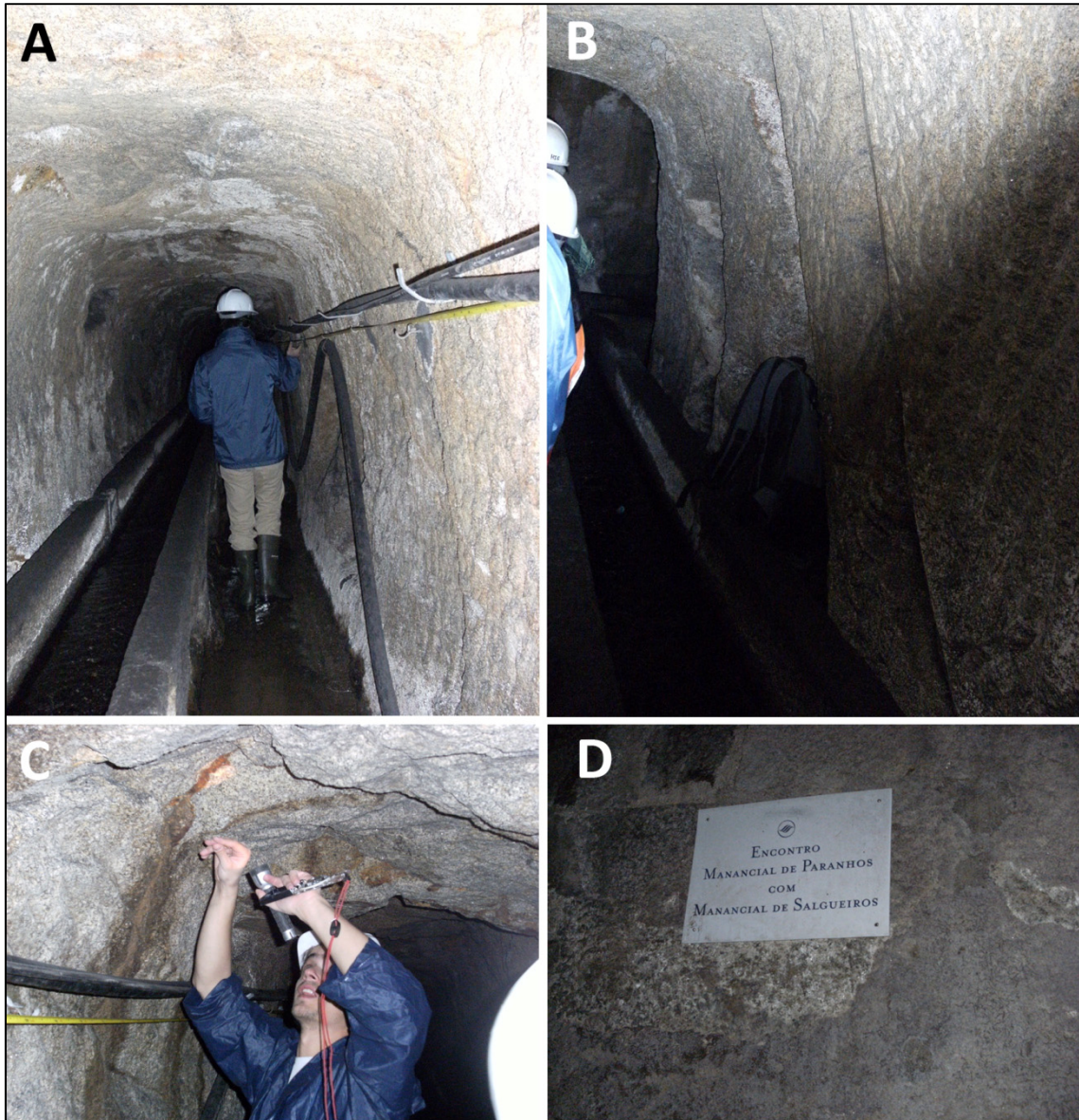


Figura 84. Diferentes aspectos presentes no Sector 3 da galeria Carvalho – Burgães (Paranhos, Porto): A – Aspecto global do maciço; B – Grupo de descontinuidades sub-verticais pertencentes à mesma família; C – Presença de óxidos de ferro de cor avermelhada no tecto da galeria; D – Placa com indicação do encontro do Manancial de Paranhos com o Manancial de Salgueiros.

