



Estudo da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras (Mire de Tibães): cartografia geotécnica e avaliação geomecânica

RICARDO FILIPE COMENDA PEREIRA

Julho de 2012



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Estudo da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras (Mire de Tibães): cartografia geotécnica e avaliação geomecânica

Ricardo Filipe Comenda Pereira



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Estudo da antiga mina de volfrâmio das Azeleiras (Mire de Tibães): cartografia geotécnica e avaliação geomecânica

Ricardo Filipe Comenda Pereira

Nº 1030968

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

Dedico esta tese a meus pais.

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração e o apoio de diversas pessoas, às quais não queria deixar de expressar uma palavra de agradecimento pela importância que assumiram no desenvolvimento do mesmo.

Assim sendo, aqui estão os respectivos agradecimentos:

- Aos meus orientadores, Professor Doutor Helder Chaminé (ISEP) e Professora Doutora Maria José Afonso (ISEP), agradeço os constantes ensinamentos, acompanhamento e apoio no trabalho de campo subterrâneo e de gabinete prestados durante esta caminhada. Agradeço, igualmente, a partilha exaustiva da bibliografia necessária e os excelentes meios e condições de trabalho que me proporcionaram no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP);
- Ao Professor Helder I. Chaminé (ISEP), meu orientador, um agradecimento especial pela confiança que depositou ao desafiar-me a realizar o presente trabalho e as sugestões criativas sempre partilhadas para um direcionamento cabal da investigação e pela constante exigência no meu empenhamento para uma superação diária para me tornar um melhor geo-profissional;
- À Professora Maria José Afonso (ISEP), minha co-orientadora, pela paciência que teve desde o primeiro dia, pela total disponibilidade e dedicação ao longo deste percurso. Agradeço todos os conhecimentos e experiência transmitidas, contribuindo de forma decisiva para o resultado final deste trabalho, assim como a amizade e boa disposição partilhada ao longo destes meses;
- À Direção do Mosteiro de Tibães (Direção Regional de Cultura do Norte, DRCN) pela possibilidade proporcionada na realização do trabalho de campo na antiga Mina das Azeleiras, no âmbito do protocolo entre o Mosteiro de Tibães (DRCN) e o LABCARGA|ISEP. Um agradecimento especial à Arquitecta Maria João Dias Costa pelo permanente zelo e apoio. Grato, igualmente, ao Sr. Paulo Coelho pelo apoio durante a fase de transporte de amostras e a todos os funcionários pelo gentil atendimento;
- Ao Centro de Investigação GEOBIOTEC|UA (grupo de georrecursos, geotecnia e geomateriais) da Universidade de Aveiro, através do seu coordenador Professor Doutor Fernando Rocha, na execução da análise geoquímica de duas amostras de granitóides;
- Um agradecimento especial aos diretores dos Laboratórios do ISEP, Professor H. I. Chaminé do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP) e do

Professor J. A. Fernandes do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), por todas as facilidades na utilização dos recursos laboratoriais. Este trabalho enquadra-se no espírito 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” referente ao quadro do reequipamento do LABCARGA – IPP-ISEP|PADInv’2007/08;

- Aos colegas e amigos Mestre Patrícia Sousa Moreira, Eng.º Rogério F. Pinheiro, Mestre Rui Santos Silva e Eng.ª Marlene Madureira, o meu sincero agradecimento, tanto pelo apoio durante os trabalhos subterrâneos como em algumas tarefas de gabinete;
- À Mestre Liliana Freitas e Doutor José Teixeira (LABCARGA|ISEP) pela disponibilidade e apoio na cartografia SIG e pelo companheirismo sempre demonstrado;
- À Raquel, pela infinita paciência, incentivo e compreensão durante toda a caminhada...;
- Por fim, aos meus Pais pelo carinho, apoio e pelos diversos sacrifícios suportados e a quem devo tudo aquilo que sou... obrigado !

Palavras-chave

Geotecnia mineira, Antigas minas, Técnica de amostragem linear, Zonamento geotécnico, Classificações geomecânicas (RMR, Q-system, GSI, HP-value).

Resumo

Este trabalho tem como objetivo sublinhar a importância de um estudo geológico-geotécnico para apoiar a cartografia geotécnica do maciço rochoso subterrâneo da antiga mina de volfrâmio das Aveliras (Mosteiro de Tibães, Braga). Foi realizado um trabalho de campo sistemático, ao longo de uma rede de galerias subterrâneas com uma extensão aproximada de 155 m. Estas galerias são constituídas, principalmente, por rochas metassedimentares, embora aflorem rochas graníticas num pequeno trecho de uma das galerias. A técnica de amostragem linear de descontinuidades aplicada ao grau de compartimentação do maciço rochoso esteve na base de todos os dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos. Além disso, foram coligidos e integrados os dados de campanhas de campo anteriores, realizadas entre 2006 e 2011. Foram igualmente descritos os métodos de avaliação dos dados de campo, bem como a análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos. O zonamento geotécnico do maciço rochoso das Aveliras foi desenvolvido tendo em conta o comportamento do maciço rochoso *in situ*, e foi apoiado por ensaios laboratoriais de resistência do material-rocha através do Ensaio de Carga Pontual. Apresenta-se uma proposta preliminar de zonamento geomecânico com o objectivo de apoiar o projeto de engenharia de maciços rochosos.

Keywords

Mining geotechnics, Old mines, Scanline sampling technique, Geotechnical zoning, Rock mass classifications (RMR, Q-system, GSI, HP-value).

Abstract

This work aims to emphasize the importance of a geological and geotechnical study in order to support the geotechnical mapping of the underground rockmass of the old Aveleiras wolfram mine (Monastery of Tibães, Braga). A systematic fieldwork and the improvement of the main geomechanical constraints were done along an underground network extension of approximately 195 m. These galleries are mainly constituted by metasedimentary rocks, although granitic rocks also outcrop in a small length. Scanline sampling technique of discontinuities applied to the rock block size was on the basis of all the geological, geotechnical and geomechanical data. Furthermore, data from previous fieldwork campaigns, between 2006 and 2011, were collected and integrated. In addition, the evaluation methods of field data and the statistical characterization of their geological-geotechnical parameters are also described. The geotechnical zoning of the Aveleiras rock mass was developed taking into account in situ rock mass behavior. This zoning took advantage of laboratory rock mass strength evaluated with Point Load testing procedures. A preliminary proposal of geomechanical zoning was made in order to support the rock engineering design.

Índice

Capítulo 1 - Introdução Geral.....	3
1.1. Enquadramento.....	3
1.2. Objetivos.....	4
Capítulo 2 - Caracterização Geológico-Geotécnica e Geomecânica de Maciços Rochosos.....	7
2.1. Considerações iniciais.....	7
2.2. Maciços rochosos: caracterização geológica e geotécnica.....	8
2.2.1. Reconhecimento geológico.....	8
2.2.2. Cartografia das superfícies expostas do maciço.....	9
2.2.3. Parâmetros dos maciços rochosos.....	11
2.2.4. Parâmetros geológicos-geotécnicos das descontinuidades.....	18
2.2.4.1. Atitude geológica.....	19
2.2.4.2. Grau de fracturação e espaçamento.....	20
2.2.4.3. Continuidade ou Persistência.....	23
2.2.4.4. Rugosidade.....	24
2.2.4.5. Resistência da parede das descontinuidades.....	25
2.2.4.6. Abertura.....	27
2.2.4.7. Enchimento ou Preenchimento.....	28
2.2.4.8. Percolação de água.....	29
2.3. Técnica de amostragem linear aplicada às superfícies de descontinuidade.....	30
2.3.1. Traços gerais da técnica.....	30
2.4. Técnicas “in situ”.....	35
2.4.1. Esclerómetro Portátil.....	35
2.5. Técnicas Laboratoriais.....	37
2.5.1. Ensaio de Carga Pontual (“Point Load Test”).....	37
2.6. Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos: um breve apontamento.....	41
2.6.1. Classificação RMR – Rock Mass Rating.....	45
2.6.2. Sistema Q – Rock Tunneling Quality Index.....	48
2.6.3. Sistema GSI – Geological Strength Index.....	53
2.6.4. Hydro-Potential (HP) Value.....	56
2.7. Zonamento geotécnico vs. zonamento geomecânico.....	58
Capítulo 3. Estudo da compartimentação geotécnica do maciço rochoso da rede de galerias da Mina de Tibães.....	63
3.1. Enquadramento geotectónico e geomorfológico regional.....	63
3.2. Geologia e geotecnia subterrânea da Mina das Azeleiras.....	66
3.3. Parâmetros geológico-geotécnicos.....	75
3.4. Zonamento geotécnico.....	89
3.4.1. Galeria 2.....	89
3.4.2. Zonamento geotécnico revisitado: Galeria 1 – Tramo 1.....	103

3.4.3.	Zonamento geotécnico: Galeria 1 – Tramo 2	119
3.4.4.	Zonamento geotécnico: breve síntese.....	125
3.4.5.	Avaliação geomecânica exploratória	127
Capítulo 4 - Conclusões e perspectivas futuras		135
Referências Bibliográficas		139
Anexos.....		