Proposta de um zonamento geotécnico – geomecânico: análise preliminar

No Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto) foram definidas quatro zonas geotécnicas. O quadro 33 descreve sucintamente cada uma das unidades estabelecidas e a figura 85 indica uma proposta de base para o zonamento geotécnico-geomecânico do maciço subterrâneo ao longo deste sector.

Quadro 33. Descrição geral das zonas geotécnicas do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Zonas Geotécnicas	Litologia	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Resistência à compressão uniaxial (S)/ σ_c (MPa)	Grau de fracturação (F)/cm
ZG1_S3		0 – 10,1	W ₃	S ₂ a S ₃ / 70-55	F ₃ a F ₁₋₂ / 40-55
ZG2_S3	Granito, por vezes com filonetes de quartzo e aplito-pegmatíticos	10,1 – 19,4	W ₁₋₂	S ₃ / 30-45	F ₄₋₅ a F ₃ / 15-35
ZG3_S3		19,4 – 97,2 134,2 – 149,5	W ₁₋₂	S ₃ / 35-50	F ₁₋₂ a F ₃ / 65-80
ZG4_S3		97,2 – 134,2	W ₄₋₅	S ₄ a S ₃ / 20-35	F ₁₋₂ a F ₃ / 70-85

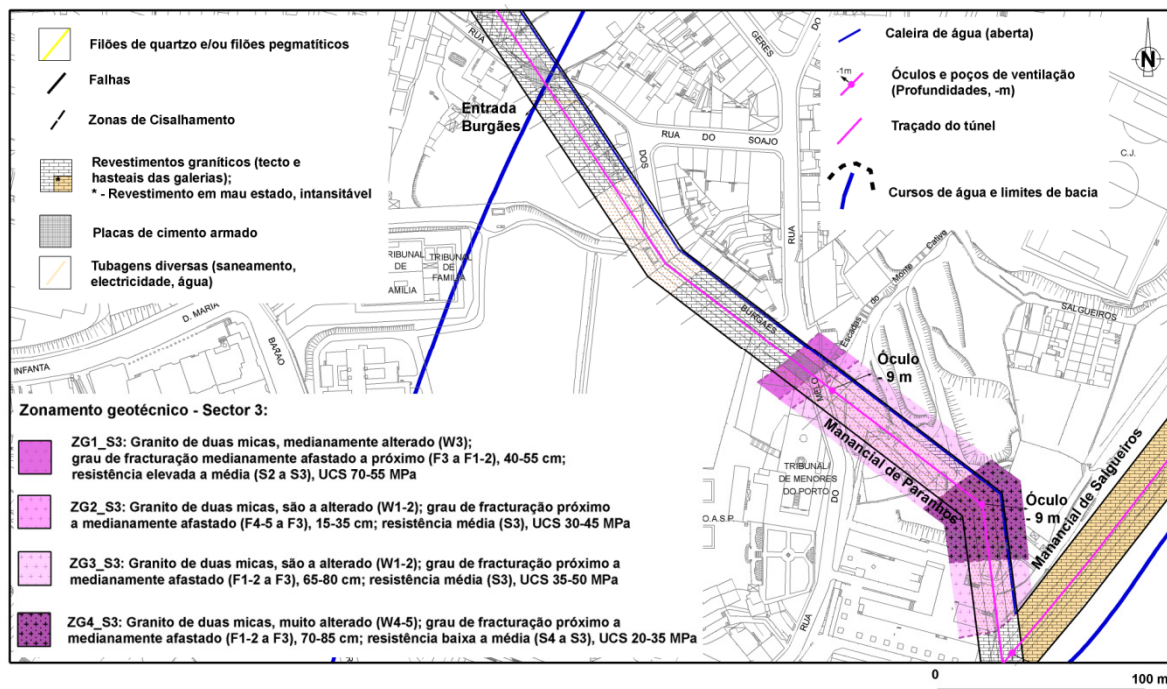


Figura 85. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

A zona geotécnica 1 (ZG1_S3) tem uma extensão de 10,1 m onde foram registadas 22 descontinuidades e realizadas 3 estações geomecânicas. O maciço encontra-se tendencialmente (ca. 64%) medianamente alterado (W_3). A resistência à compressão uniaxial apresenta um valor médio de 58 MPa, com valores compreendidos fundamentalmente entre 70 e 55 MPa. As descontinuidades apresentam-se medianamente afastadas (F_3) a afastadas (F_{1-2}), com um valor médio de 45,7 cm.

A unidade geotécnica 2 (ZG2_S3), estende-se por 9,3 m com 29 descontinuidades estudadas e apenas 2 estações geomecânicas. Diferencia-se das demais por ter sido classificada quanto ao grau de alteração como são a pouco alterada (W_{1-2}) e por apresentar um grau de fracturação tendencialmente próximo (F_{4-5}) a medianamente afastado (F_3) com valor médio de afastamento de 32,2 cm. A resistência à compressão uniaxial assume um valor médio de 34,2 MPa, sendo que ambas as estações testadas indicaram resistência média (S_3).

Com dois troços que perfazem uma extensão de 93,1 m, foi definida a zona geotécnica 3 (ZG3_S3), que é a mais representativa deste sector. Esta unidade geotécnica contempla 123 descontinuidades e 22 estações geomecânicas. O maciço surge com maior representatividade (ca. 69%) como são a pouco alterado (W_{1-2}). Predomina a classe de resistência média (S_3), com um valor médio de 39 MPa e valores num intervalo de, nomeadamente, 35 a 50 MPa. Quanto ao afastamento, as descontinuidades surgem maioritariamente (ca. 51%) afastadas (F_{1-2}), surgindo também (ca. 30%) medianamente afastadas (F_3), sendo o espaçamento médio de 75,7 cm.

A zona geotécnica 4 (ZG4_S3) cobre uma extensão de 37 m, com 46 descontinuidades registadas e 5 estações geomecânicas realizadas. Nesta zona, o maciço encontra-se maioritariamente (ca. 74%) alterado a decomposto (W_{4-5}). A totalidade das estações geomecânicas corresponde a uma classe de resistência baixa a média (S_4 a S_3) com valor médio de 31 MPa. O espaçamento médio entre descontinuidades situa-se nos 80,4 cm, classificando-se como afastadas (F_{1-2}) a medianamente afastadas (F_3).

Os principais parâmetros geológicos e geomecânicos das diferentes zonas geotécnicas são visíveis no quadro 34.

O quadro 35 foca as diferentes características das descontinuidades presentes em cada unidade geotécnica. Verifica-se que na zona ZG2_S3 não existem descontinuidades do tipo falha nem descontinuidades tendencialmente sub-horizontais.

Quadro 34. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos do zonamento geotécnico do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

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)	
Litologia	Granito				
Grau de alteração	<p>W_{1,2} 27,3%</p> <p>W₃ 63,6%</p> <p>W_{4,5} 9,1%</p>	<p>W_{1,2} 96,6%</p> <p>W₃ 3,4%</p> <p>W_{4,5} 0,0%</p>	<p>W_{1,2} 69,1%</p> <p>W₃ 30,1%</p> <p>W_{4,5} 0,8%</p>	<p>W_{1,2} 4,3%</p> <p>W₃ 21,7%</p> <p>W_{4,5} 74,0%</p>	
Resistência à compressão uniaxial	<p>S₁ 66,7%</p> <p>S₂ 33,3%</p> <p>S₃ 0,0%</p> <p>Valor médio= 58,0 MPa</p>	<p>S₁ 0,0%</p> <p>S₂ 100,0%</p> <p>S₃ 0,0%</p> <p>Valor médio= 34,2 MPa</p>	<p>S₁ 4,5%</p> <p>S₂ 95,5%</p> <p>S₃ 0,0%</p> <p>Valor médio= 38,7 MPa</p>	<p>S₁ 0,0%</p> <p>S₂ 100,0%</p> <p>S₃ 0,0%</p> <p>Valor médio= 30,8 MPa</p>	
Grau de Fracturação – "Fracture Intercept"	<p>F_{1,2} 31,8%</p> <p>F₃ 50,0%</p> <p>F_{4,5} 18,2%</p> <p>Valor médio= 45,7 cm</p>	<p>F_{1,2} 13,8%</p> <p>F₃ 31,0%</p> <p>F_{4,5} 55,2%</p> <p>Valor médio= 32,2 cm</p>	<p>F_{1,2} 51,2%</p> <p>F₃ 30,1%</p> <p>F_{4,5} 18,7%</p> <p>Valor médio= 75,7 cm</p>	<p>F_{1,2} 54,3%</p> <p>F₃ 37,0%</p> <p>F_{4,5} 8,7%</p> <p>Valor médio= 80,4 cm</p>	
W _{1,2}	Sã a pouco alterada	S ₂	Resistência elevada	F _{1,2}	Muito afastadas a afastadas
W ₃	Medianamente alterada	S ₃	Resistência média	F ₃	Medianamente afastadas
W _{4,5}	Muito alterada a decomposta	S ₄	Resistência baixa	F _{4,5}	Próximas a muito próximas