Índice de Figuras

Figura 1. Compartimentação do maciço rochoso. (a) tamanho de blocos; (b) fraturação do maciço; (c) número e orientação das famílias de descontinuidades; (d) grau de alteração.....	12
Figura 2. Representação do número de famílias mediante blocos-diagrama (adaptado de Scesi & Gattinoni, 2009).....	13
Figura 3. Exemplos de formas geométricas relacionadas com o padrão da fraturação (adaptado de Palmström, 1995).	14
Figura 4. Procedimento de medição e exemplo do cálculo do RQD (adaptado de Deere et al., 1967; Hoek, 2007).....	16
Figura 5. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades	19
Figura 6. Avaliação da atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado de http://www.esri.com/news/arcuser/1099/webdata7.html).....	19
Figura 7. Representação esquemática de dados geoestruturais. (a) diagrama de rosetas; (b) principais famílias em bloco-diagrama (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	20
Figura 8. Medição do espaçamento entre descontinuidades a partir de uma face exposta do maciço (adaptado de ISRM, 1978, 1981; Scesi & Gattinoni, 2009).....	21
Figura 9. Exemplos de famílias de descontinuidades com espaçamentos diferentes.....	22
Figura 10. Blocos-diagrama esquemáticos indicativos da continuidade de várias famílias de descontinuidades (adaptado da ISRM, 1978).	23
Figura 11. Classes dos perfis de rugosidade (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).	24
Figura 12. Diagramas que ilustram as definições de abertura de uma descontinuidade (adaptado da ISRM, 1978).....	27
Figura 13. Diferentes aspectos da abertura de descontinuidades.	28
Figura 14. Exemplos da percolação de água nas descontinuidades do maciço rochoso.	30
Figura 15. A técnica de amostragem linear (adaptado de Hudson & Harrison, 1997).....	31
Figura 16. Levantamento de descontinuidades pela técnica da amostragem linear.	31
Figura 17. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com aplicação da técnica de amostragem linear.....	33
Figura 18. Exemplo de aplicação das bases de dados <i>ScanGeoData/BGD</i> para maciços rochosos fracturados (adaptado de Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011 a,b).	34
Figura 19. Aspectos do martelo de Schmidt durante a realização de um ensaio “in situ”.	35
Figura 20. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2011).	36
Figura 21. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo, com recurso ao martelo de Schmidt.	37
Figura 22. Equipamento ELE Point Apparatus (modelo 77 - 0110) para execução do ensaio de carga pontual (cortesia do LGMC ISEP).	38
Figura 23. Representação esquemática do equipamento para a execução do ensaio de carga pontual (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).....	38
Figura 24. Ficha-tipo de registo das medições dos provetes submetidos ao ensaio de carga pontual.	39
Figura 25. Relação de dimensões dos provetes (amostras regulares e irregulares) a satisfazer nos ensaios de carga pontual (adaptado da ISRM, 1985).	40
Figura 26. Representação gráfica da obtenção do valor de RMR (adaptado de Miranda et al., 2006).	45
Figura 27. Ábaco do tempo de auto-suporte (horas) versus RMR, baseado em casos históricos segundo Bieniawski (1989). A conversão de RMR em Q segundo Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).....	47
Figura 28. Visão esquemática dos parâmetros que são considerados no Q-system (adaptado de Barton, 2007).....	48
Figura 29. Ábaco com correlações do Q-system com o RMR, baseado nas propostas de Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).....	52
Figura 30. Ábaco para estimativa do GSI baseado na inspeção das condições geológicas (Marinos & Hoek, 2000; Marinos & Hoek, 2001), cuja versão sofreu actualizações em termos de quantificação da compartimentação (parâmetros F, Jc, Vb) propostas por Cai et al., (2004).	55
Figura 31. Ábaco para estimativa do GSI para rochas heterogêneas metassedimentares (adaptado de Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2001; Marinos et al., 2006).....	55

Figura 32. Esboço geológico regional de Braga (adaptado e simplificado de Ferreira et al., 2000).	63
Figura 33. Esboço geológico da região de Mire de Tibães (revisto e reinterpretado de Ferreira et al., 2000; adaptado de LABCARGA, 2007/2008; Lopes, 2012).	65
Figura 34. Esboço hipsométrico da área de Braga, vale do rio Cávado (adaptado de LABCARGA, 2007/2008; Lopes, 2012).	66
Figura 35. Planta do traçado subterrâneo da mina das Aveleiras, Tibães: galerias, travessas e poços de ventilação (adaptado e actualizado de Personda, 1994) – in: Lopes (2012).	67
Figura 36. (A) entrada principal da Mina das Aveleiras; (B) aspecto da galeria G2, com a <i>scanline</i> ; (C) realização do ensaio esclerométrico; (D) exemplo de material-rocha recolhido para o ensaio PLT.	69
Figura 37. Exemplo de compilação e uniformização dos dados geológico-geomecânicos de campo com recurso às bases de dados SCANGEODATA BGD e SCHMIDTDATA UCS (adaptado de Galiza et al., 2011 a,b).	70
Figura 38. Grau de alteração do maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	76
Figura 39. Tipos de descontinuidade presentes no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	77
Figura 40. Diagramas de rosetas e de contorno estrutural relativos à unidade das corneanas/aplitóides (n=138) no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	77
Figura 41. Diagramas de rosetas e de contorno estrutural relativos à unidade granítica (n=58) no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	78
Figura 42. Abertura das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	78
Figura 43. Grau de fracturação das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	79
Figura 44. Continuidade das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	79
Figura 45. Terminação das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	80
Figura 46. Curvatura das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	80
Figura 47. Rugosidade das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	81
Figura 48. Preenchimento das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	81
Figura 49. Presença de água nas descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	82
Figura 50. Aspectos das realizações do ensaio esclerométrico “ <i>in situ</i> ”.	82
Figura 51. Avaliação da resistência à compressão do maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	83
Figura 52. (A) Amostra de granito moscovítico (TB-G2.2); (B) Ensaio esclerométrico sobre a amostra TB-G2.2; (C) Amostra de aplitóide (TB-G2.1); (D) Ensaio esclerométrico sobre a amostra TB-G2.1.	84
Figura 53. Avaliação da resistência à compressão uniaxial mediante o ensaio esclerométrico, em laboratório, na matriz rochosa para as amostras da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	84
Figura 54. (A) Máquina de corte, LGMC ISEP; (B) Preparação laboratorial das amostras na máquina de corte, LGMC ISEP; (C) Amostras de aplitóide (TB-G2.1); (D) Amostras de granito (TB-G2.2); (E) e (F) Amostras TB-G2.1 e TB-G2.2 devidamente numeradas.	86
Figura 55. (A) Execução do ensaio de carga pontual; (B) Exemplo de ensaio inválido.	86
Figura 56. Proposta de zonamento geotécnico do maciço subterrâneo da Galeria 2 da Mina das Aveleiras.	101
Figura 57. Proposta de zonamento geotécnico revisitado do maciço subterrâneo do Tramo 1 da Galeria 1 da Mina das Aveleiras (revisto e adaptado de LABCARGA,	117
Figura 58. Proposta de zonamento geotécnico do maciço subterrâneo do Tramo 2 da Galeria 1 da Mina das Aveleiras.	123
Figura 59. Síntese cartográfica da rede de galerias estudadas da Mina das Aveleiras, com a representação do zonamento geotécnico e uma tentativa de correlação (cf. Quadro 49, para processo de legenda.	126
Figura 60. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG3 da Galeria 2 e ZG4A da Galeria 1 no ábaco de Marinos & Hoek (2001).	130
Figura 61. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG4 e ZG5 da Galeria 2 no ábaco de Hoek & Marinos (2000), com actualizações de Cai et al. (2004).	130

Índice de quadros

Quadro 1. Classificação dos maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades	12
Quadro 2. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico de descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978).....	15
Quadro 3. Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (adaptado de ISRM, 1978).....	15
Quadro 4. Classificação dos maciços rochosos com base no RQD (adaptado de Deere, 1967).....	17
Quadro 5. Evolução do grau de alteração do maciço rochoso (adaptado da ISRM, 1981).	18
Quadro 6. Terminologia para caracterizar os maciços rochosos em função do grau de fracturação e/ou do espaçamento entre descontinuidades (adaptado de ISRM 1978, 1981).....	22
Quadro 7. Descrição da continuidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).....	24
Quadro 8. Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).	25
Quadro 9. Terminologia para caracterização do estado de resistência (adaptado da ISRM, 1978).	26
Quadro 10. Descrição do grau de alteração meteórica (adaptado da ISRM, 1978).	27
Quadro 11. Caracterização da abertura das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1978, 1981).....	28
Quadro 12. Descrição da presença de água nas descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).....	30
Quadro 13. Classificação da resistência à compressão simples (adaptado da ISRM, 1981).	37
Quadro 14. Principais classificações geomecânicas utilizadas em obras subterrâneas.	44
Quadro 15. Classificação geomecânica RMR: descrição e pesos atribuídos (adaptado de Bieniawski, 1989). (A) resistência; (B) RQD; (C) espaçamento das descontinuidades; (D) condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; (E) Orientações para a classificação pormenorizada das condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; (F) percolação de água; (G) Descrição da orientação das descontinuidades; (H) orientação das descontinuidades.	46
Quadro 16. Classes do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais e tipos de escavação e sugestão das condições de suporte associados (adaptado de Bieniawski, 1989).	47
Quadro 17. Classificação geomecânica Q-system: descrição e pesos (adaptada de Barton et al., 1974). (A) Índice de qualidade da rocha, RQD (adaptado de Deere et al., 1967); (B) Número de famílias de descontinuidades, J_n ; (C) Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r ; (D) Índice de alteração das descontinuidades, J_a	49
Quadro 18. Tipos de escavação e valores de ESR – “ <i>Excavation Support Ratio</i> ” (adaptado de Barton et al., 1974).....	51
Quadro 19. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek, 1994, 2007).	54
Quadro 20. Índice hidrogeomecânico HP-value: descrição e pesos (adaptado de Gates, 1995, 1997, 2003). (A) parâmetro Jaf (adaptado de Hencher, 1987; Harp & Noble, 1993; in Gates, 1997, 2003); (B) parâmetro J_k (adaptado de Freeze & Cherry, 1979; in Gates, 1997, 2003); (C) parâmetro J_w (adaptado de Barton et al., 1974; Hencher, 1987; in Gates, 1997, 2003); (D) Número de famílias de descontinuidades, J_n (adaptado de Barton et al., 1974); (E) Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r (adaptado de Barton et al., 1974).	57
Quadro 21. Análise geoquímica de 6 amostras características das zonas geotécnicas da Mina das Aveleiras (Tibães). As análises das amostras TB-G1.1. a TB-G1.4 foram compiladas de Lopes (2012) e as análises geoquímicas das amostras TB-G2.1 e TB-G2.2 foram realizadas no âmbito desta dissertação.	74
Quadro 22. Análise geoquímica de duas amostras do granito de Gondizalves (Ferreira et al., 2000) bem como da amostra TB-G2.2 do granito moscovítico aflorante na galeria G2 (Mina das Aveleiras).	75
Quadro 23. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos para a unidade das corneanas/aplíticas no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	87
Quadro 24. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos para a unidade do granito no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).	88
Quadro 25. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG1.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).	90
Quadro 26. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG1.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).	91
Quadro 27. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG2 da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).	92

Quadro 28. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG2.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).....	93
Quadro 29. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG3.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).	94
Quadro 30. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG3.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).....	95
Quadro 31. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).	96
Quadro 32. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).....	97
Quadro 33. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG5.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).	98
Quadro 34. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG5.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).....	99
Quadro 35. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG1. (G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	104
Quadro 36. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG1.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	105
Quadro 37. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG2.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	106
Quadro 38. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG2.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).	107
Quadro 39. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG3A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	108
Quadro 40. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG3A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).	109
Quadro 41. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG3B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	110
Quadro 42. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG3B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).	111
Quadro 43. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	112
Quadro 44. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).	113
Quadro 45. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).....	114
Quadro 46. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).	115
Quadro 47. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4A. (G1) da Mina das Aveleiras (Tibães).....	120
Quadro 48. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4A. (G1) da Mina das Aveleiras (Tibães).	121
Quadro 49. Síntese das características geotécnicas da Mina das Aveleiras (Tibães), cf. Figura 59.....	125
Quadro 50. Síntese das características do maciço rochoso da Galeria 2 e da Galeria 1 – Tramo 2 da Mina das Aveleiras, de acordo com as classificações geomecânicas e os índices geomecânicos aplicados.	128
Quadro 51. Síntese das características do maciço rochoso da Galeria 1 – Tramo 1 da Mina das Aveleiras, de acordo com as classificações e os índices geológico-geomecânicos aplicados (adaptado de LABCARGA, 2007/2008; Neto, 2007).	132

Lista de Anexos (ver em CD-ROM)

Anexo I – Fichas de levantamento geológico-geomecânico (Galeria 2 e Galeria 1, Tramo 2 - Mina das Aveleiras)

Anexo II – Fichas de levantamento geomecânico (Galeria 2 e Galeria 1, Tramo 2 - Mina das Aveleiras)

Anexo III – Fichas de ensaios esclerométricos (Blocos graníticos e aplitóides)

Anexo VI – Fichas do Ensaio de Carga Pontual (Provetes graníticos e aplitóides)

Anexo V – Fichas de levantamento geológico-geomecânico (Galeria 1, Tramo 1 – Mina das Aveleiras); Revisto e actualizado LABCARGA 2007/2008

Capítulo 1 - Introdução Geral

Capítulo 1 - Introdução Geral

1.1. Enquadramento

Esta dissertação 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 tese enquadra-se no espírito das colaborações e projectos financiados, nomeadamente: 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”*; LABCARGA|ISEP-IPP|PADInv’2007/08); e GEOAVELEIRAS (*“Mina das Aveliras: estudo geológico-geotécnico e projecto da estrutura de reforço e de protecção”*; IPPAR|Direcção do Mosteiro de S. Martinho de Tibães–LABCARGA|ISEP’2006/2008).

O presente estudo complementa os estudos de LABCARGA (2007/08), de Neto (2007) e de Ramos (2009), enquadrando-se, em parte, nos trabalhos de investigação de doutoramento de Lopes (2012) e na investigação de mestrado, em desenvolvimento, de Rogério Pinheiro (in prep.).

Este trabalho desenvolveu-se em três fases complementares: uma primeira fase, ligada à recolha exaustiva de informação bibliográfica da especialidade e histórica do sector estudado; uma segunda etapa, referente ao trabalho de campo, com a recolha dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos, bem como de amostras de material-rocha para a realização laboratorial do ensaio de carga pontual (PLT); e uma terceira fase, relativa ao trabalho de gabinete, em que se procedeu à análise, processamento e interpretação dos dados para elaborar o zonamento geotécnico do maciço rochoso e uma avaliação geomecânica exploratória.

As campanhas de terreno e os ensaios laboratoriais tiveram o apoio incondicional dos colegas Eng. Rogério Pinheiro, Eng.ª Marlene Madureira, Eng.ª Patrícia Moreira e Eng. Rui Santos Silva, sob coordenação do Professor Helder I. Chaminé e da Professora Maria José Afonso.

A presente dissertação foi organizada da seguinte forma: primeiro, uma caracterização geológico-geotécnica e geomecânica dos maciços rochosos; seguidamente, uma breve síntese das principais classificações geomecânicas; e, por último, o estudo geotécnico e geomecânico da rede de galerias da antiga mina de volfrâmio das Aveliras (Mosteiro de Tibães).

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo geral refinar a caracterização das condicionantes geológico-geotécnicas e geomecânicas do maciço rochoso da mina das Azeleiras (Mosteiro de Tibães), contribuindo assim para um melhor conhecimento da rede de galerias que constitui esta antiga mina. Por outro lado, pretende também contribuir para a caracterização da compartimentação de maciços rochosos fraturados em áreas de antigas explorações mineiras, com vista à sua reabilitação.