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

Quadro 35. Síntese dos parâmetros das descontinuidades do zonamento geotécnico do Sector 3 da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

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%	Fe. 100,0% Ab. 0,0% M.A. 0,0%	Fe. 74,0% Ab. 19,5% M.A. 6,5%	Fe. 65,2% Ab. 28,3% M.A. 6,5%
	Valor médio (mm)= 1,3 mm	Valor médio (mm)= 0,09 mm	Valor médio (mm)= 1,4 mm	Valor médio (mm)= 2,1 mm
Continuidade	M.P.C. 22,7% P.C. 77,3% M.C. 0,0%	M.P.C. 13,8% P.C. 86,2% M.C. 0,0%	M.P.C. 6,5% P.C. 93,5% M.C. 0,0%	M.P.C. 17,4% P.C. 82,6% M.C. 0,0%
	Valor médio (m)= 1,6 m	Valor médio (m)= 1,6 m	Valor médio (m)= 1,7 m	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 59,1% C ₂ 27,3% C ₃₋₅ 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 50,0% R ₂ 50,0% R ₃ 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).

4. Conclusões

4. Conclusões

Neste trabalho, apresentam-se e discutem-se os principais resultados da aplicação e importância de uma base de dados extensa, uniformizada e robusta para apoiar o refinamento da caracterização geológico – geotécnica e geomecânica do maciço granítico da galeria Carvalhido – Burgães (Paranhos, Porto).

Este estudo envolveu, inicialmente, a compilação dos levantamentos geológico-geotécnicos e geomecânicos sistemáticos, recorrendo à aplicação da técnica de amostragem linear em superfícies expostas de descontinuidades em maciços rochosos, realizados no período entre 2005 e 2011, ao longo de cerca de 1200 m. A existência de duas secções de 200 m e 259 m, revestidas a alvenaria e/ou cimento, implicou a divisão da galeria em 3 sectores com as seguintes extensões: 140 m para o Sector 1, 473 m para o Sector 2 e 157 m para o Sector 3.

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

- a) O aperfeiçoamento do conhecimento das unidades geológicas locais: i) granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado e ii) filões e/ou filonetes de quartzo leitoso, com possanças que não ultrapassam os 30cm que se encontram, em regra, muito tectonizados. A análise dos dados do grau de alteração permite constatar que o material-rocha ocorre normalmente medianamente alterado (W_3); contudo, em alguns locais do traçado subterrâneo o granitóide encontra-se, tanto são a pouco alterado (W_{1-2}), como muito a completamente alterado (W_{4-5}) e, mesmo, caulinizado;
- b) O reconhecimento de uma rede de fracturação intensa, com uma atitude predominantemente NW-SE e NE-SW: relativamente ao Sector 1, a fracturação dominante é $N100^\circ-130^\circ E$; $80^\circ-90^\circ NE/SW$ e $N0^\circ-20^\circ E$; $40^\circ-60^\circ NW$. Foram ainda identificadas superfícies sub-horizontais $N120^\circ-130^\circ E$, sendo que cerca de 30% destas correspondem a superfícies do tipo falha; para o Sector 2, a família NW-SE apresenta uma atitude semelhante à do Sector 1 enquanto que a família NE-SW é tendencialmente sub-vertical. As descontinuidades sub-horizontais apresentam orientações predominantemente NW-SE; quanto ao Sector 3, dominam as descontinuidades $N10^\circ W-20^\circ E$; $55^\circ-75^\circ NW/SW$, $N40^\circ-50^\circ E$; $65^\circ-85^\circ SE$ e $N70^\circ-80^\circ E$; $60^\circ-70^\circ SE$. À semelhança dos sectores anteriores, as descontinuidades sub-horizontais apresentam uma direcção preferencialmente $N110^\circ-120^\circ E$;
- c) A revisão da cartografia geotécnica dos subterrâneos do Porto (maciço de Arca d'Água – sector Carvalhido–Burgães, Paranhos, Porto);