Desta forma, recorreu-se à rede de galerias subterrâneas da Mina das Azeleiras, tendo-se dividido o trabalho em várias fases com os seguintes objectivos:

- Reconhecimento cartográfico geral da geologia mineira de Tibães;
- Caracterização geológico-geotécnica das superfícies expostas do maciço granítico numa das galerias da Mina de Tibães (Galeria 2), com recurso à técnica da amostragem linear para a avaliação do grau de compartimentação e dos parâmetros geológico-geotécnicos segundo as recomendações propostas pelas ISRM (1978, 1981, 2007), GSE (1995), CFCFF (1996);
- Avaliação da resistência geomecânica das superfícies de descontinuidade e do material-rocha presentes ao longo das galerias subterrâneas através da realização de ensaios geomecânicos *in situ* com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L), bem como recorrendo à realização, em laboratório, do ensaio de carga pontual (PLT);
- Análise estatística básica dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos;
- Definição de uma cartografia do zonamento geotécnico do maciço rochoso;
- Avaliação geomecânica preliminar do maciço rochoso, através da aplicação das classificações geomecânicas RMR e Q-system e dos índices geotécnicos e hidrogeomecânicos GSI e HP-value.

Capítulo 2 - Caracterização Geológico- Geotécnica e Geomecânica de Maciços Rochosos

Capítulo 2 - Caracterização Geológico-Geotécnica e Geomecânica de Maciços Rochosos

2.1. Considerações iniciais

Um maciço rochoso, do ponto de vista da geoengenharia, pode ser definido como um conjunto de blocos rochosos, justapostos e articulados. O material que forma os blocos é composto pela matriz rochosa e as superfícies estruturais que a limitam, as discontinuidades, constitui a denominada rocha intacta. Os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, e a sua complexidade resulta da evolução geológica a que foram submetidos (Rocha, 1981; Brady & Brown, 2004; Hoek, 2007).

Deve-se ter claro que um mesmo maciço rochoso pode reagir de maneira diferenciada às solicitações que lhe são impostas. Estas, por sua vez, dependem do tipo, das dimensões e particularidades da obra de engenharia. Assim, para a previsão do comportamento do maciço, dever-se-á avaliar as suas características em função da obra a ser implantada.

Como a natureza das características do maciço difere de local para local, função da história geológica da região considerada, é necessário evidenciar os atributos do meio rochoso que, isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento face às solicitações impostas pela obra em questão (Dinis da Gama, 1995). Tais atributos são evidenciados a partir da caracterização geológico-geotécnica e avaliação geológico-geomecânica do maciço rochoso.

O planeamento e a execução dos estudos geológico-geotécnicos, destinados ao projeto e à construção de estruturas de engenharia, integram-se com as fases do empreendimento. As investigações geotécnicas, elemento essencial na aquisição dos dados para os estudos de caracterização, proporcionam dados em níveis de progressivo detalhe. Assim, uma correta caracterização geotécnica apoiada num levantamento geológico adequado é determinante para o sucesso de um dado projeto de geoengenharia (Rocha, 1981). Nesta perspectiva são fulcrais os estudos de geociências de engenharia (em particular, de cartografia, de geologia de engenharia, de hidrogeologia, de geofísica, etc.) e ensaios geomecânicos “in situ” e laboratoriais para apoiar uma correcta abordagem geotécnica integrativa (Galiza et al., 2011a,b).

De um modo geral, as características mais visadas no estudo do comportamento dos maciços rochosos dizem respeito à deformabilidade, à resistência, à permeabilidade (em especial, no caso de, obras hidráulicas e certas obras de escavação), e ao estado de tensões naturais (sobretudo, no caso de obras subterrâneas profundas). Tais características compreendem as feições geológicas e os parâmetros geológico-geotécnicos – obtidos através da caracterização

geotécnica do maciço rochoso (ISRM, 1981) – e os índices e propriedades físicas, determinados por meio de ensaios *in situ* e laboratoriais.

2.2. Maciços rochosos: caracterização geológica e geotécnica

2.2.1. Reconhecimento geológico

O reconhecimento geológico é uma das tarefas mais importantes na fase de estudo prévio. O reconhecimento deve-se-á iniciar pela análise e revisão de toda a informação existente relativa à região a estudar, no que respeita a elementos de natureza topográfica e aos constrangimentos de geologia, de geomorfologia, de hidrogeologia, de tectonossismicidade, e dos eventuais estudos geotécnicos prévios. Toda a informação recolhida representa uma mais-valia para o reconhecimento geológico-geotécnico que será posteriormente realizado.

O estudo dessa informação permite realizar trabalhos de investigação com informação de base para o estudo geológico da zona e a previsão da sua evolução geotécnica, em consequência das obras a construir. Em certos casos, a análise dos elementos disponíveis poderá permitir minimizar ou dispensar a realização de alguns tipos de trabalhos complementares (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Após a recolha e análise de todos elementos bibliográficos, há que proceder ao reconhecimento das superfícies expostas do maciço, de modo a obter informações necessárias para avaliar o comportamento geotécnico dos maciços rochosos, planificar as fases de investigação seguintes e interpretar os resultados que se obtenham das mesmas. Em muitas situações, o primeiro reconhecimento de superfície permite já tomar decisões importantes, por exemplo, no que se refere às orientações mais adequadas para as obras em função da estrutura geológica das formações. A finalidade deste reconhecimento geológico permite um melhor conhecimento das unidades geológicas e estruturas geotectónicas, numa escala adequada ao tipo, dimensão da obra e fase de estudo.

De acordo com González de Vallejo & Ferrer (2011), o reconhecimento de campo deve abarcar, entre outros, a seguinte informação:

- Dados geológicos - tipos de materiais, litologia e composição, contactos litológicos, estratificação e estruturas sedimentares; estrutura geológica e contactos tectónicos, grau de fracturação, descontinuidades, zonas de falha 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 (ASTM, 2010); propriedades importantes, entre outras, a 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 (ISRM, 1978, 1981).
 - Dados hidrogeológicos e hidrológicos - níveis freáticos, inspecção de poços, nascentes; localização de aquíferos, materiais permeáveis e impermeáveis, zonas de recarga e drenagem, etc.
 - Instabilidades 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; seleção de locais possíveis para execução de futuras campanhas de prospecção *in situ*.

2.2.2. Cartografia das superfícies expostas do maciço

A cartografia geológico-geotécnica constitui a base para todos os trabalhos de reconhecimento e caracterização, proporcionando o enquadramento necessário para todos os dados obtidos por esses trabalhos. 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” e “mapa de geologia de engenharia” (e.g., IAEG, 1976, 1981a, 1981b; Dearman & Eyles, 1982; Griffiths, 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004).

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. Desta forma, segundo, nomeadamente, González de Vallejo & Ferrer (2011) e Price & de Freitas (2009), um mapa geotécnico deve conter os seguintes aspectos gerais de interesse em engenharia geotécnica:

- 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).

Não obstante todas as informações, elementos e dados gerais a ter em conta na elaboração de um mapa geotécnico, devem existir outras 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, 2007; 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 e das macro- e meso-estruturas; traços geológico-estruturais gerais do maciço; identificação das zonas alteradas e meteorizadas, bem como das espessuras; presença de água, exurgências, etc.; divisão em zonas e descrição geral de cada zona geotécnica.
- Identificação de zonas singulares - zonas com a existência de elementos estruturais não sistemáticos, as quais têm influência nas propriedades e comportamento geomecânico (e.g., falhas, filões, zonas de brecha, cavidades, zonas de fluxo de água, etc.).

A cartografia geotécnica constitui um método em engenharia geotécnica e geociências de engenharia, para representar, informação geológica e geotécnica para fins de planeamento e de ordenamento do território e, bem assim, para o projeto, a construção e a manutenção de obras de engenharia (IAEG, 1981a,b, 2005). Estas representações (i.e. mapas geológico-geotécnicos), incluem dados sobre as características e propriedades do subsolo de uma determinada área para avaliar o seu comportamento e prever problemas futuros.

O conteúdo e pormenor da informação, e do grau de complexidade na realização dos mapas, dependem (González de Vallejo & Ferrer, 2011): i) da escala e extensão; ii) dos objetivos específicos; iii) da importância de diferentes fatores geológico-geotécnicos; iv) das informações disponíveis, dados e representatividade; e v) das técnicas de representação.

Os mapas geotécnicos incluem assim informação descritiva sobre os materiais e processos geológicos, dados quantitativos dos diferentes componentes do meio geológico, propriedades físicas e mecânicas dos materiais e informação interpretativa para a sua aplicação na engenharia geotécnica.

2.2.3. Parâmetros dos maciços rochosos

A descrição e caracterização dos maciços rochosos são tarefas necessárias em todos os estudos geológico-geotécnicos, cujo objetivo seja conhecer as propriedades e as características geotécnicas dos materiais rochosos.

Devido à grande variedade de condições e propriedades, a caracterização dos maciços rochosos pode ser uma tarefa complexa, principalmente quando coexistem materiais rochosos e solos, zonas fraturadas, tectonizadas e/ou meteorizadas. Devem ser incluídos na descrição todos os aspetos e parâmetros observáveis, deduzidos e medidos nos afloramentos.

A caracterização global do maciço rochoso deve realizar-se assim de forma objetiva e individualizada, incluindo o estudo da matriz rochosa, das descontinuidades e de outros aspetos representativos do conjunto que tendem a descrever tanto as suas propriedades intrínsecas como os fatores externos, tais como: o tamanho dos blocos e intensidade da fracturação, o número e orientação das famílias de descontinuidades e o grau de alteração (Figura 1).

A ISRM (1978) recomenda que, dependendo da área em estudo, seja cartografado um universo de, pelo menos, 150 a 200 descontinuidades. O comportamento mecânico do maciço rochoso e os seus mecanismos de rotura estão condicionados, em grande parte, pelo número de famílias de descontinuidades. A intensidade do grau de fracturação e o tamanho dos blocos da matriz rochosa são dados pelo número de famílias de descontinuidades e pelo espaçamento de cada família. Cada uma das famílias fica caracterizada pela sua orientação no espaço, pelas suas propriedades e características dos planos estruturais.

A orientação média de uma família avalia-se mediante a projeção estereográfica ou pela construção de diagramas rosetas realizados com os dados das orientações medidas para cada descontinuidade. Os maciços rochosos podem classificar-se através do número de famílias (Quadro 1).



Figura 1. Compartimentação do maciço rochoso. (a) tamanho de blocos; (b) fraturação do maciço; (c) número e orientação das famílias de descontinuidades; (d) grau de alteração.

Quadro 1. Classificação dos maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades

(adaptado de ISRM, 1978).

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias de descontinuidades
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	Duas famílias de descontinuidades
V	Duas 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 esmagada, com o aspeto idêntico ao de um solo

As famílias de descontinuidades podem ser representadas graficamente mediante a construção de blocos-diagrama, permitindo assim a visualização espacial da sua orientação relativa, do tamanho e forma dos blocos da matriz rochosa (Figura 2).

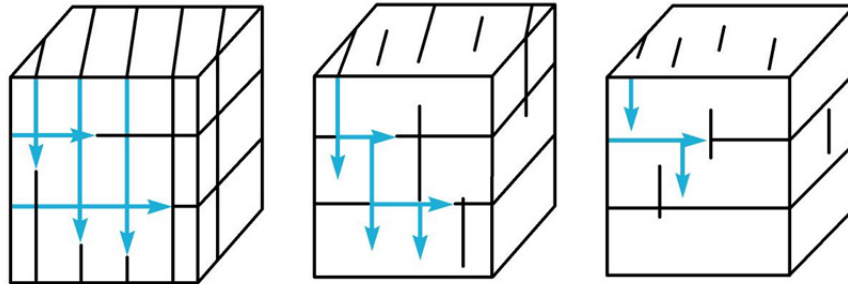


Figura 2. Representação do número de famílias mediante blocos-diagrama (adaptado de Scesi & Gattinoni, 2009).

O tamanho dos blocos que formam o maciço rochoso condiciona de forma definitiva o seu comportamento, as suas propriedades petrofísicas e de deformabilidade. A dimensão e forma dos blocos (Figura 3) são definidas pelo número de famílias das descontinuidades, a sua orientação, o seu espaçamento e persistência (ISRM, 1978). Assim, a forma do bloco unitário é determinada pelo número de famílias e sua respetiva orientação e a dimensão do bloco é definida pelo espaçamento e continuidade das famílias.

A determinação do tamanho do bloco realiza-se, normalmente, das seguintes formas (ISRM, 1978; González de Vallejo & Ferrer, 2011):

- Mediante o índice do tamanho do bloco **lb** ("Block Size Index"), que representa as dimensões médias dos blocos-tipo medidos em afloramento.

$$lb = \frac{(e_1 + e_2 + e_3)}{3}$$

Sendo **e₁**, **e₂** e **e₃** os valores médios dos espaçamentos de três famílias de descontinuidades.

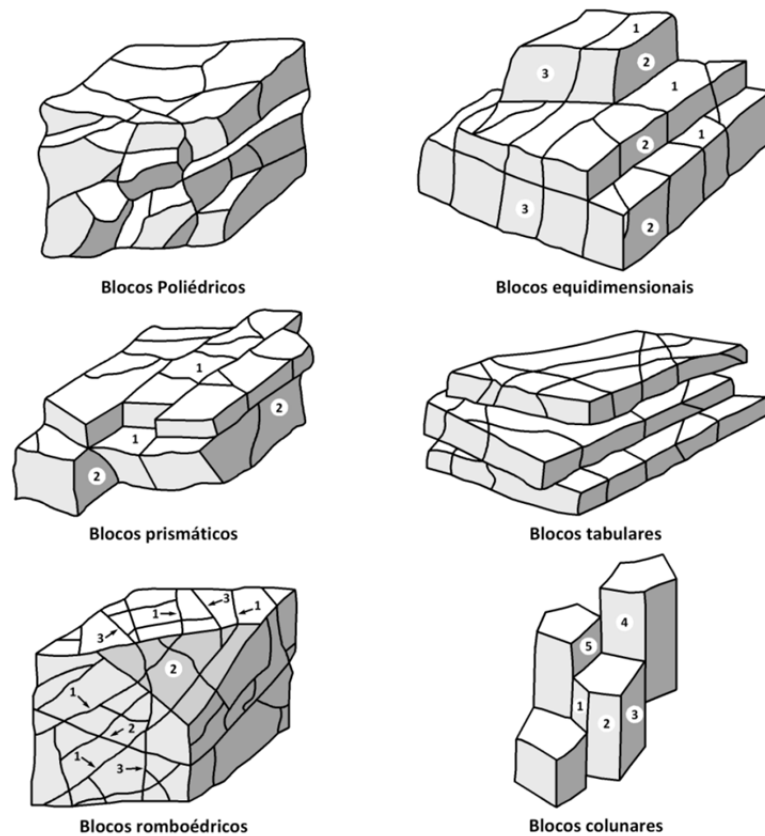


Figura 3. Exemplos de formas geométricas relacionadas com o padrão da fraturação (adaptado de Palmström, 1995).

- Mediante o índice volumétrico de descontinuidades **Jv** (“Volumetric Joint Count”), que representa o número total de descontinuidades que intersejam uma unidade de volume (1 m^3) do maciço rochoso.

$$Jv = \frac{\text{Número de descontinuidades}}{\text{Comprimento médio}}$$

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

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

ou,

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

Os valores de **Jv** relacionam-se com o tamanho dos blocos de acordo com a classificação apresentada no Quadro 2. Valores de $Jv > 60$ correspondem a um maciço rochoso esmagado, com aspecto idêntico a um maciço de solo residual. De referir que o parâmetro **Jv** é utilizado, usualmente, para estudos de compartimentação de maciços medianamente a pouco fraturados (por exemplo, maciços rochosos para rocha ornamental) e menos utilizado para maciços muito fraturados (por exemplo, maciços rochosos para produção de agregados).

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

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

O Quadro 3 apresenta uma classificação do maciço rochoso em função da forma e do tamanho do bloco e da intensidade de fracturação.

Quadro 3. Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (adaptado de 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	Blocos 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

O grau de fracturação expressa-se habitualmente pelo índice RQD (“Rock Quality Designation”; Deere, 1963; Deere et al., 1967; Deere & Deere, 1988). Este índice fornece também correlações com as características que definem a qualidade dos maciços rochosos em termos geotécnicos. O procedimento de medição do RQD é apresentado na Figura 4. Apenas os testemunhos de sondagem maiores ou iguais a 10 cm são incluídos na soma dos fragmentos que foram recuperados. A fórmula que se segue mostra o cálculo do RQD a partir de testemunhos de sondagem:

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\sum L \geq 10\text{cm}}{L_T} \times 100$$

em que,

$\sum L \geq 10 \text{ cm}$ - somatório dos testemunhos não alterados com comprimento igual ou superior a 10 cm

L_T - comprimento total de sondagem

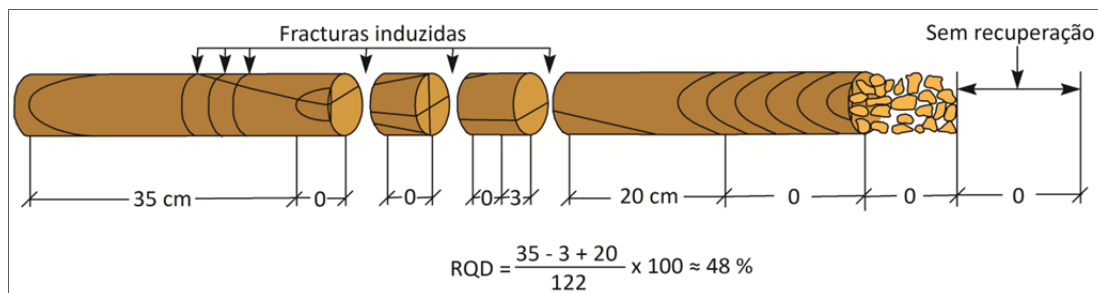


Figura 4. Procedimento de medição e exemplo do cálculo do RQD (adaptado de Deere et al., 1967; Hoek, 2007).