- d) O refinamento e complemento do zonamento geotécnico, estabelecido em Fernandes (2005), o qual pretende delinear a qualidade geotécnica do maciço, no qual se redefiniram as principais unidades geotécnicas locais, resultado do cruzamento e síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica;
- e) O zonamento foi sistematizado para cada um dos sectores nas seguintes unidades:

Sector 1

i) ZG1_S1: Granito de duas micas, medianamente alterado a pouco alterado (W_3 a W_{1-2}), com grau de fracturação afastado a medianamente afastado (F_{1-2} a F_3 , 75-50 cm) e resistência média (S_3 , UCS 40-55 MPa); ii) ZG2_S1: Granito de duas micas, medianamente alterado (W_3), com grau de fracturação medianamente afastado (F_3 , 40-50 cm) e resistência elevada (S_2 , UCS 85-100 MPa); iii) ZG3_S1: Granito de duas micas, medianamente alterado (W_3), com grau de fracturação medianamente afastado a próximo (F_3 a F_{1-2} , 35-65 cm) e resistência média a baixa (S_3 a S_4 , UCS 30-15 MPa).

Sector 2

i) ZG1_S2: Granito de duas micas, medianamente alterado (W_3), com grau de fracturação medianamente afastado (F_3 , 40-55 cm) e resistência média (S_3 , UCS 40-55 MPa); ii) ZG2_S2: Granito de duas micas, são a alterado (W_{1-2}), com grau de fracturação próximo (F_{1-2} , 65-80 cm) e resistência elevada a média (S_2 a S_3 , UCS 70-55 MPa); iii) ZG3_S2: Granito de duas micas, medianamente alterado a muito alterado (W_3 a W_{4-5}), com grau de fracturação medianamente afastado a próximo (F_3 a F_{1-2} , 50-65 cm) e resistência baixa a média (S_4 a S_3 , UCS 15-30 MPa);

Sector 3

i) ZG1_S3: Granito de duas micas, medianamente alterado (W_3), com grau de fracturação medianamente afastado a próximo (F_3 a F_{1-2} , 40-55 cm) e resistência elevada a média (S_2 a S_3 , UCS 70-55 MPa); ii) ZG2_S3: Granito de duas micas, são a alterado (W_{1-2}), com grau de fracturação próximo a medianamente afastado (F_{4-5} a F_3 , 15-35 cm) e resistência média (S_3 , UCS 30-45 MPa); iii) ZG3_S3: Granito de duas micas, são a alterado (W_{1-2}), com grau de fracturação próximo a medianamente afastado (F_{1-2} a F_3 , 65-80 cm) e resistência média (S_3 , UCS 35-50 MPa); iv) ZG4_S3: Granito de duas micas, muito alterado (W_{4-5}), com grau de fracturação próximo a medianamente afastado (F_{1-2} a F_3 , 70-85 cm) e resistência baixa a média (S_4 a S_3 , UCS 20-35 MPa).

Como trabalhos futuros poder-se-ão apontar os seguintes:

- a) A continuação e o refinamento da cartografia geotécnica e estudo da compartimentação do maciço rochoso, nomeadamente do restante traçado do manancial de Paranhos e do manancial de Salgueiros;
- b) O cruzamento integrado da cartografia geotécnica de superfície, numa base SIG, da 2ª edição (2003) da Carta Geotécnica do Porto (à escala 1/10.000) com novos desenvolvimentos deste trabalho, à escala 1/1.000, quer em termos geológicos quer em termos geotécnicos e geomecânicos;
- c) O desenvolvimento de uma análise estatística dos dados mais robusta;
- d) A realização de ensaios laboratoriais, nomeadamente, ensaio de carga pontual (PLT) e ensaio de resistência à flexão sob carga centrada.
- e) A aplicação das classificações geomecânicas (nomeadamente, a RMR adaptada a galerias mineiras, a Q, a GSI e a HP), com o objectivo de avaliar a qualidade e competência geomecânica do maciço rochoso de Paranhos;
- f) A 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 geoestatísticos e programas de cálculo automático (*e.g.*, Phase² 2.8, RockSupport 3.0 e Unwedge 3.0 da *RocScience: software tools for rock and soil*);
- g) A definição de cenários de susceptibilidade e de vulnerabilidade aos riscos geológicos e geotécnicos materializados por mapas temáticos de avaliação de perigosidade.

5. Referências bibliográficas

5. Referências bibliográficas

- Afonso M.J.C., 2011. Hidrogeologia e hidrogeoquímica da região litoral urbana do Porto, entre Vila do Conde e Vila Nova de Gaia (NW de Portugal): implicações geoambientais. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. 382 pp. + 8 Anexos (tese de doutoramento).
- Afonso, M. J.; Chaminé, H. I.; Gomes, A.; Teixeira, J.; Araújo, M. A.; Fonseca, P. E.; Carvalho, J. M.; Marques, J. M.; Marques da Silva, M. A. & Rocha, F. T., 2004. Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente, Santiago de Compostela*, 4: 101-115.
- Afonso M.J., 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., Chaminé H.I., Moreira P.F. & Marques J.M., 2010. The role of hydrogeotechnical mapping on the sustainable management of urban groundwater. In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorrán T.J. & Massey C.I., eds., *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active, Auckland, New Zealand*. CRC Press: Taylor & Francis Group. pp. 1595-1602. (on CD-Rom insert, IAEG Paper 187) ISBN 978-0-415-60034-7
- Aires-Barros, L., 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, INIC, Lisboa, 384 pp.
- 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 two-micas 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.
- Amorim, A. A. & Pinto, J. N., 2001. Porto d'agoa. Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento do Porto, SMAS, Porto, 197 pp.
- Araújo, M. A., 1991. Evolução geomorfológica da Plataforma litoral da região do Porto. Universidade do Porto, 534 pp. + vol. Anexos [87 pp.] (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 by 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.
- Babendererde, S.; Hoek, E.; Marinos, P. & Cardoso, A.S., 2004. Characterization of granite and the underground construction in metro do Porto, Portugal, In: Viana da Fonseca A Mayne PW (eds.): *Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Millpress, Rotterdam, 1: 39-48.
- Basu, A & Aydin, A., 2004. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41: 1211-1214.

- 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. Ciênc. Univ., Porto 4: 171-175.
- Begonha, A., 2001. Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto. Coleção monografias FEUP Edições, Porto, 2: 1-445. (Tese de doutoramento).
- Begonha, A. & Sequeira Braga, M. A., 2002. Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena*, 49: 57-76
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications. Wiley, New York. 251 pp.
- Bourbon e Noronha, T., 1885. As águas do Porto. Dissertação inaugural apresentada à escola Médico-Cirúrgica do Porto, Typ. Occidental, Porto. 89 pp.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 2004. Rock mechanics for underground mining, 3rd Edition, George Allen & Unwin, London. 527 pp.
- Cabral, J., 1995. Neotectónica em Portugal Continental Mem. Inst. Geol. Min., Lisboa, 31: 1-256.
- Cargill, J. S. & Shakoor, A., 1990. Evaluation 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 Pôrto: 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.
- Carvalho, J.M., 1996. Mineral water exploration and exploitation at the portuguese hercynian massif. *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- Carvalho, J.M., 2000. As águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no Norte de Portugal, In: Samper, J. *et al.*, (eds.). Jornadas Hispano-Lusas sobre "Las águas subterrâneas en el Noroeste de la Península Ibérica". Textos de las jornadas, mesa redonda y comunicaciones. A Corunã, AIH-GE & APRH, Publicaciones ITGE, Madrid, pp. 237-259.
- Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I. & Plasencia, N., 2003. Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional, In: Portugal Ferreira, M. (coord.). A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: Recursos Geológicos e formação. Volume de homenagem ao Prof. Doutor Cotelo Neiva. Imprensa da Universidade, Série Investigação, Coimbra, 2: 245-264.
- Carvalho, J.M. & Chaminé, H.I., 2004. O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Ver. Uni. Aveiro*, 16: 13-31.
- Carteado Mena, J., 1908. Contribuição para o estudo da Hygiene do Porto: analyse sanitaria 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.
- 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.
- Chaminé, H. I., 2000. Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho –Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. Universidade do Porto, 497 pp., 2 anexos, 3 mapas. (Tese de doutoramento).
- 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.; Dias, A. G. & Dinis da Gama, C., 2001. Estudo geológico e geomecânico do maciço granítico de Lamoso, Paços de Ferreira, NW de Portugal *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 15: 79-92.