Apesar da sua utilidade prática, este índice não considera aspectos como a orientação, o espaçamento, os preenchimentos e outras condições das discontinuidades, pelo que não é suficiente para descrever as características da fraturação dos maciços rochosos.

Assim, segundo Palmström (1975), o índice RQD pode ser determinado com base numa superfície onde estejam expostas as discontinuidades do maciço, em função do índice volumétrico de discontinuidades (J_v) e de acordo com as seguintes correlações empíricas:

$$\begin{aligned} \text{RQD (\%)} &= 115 - 3,3 * J_v && \text{para } J_v > 4,5 \\ \text{RQD (\%)} &= 100 && \text{para } J_v \leq 4,5 \end{aligned}$$

O valor do índice RQD também se determina a partir da frequência das discontinuidades, λ , mediante a seguinte expressão que proporciona o valor teórico mínimo do RQD (Priest, 1993):

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

onde λ é a inversa do espaçamento médio das discontinuidades.

Em função dos valores do RQD, são apresentadas no Quadro 4 as designações propostas por Deere et al. (1967) para classificar a qualidade dos maciços rochosos.

Quadro 4. Classificação dos maciços rochosos com base no RQD (adaptado de Deere, 1967).

RQD (%)	Qualidade do Maciço Rochoso
0 – 25	Muito fraca
25 – 50	Fraca
50 – 75	Razoável
75 – 90	Boa
90 – 100	Excelente

Relativamente ao grau de alteração, Brady & Brown (2004) sustentam que este 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 da rocha intacta, assim como no ângulo de atrito das superfícies rochosas.

A avaliação do grau de alteração do maciço rochoso realiza-se por observação directa do afloramento e comparação com os índices padrão pré-estabelecidos. Para além de uma análise global da alteração nos maciços rochosos, este parâmetro deve ser verificado nas discontinuidades, pois o grau de alteração modifica características como a rugosidade e a abertura, os quais contribuem para a variação da resistência da matriz rochosa.

A ISRM (1978, 1981) propôs que os graus de alteração a considerar fossem constituídos por 5 termos; no entanto, considera-se, frequentemente, a utilização de uma versão simplificada com 3 termos (Quadro 5).

Quadro 5. Evolução do grau de alteração do maciço rochoso (adaptado da ISRM, 1981).

Grau de alteração	Simbologia		Descrição
São ou não alterado	W_1	W_{1-2}	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa <ul style="list-style-type: none"> • Compacto, com descontinuidades, em geral, fechadas
Ligeiramente alterado	W_2		Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração) <ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidade do tipo fissural
Moderadamente alterado	W_3	W_3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original <ul style="list-style-type: none"> • Descontinuidades abertas • Permeabilidade do tipo fissural
Muito alterado	W_4	W_{4-5}	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável <ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidade • predominantemente, do tipo intersticial
Completamente alterado	W_5^*		Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual

*por vezes, na bibliografia (ISRM, 1978; GSE, 1995) é referenciado o termo W_6 , i.e., desagregação total do maciço podendo ser considerado como um autêntico solo residual.

2.2.4. Parâmetros geológicos-geotécnicos das descontinuidades

Sob a designação de descontinuidade engloba-se qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso, a exemplo de diaclases, falhas, superfícies de estratificação, superfícies de xistosidade, contactos geológicos, filões, etc..

O estudo das descontinuidades de um maciço rochoso é de fundamental importância, pois estas estruturas condicionam, de maneira muito determinante, o comportamento dos maciços rochosos, especialmente em relação à deformabilidade, resistência e permeabilidade, podendo controlar toda a estabilidade do meio rochoso.

A resistência ao corte nas descontinuidades é o aspeto mais importante na determinação da resistência dos maciços rochosos fraturados e para a sua correta avaliação é necessário definir as características e as propriedades das descontinuidades.

A caracterização das descontinuidades dum maciço rochoso deve incluir os seguintes parâmetros geológico-geotécnicos (Figura 5): i) atitude geológica; ii) grau de fracturação (“fracture intercept”) e espaçamento; iii) continuidade; iv) rugosidade, v) resistência das paredes; vi) abertura; vii) enchimento; e viii) percolação de água. Seguidamente são explanados os parâmetros referidos.

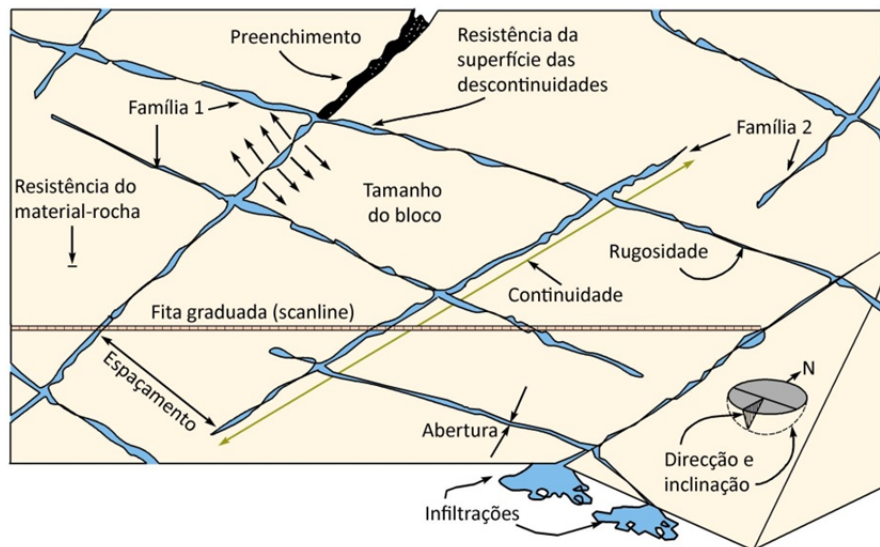


Figura 5. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de Hudson, 1989 in González de Vallejo et al., 2002).

2.2.4.1. Atitude geológica

A atitude geológica representa a orientação espacial de uma descontinuidade (seja, falha, diaclase, xistosidade, etc.), sendo representada pela direção – 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 (Figura 6). A medição da atitude das descontinuidades é efectuada com uma bússola equipada com um clinómetro (“bússola de geólogo”).

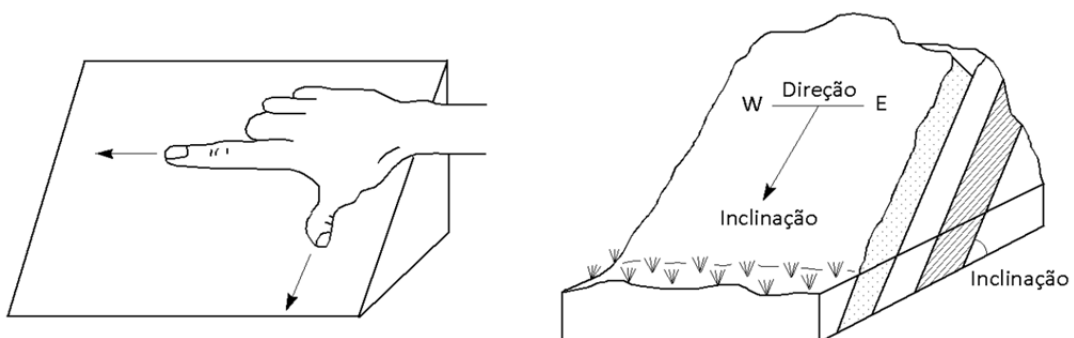


Figura 6. Avaliação da atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado de <http://www.esri.com/news/arcuser/1099/webdata7.html>).

Ao analisar a distribuição das descontinuidades num maciço rochoso verifica-se que, de um modo geral, elas apresentam uma certa regularidade, podendo, no entanto, existir vários conjuntos com orientações distintas. Assim podemos agrupar as descontinuidades com orientações idênticas em famílias (Rocha, 1981).

A representação gráfica e o tratamento estatístico da orientação das diferentes famílias de descontinuidades podem ser realizados através de:

- Diagramas geológico-estruturais com recurso a projecções estereográficas polares, diagramas de contorno estrutural ou estereogramas, e a diagramas de rosetas (ISRM, 1978; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Lisle & Leyshon, 2004), os quais permitem uma visão geral das famílias e da sua orientação (
- Figura 7);
- Símbolos em mapas geológicos, que indicam o valor médio da direção e o valor de inclinação para os diferentes tipos de descontinuidades (diaclases, falhas, xistosidades, etc.).