- Chaminé, H. I.; Gama Pereira, L. C.; Fonseca, P. E.; Noronha, F. & Lemos de Sousa, M. J., 2003. Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Coimbra–Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena, (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 28: 37-78.
- Chaminé, H.I.; Afonso, M.J.; Robalo, P.M.; 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.
- 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.
- Conde, L.E.N., 1983. Mapa de fracturas de Portugal (Memória descritiva). EDP, Electricidade de Portugal, 118 pp., 4 mapas na escala 1/500 000. (Relatório não publicado).
- 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.
- Day, M.J., 1980. Rock hardness: field assessment and geomorphic importance. *Professional Geographer* 32, 72-81.
- Day, M.J. & Goudie, A.S., 1977. Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer. *BGRG Technical Bulletin*, 18: 19-29.
- Dearman, W.R. & Eyles, N., 1982. An engineering geological map of the soils and rocks of United Kingdom. *Bulletin IAEG*, 25: 3-18.
- 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: C. Fairhurst, (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.
- 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, 1984: 91-101.
- 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.
- 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-espço urbano*. Projecto de final de licenciatura, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 88 pp. + anexos.
- Ferrer, M. & González de Vallejo, L. [eds.], 1999. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Publicaciones ITGE, Madrid. 81 pp, 41 fotografías.
- Fonseca, L., 2008. *Interacção e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas*. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP.
- 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 higiene 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.
- Freitas, L., Devy-Vareta, N., Gomes, A., Santos Silva, R., Afonso, M.J, Chaminé, H.I., 2010. *Águas subterrâneas na área urbana do Porto (Séculos XIX-XXI): potencialidades da análise geográficas de uma*

- Base de Dados Espacial. In: Actas do VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, Universidade de Coimbra, 26-30 de Maio de 2010, 13 pp.
- 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. & Chaminé H.I., 2009. Geotecnia aplicada ao desmonte de maciços rochosos através de uma perfuração alinhada. *Tecnologia e Vida, Revista da Secção Regional do Norte da ANET, Porto*, volume 4, pp. 14-17.
- 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, Ordem Engenheiros*, 124 (Jul/Agos): 76-80.
- Gomes, A. 2008. Evolução geomorfológica da plataforma litoral entre Espinho e Águeda. Departamento de Geografia, FLUP, Universidade do Porto (Tese de Doutoramento). 337 pp.
- González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. [coords.], 2002. *Ingeniería geológica* Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- 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 Society*, 28 (3): 207-242.
- Goudie, A. S., 2006. The Schmidt hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*, 30 (6): 703-718.
- Griffiths, J. S., 2002. Mapping in Engineering Geology. Key Issues in Earth Sciences. The Geological Society of London, 1, 287 pp.
- Hoek, E., 2007. Practical rock engineering. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.
- Hudson, J. A., 1989. Rock mechanics principles in engineering practice. Butterworths. Ciria. London.
- Hudson, J. A. & Priest, S. D., 1983. Discontinuity frequency in rock masses *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 20: 73-89.
- IAEG – International Association for Engineering Geology, 1976. Guide pour la préparation des cartes géotechniques. Sciences de la Terre. Les Presses de l'Unesco, Paris. 79 pp.
- IAEG – International Association for Engineering Geology and the Environment, 1981a. Recommend symbols for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24: 227-234.
- IAEG – International Association for Engineering Geology and the Environment, 1981b. Rock and soils for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24: 235-274.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics*, 15 (6): 319-368.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.
- I.S.R.M. – 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: 981-994.
- Kahraman, S.; Fener, M. & Gunaydin, O., 2002. Predicting the Schmidt hammer values of in-situ intact rock from core sample values *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39: 395-399.
- 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.
- 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.

- Lamas, P. C., 1993. Estudos Geotécnicos para obras de Engenharia-Ensaios de rochas em laboratório. Cursos de sensibilização, CEGSA, Santo André, 29 e 30 de Março de 1993, pp.17.
- Lisle, R. J. & Leyshon, P. R. 2004. Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers. Second Edition, Cambridge University Press. 112 pp.
- 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.
- Martín-Serrano, A., 1994. Macizo Hispérico Septentrional, In: M. Gutiérrez Elorza (ed.). Geomorfologia de España, Editorial Rueda, Madrid, pp. 25-62.
- Martins R., Moreira P., Santos P., Neto E., Pereira A. M., Teixeira J., Vieira A. & Chaminé H. I., 2006. A técnica de amostragem linear aplicada a estudos de compartimentação de maciços rochosos no Norte de Portugal. In: Actas do 10^o Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Univ. Nova de Lisboa, Maio de 2006. Volume 1, pp. 255-264.
- 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.
- Noronha, F. & Leterrier, J., 2000. Complexo metamórfico da Foz do Douro (Porto). Geoquímica e Geocronologia, Separata de Rev. Real Academia Galega de Ciências. Santiago de Compostela, vol. XIX, 19: 21-42.
- 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, London. 408 pp.
- Peacock, D. C. P., 2006. Predicting Variability in joint frequencies from boreholes. J. Structural Geology, 28: 353-361.
- 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.
- Pedrosa, M. Y. [coord.], 1998. Carta Hidrogeológica de Portugal. Instituto Geológico Mineiro, Lisboa, na escala 1/200 000, folha 1.
- Pedrosa, M. Y. [coord.], 1999. Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica de Portugal. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, na escala 1/200 000, folha 1, 70 pp. (+ 1mapa).
- Pinto de Jesus, A., 2001. Génese e Evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): um modelo. Universidade do Porto, Vol. Texto, 272 pp., Vol. Atlas: 71 pp. (Tese de doutoramento).
- Price, D. G. & de Freitas, M. H., 2009. Engineering geology: principles and practice. Springer, 450 pp.
- Priest, S. D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering. Kluwer Academic Publishers, 473 pp.
- 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.
- Ramos, L. (2008). Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. Tese de Mestrado.
- Rebelo da Costa, A., 1788. Descrição topográfica e histórica da cidade do Porto: 3^a edição (Fac-smile), Editora Frenesi, Lisboa. 273 p.
- Ribeiro, A.; Quesada, C. & Dallmeyer, R.D., 1990. Geodynamic Evolution of the Iberian Massif In: Dallmeyer, R.D. & Martínez – Garcia, E., Eds, Pré – Mesozoic Geology of Ibéria. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. pp. 397-410.
- Ribeiro, A.; Munhá, J.; Dias, R.; Mateus, A.; Pereira, E.; Ribeiro, L.; Fonseca, P.E.; Araújo, A.; Oliveira, J.T.; Romão, J.; Chaminé, H.I.; Coke, C. & Pedro J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. Tectonics, 26, TC6009, 24 pp.
- Rocha, M., 1981. Mecânica das Rochas. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.

- Rosas da Silva D. J. (1935) Depósitos de evansite nos granitos do Pôrto. Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências do Pôrto. In: Anais da Faculdade de Ciências do Pôrto, XIX(III), 8 pp.
- Rosas da Silva, D.J. 1936. Granitos do Porto. Relatório das provas de agregação, Universidade do Porto, 63 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.
- Schmidt, E., 1951. A non-destructive concrete tester. *Concrete*, 59 (8): 34-35.
- Singhal, B. B. & Gupta, R. P., 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer-Verlag GmbH, 408 pp.
- Sumner, P. D. & Nel, W. N., 2002. The effect of rock moisture on Schmidt hammer rebound: tests on rock samples from Marion Island and South Africa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 1137-1142.
- Teixeira, J., Gomes, A., Chaminé, H. I. & Rocha, F. T., 2007. Geomorfologia e morfotectónica de relevos quartzíticos: a megaestrutura de Caldas de S. Jorge - Águeda, NW de Portugal, *Xeográfica: revista de xeografia, territorio e medio ambiente*. Universidade de Santiago de Compostela, Espanha, 7: 107-133 p.
- UNESCO, 1976. Engineering geological maps: a guide to their preparation. UNESCO Press, Paris.
- Yassar, E. & Erdogan, Y., 2004. Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 71: 281-88.
- Zuquette, L. V. & Gandolfi, N., 2004. Cartografia geotécnica. Oficina de textos, Brasil, 198 pp.

Endereços electrónicos

<http://www.proceq.com/> (consulta em Junho de 2011)

<http://www.humboldtmg.com/> (consulta em Junho de 2011)

Anexos

**Anexo I - Ficha de levantamento geológico
e geomecânico relativo ao Sector 1
(ver CD-ROM em anexo)**

**Anexo II - Ficha de levantamento geomecânico relativa ao Sector 1
(ver CD-ROM em anexo)**

**Anexo III - Ficha de levantamento geológico
e geomecânico relativo ao Sector 2
(ver CD-ROM em anexo)**

Anexo IV - Ficha de levantamento geomecânico relativa ao Sector 2
(ver CD-ROM em anexo)

**Anexo V - Ficha de levantamento geológico
e geomecânico relativo ao Sector 3
(ver CD-ROM em anexo)**

Anexo VI - Ficha de levantamento geomecânico relativa ao Sector 3