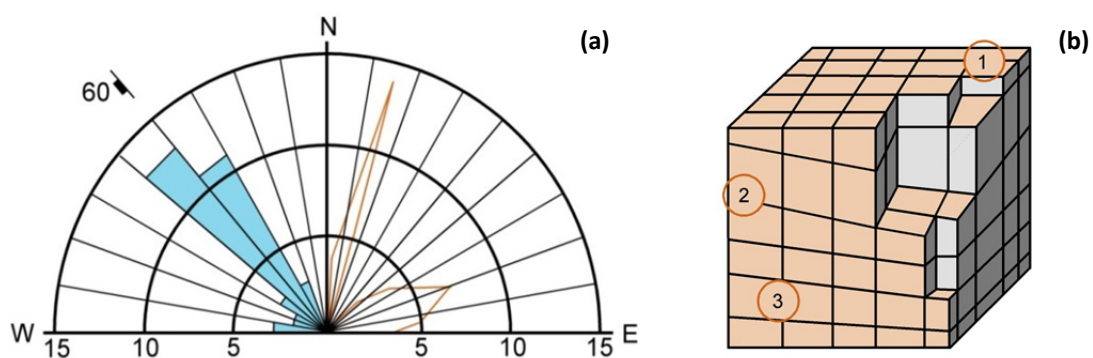


Figura 7. Representação esquemática de dados geoestruturais. (a) diagrama de rosetas; (b) principais famílias em bloco-diagrama (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

2.2.4.2. Grau de fracturação e espaçamento

É frequente a falta de rigor na utilização dos conceitos “grau de fracturação” e “espaçamento”, os quais estão intimamente relacionados, mas não têm, contudo, o mesmo significado. Assim, tal como preconiza a ISRM (1981), o grau de fracturação (ou “fracture intercept”) é definido como a distância média entre descontinuidades sucessivas, medida segundo a intersecção com uma linha recta de amostragem (“scanline”). Todas as descontinuidades são contabilizadas, independentemente de pertencerem ou não à mesma família. Por seu turno, o espaçamento corresponde ao afastamento médio entre descontinuidades da mesma família, medido segundo a normal aos seus planos.

Sempre que for possível é recomendável associar as descontinuidades em famílias e dever-se-á registar o espaçamento médio para cada família, complementando a informação relativa ao grau de fracturação (ISRM, 1978, 1981).

A medição do grau de fracturação e/ou do espaçamento é geralmente realizada com o auxílio de uma fita graduada (e.g., Lamas, 1993; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004) e deve ser feita ao longo de um comprimento que seja suficientemente representativo da frequência de descontinuidades.

Esta característica interfere significativamente no comportamento do meio rochoso, nomeadamente:

- No tamanho individual dos blocos de rocha intacta. Se o maciço tiver uma fracturação muito apertada reúnem-se condições para que o seu comportamento se aproxime do evidenciado por materiais de natureza granular;
- Em casos excepcionais, um espaçamento apertado pode modificar o tipo de rotura da massa rochosa, ou seja, de uma rotura planar para uma rotura circular;
- Tal como no caso da atitude, a importância do espaçamento aumenta quando outras condições para a deformabilidade estiverem presentes. Por exemplo, a reduzida resistência ao corte e um número suficiente de descontinuidades combinam-se para que um escorregamento possa ocorrer;
- O espaçamento individual de descontinuidades e a associação de várias famílias, influenciam fortemente na permeabilidade do maciço e nas suas características de percolação de água.

A Figura 8 apresenta a proposta da ISRM (1981) para a medição do espaçamento entre descontinuidades, devendo seguir-se as recomendações que conduzem à sua avaliação.

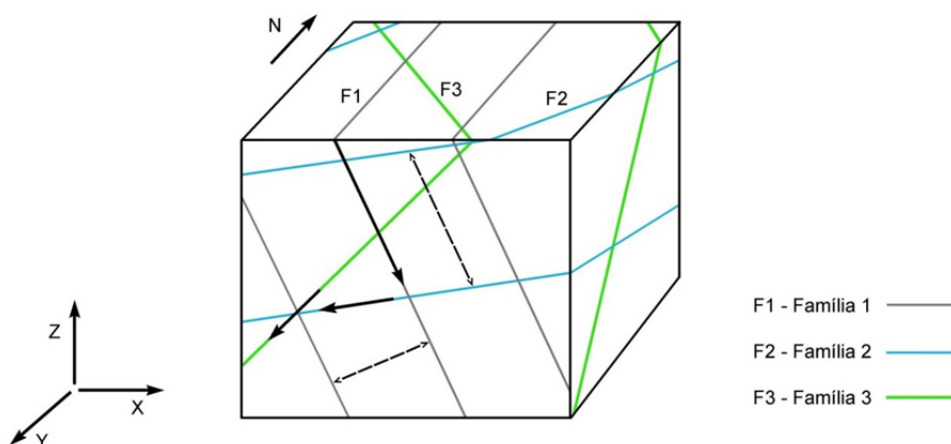


Figura 8. Medição do espaçamento entre descontinuidades a partir de uma face exposta do maciço (adaptado de ISRM, 1978, 1981; Scesi & Gattinoni, 2009).

A ISRM (1978, 1981) propõe que, quer o grau de fracturação, quer o espaçamento, sejam caracterizados de acordo com intervalos pré-estabelecidos (Quadro 6).

Quadro 6. Terminologia para caracterizar os maciços rochosos em função do grau de fracturação e/ou do espaçamento entre descontinuidades (adaptado de ISRM 1978, 1981).

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

Na Figura 9 ilustram-se os espaçamentos distintos entre duas famílias de descontinuidades.

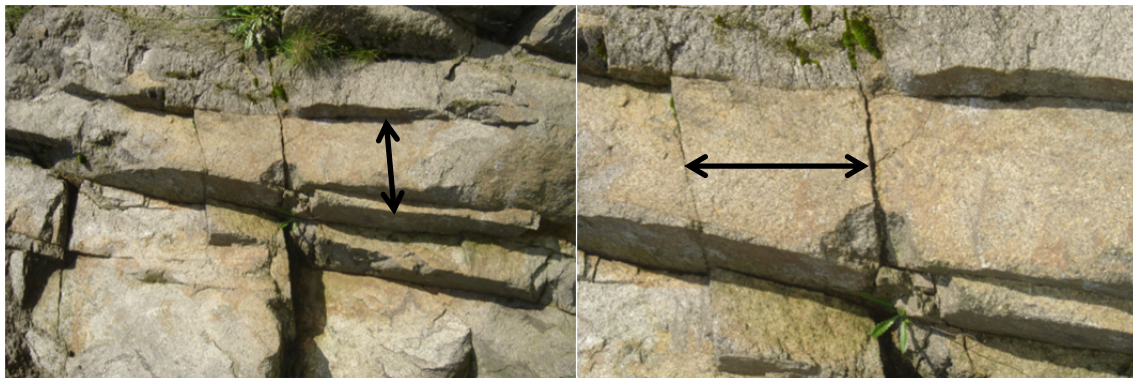


Figura 9. Exemplos de famílias de descontinuidades com espaçamentos diferentes.

2.2.4.3. Continuidade ou Persistência

A extensão em área de uma descontinuidade corresponde à sua continuidade ou persistência. Como o acesso aos maciços rochosos se encontra, frequentemente, limitado a aos afloramentos existentes, a sua determinação é feita medindo-se a extensão do traço do plano. Deve-se sempre observar a extremidade da superfície, isto é, se termina em rocha ou noutra descontinuidade.

A persistência tem especial influência na resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos, com importância decisiva em certas situações associadas a taludes e fundações de barragens. Como uma descontinuidade possui, em geral, baixa resistência, a sua dimensão em relação à dimensão do problema em estudo é um fator extremamente importante.

Normalmente, uma das famílias presentes no afloramento em estudo possui maior continuidade que as demais famílias, classificando-se estas relativamente à sua continuidade, podendo utilizar-se os termos contínua, sub-contínua e descontínua para as distinguir. A Figura 10 traduz de forma simplificada a aplicação dos diferentes termos.

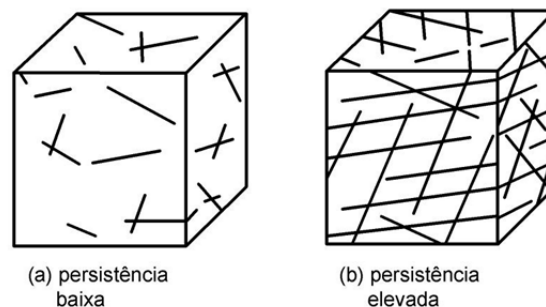


Figura 10. Blocos-diagrama esquemáticos indicativos da continuidade de várias famílias de descontinuidades (adaptado da ISRM, 1978).

Uma quantificação da persistência poderá fazer-se através da medida do comprimento do traço da superfície das descontinuidades em superfícies expostas do maciço e, a partir destas medições, estimar as áreas médias das diversas famílias de descontinuidades, pois geralmente condicionam os planos de rotura do maciço rochoso.

A ISRM (1978, 1981) definiu o conceito de persistência, traduzido pelo comprimento das intersecções (L) da família de descontinuidades em estudo, numa superfície exposta, e estabeleceu cinco termos (Quadro 7).

Quadro 7. Descrição da continuidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).

Continuidade	Comprimento, L (m)
Muito pouco contínuas	< 1
Pouco contínuas	1 - 3
Medianamente contínuas	3 - 10
Muito contínuas	10 - 20
Extremamente contínuas	> 20

2.2.4.4. Rugosidade

A rugosidade corresponde à aspereza (em termos de *ondulação*) nas superfícies das descontinuidades. Este parâmetro é um fator que tem especial incidência na resistência ao corte de uma descontinuidade, principalmente se esta se apresentar fechada e sem prévios movimentos.

A sua importância como fator favorável à resistência diminui com os aumentos da abertura, da espessura do enchimento ou do valor do deslocamento devido a anteriores movimentos de escorregamento.

O método mais expedito e rápido é a comparação visual da descontinuidade com perfis padrão de rugosidade (ISRM, 1978, 1981), que considera que as superfícies das descontinuidades podem ser denteadas, onduladas ou planas, podendo cada um destes tipos ser subdividido em três sub-classes: rugosa, lisa e estriada (Figura 11 e Quadro 8).

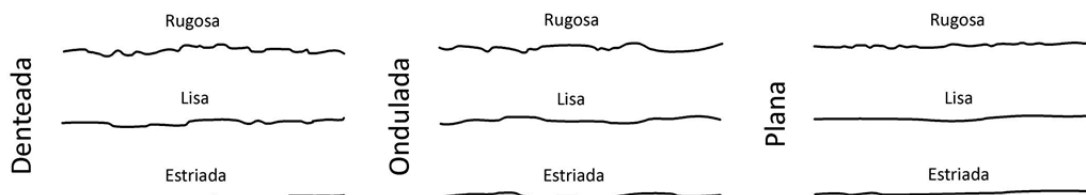


Figura 11. Classes dos perfis de rugosidade (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

Quadro 8. Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).

Classe	Descrição	Designação	Forma de perfil
I	Rugosa	R ₁₋₂ Pouco rugosa	Plana
II	Lisa		
III	Estriada		
IV	Rugosa	R ₃ Medianamente rugosa	Ondulada
V	Lisa		
VI	Estriada		
VII	Rugosa	R ₄₋₅ Muito rugosa	Denteada
VIII	Lisa		
IX	Estriada		

2.2.4.5. Resistência da parede das descontinuidades

O estado de alteração da rocha junto às paredes das descontinuidades tem forte influência na resistência ao corte dos maciços rochosos, principalmente se as descontinuidades estiverem fechadas, isto é, se houver contacto entre as paredes, como também condiciona a sua deformabilidade.

De forma expedita, a resistência pode ser estimada por resposta ao toque com o martelo de geólogo ou, em alternativa, com recurso ao esclerómetro portátil (ou martelo de Schmidt), aplicados directamente sobre a superfície da descontinuidade. Pretendendo-se a obtenção de dados quantitativos é recomendável a utilização deste último.

No Quadro 9 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 9. Terminologia para caracterização do estado de resistência (adaptado da ISRM, 1978).

Geral (R – Rocha)	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R ₀	Rocha muito branda	Marcada pela unha do polegar	0,25 – 1
R ₁	Rocha branda (I)	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo. Pode ser cortada em fatias com um canivete	1 – 5
R ₂	Rocha branda (II)	Pode ser cortada em fatias com um canivete com dificuldade. Marcas superficiais obtidas com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo	5 – 25
R ₃	Rocha razoavelmente resistente	Não pode ser esmigalhada ou cortada em fatias com canivete. Podem-se obter fragmentos de rocha com uma pancada seca do martelo de geólogo	25 – 50
R ₄	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo	50 – 100
R ₅	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias muitas pancadas com o martelo de geólogo	100 – 250
R ₆	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de geólogo	> 250

Os maciços rochosos apresentam-se frequentemente alterados perto da superfície por ação dos agentes de meteorização, e por vezes alteradas por processos hidrotermais. O processo de meteorização ou alteração meteórica (Aires-Barros, 1991) geralmente afeta as paredes das discontinuidades de um modo mais vincado que o interior da massa rochosa. Resulta daqui a necessidade de avaliar tanto o grau de alteração do maciço rochoso como do material-rocha que constitui a parede da discontinuidade.

O Quadro 10 apresenta uma metodologia qualitativa, proposta pela ISRM (1978), que permite descrever o grau de alteração meteórica do material rochoso e das discontinuidades.

Quadro 10. Descrição do grau de alteração meteórica (adaptado da 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.
Decompоста	A rocha é friável, apesar dos grãos minerais não estarem decompostos, mantendo-se a petrofábrica original.
Desintegrada	A maioria dos minerais estão decompostos e não se reconhece a petrofábrica original.

2.2.4.6. Abertura

A distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida no sentido ortogonal aos planos desta, corresponde à sua abertura (Figura 12). Quando a abertura se apresenta com enchimento, considera-se a largura de enchimento.

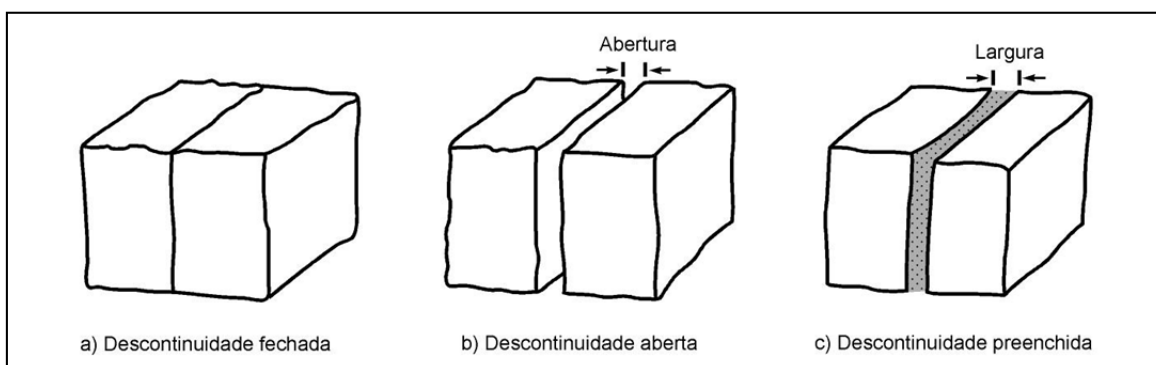


Figura 12. Diagramas que ilustram as definições de abertura de uma descontinuidade (adaptado da ISRM, 1978).

A abertura das descontinuidades varia muito em função das diferentes zonas dos maciços rochosos, podendo ser elevada à superfície, enquanto que em profundidade pode reduzir-se a poucas décimas de milímetro ou, sendo mesmo, fechada.

É uma das características com grande interferência na deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade dos maciços rochosos. A sua influência na resistência ao corte das descontinuidades é importante, pois modifica as tensões efetivas que atuam nas suas paredes. A sua determinação deve ser realizada no campo com recurso a uma régua graduada em milímetros (Figura 13).



Figura 13. Diferentes aspectos da abertura de descontinuidades.

A ISRM (1978, 1981) definiu que cada família de descontinuidades deve ser estudada individualmente e caracterizada pela média de aberturas após tratamento estatístico, de acordo com a proposta expressa no Quadro 11.

Quadro 11. Caracterização da abertura das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1978, 1981).

Abertura (mm)	Descrição	
<0,1	Muito fechadas	
0,1 – 0,25	Fechadas	Fechadas
0,25 – 0,5	Parcialmente abertas	
0,5 – 2,5	Abertas	
2,5 – 10	Medianamente amplas	Entreabertas
> 10	Amplas	
10 – 100	Muito amplas	
100 – 1000	Extremamente amplas	Abertas
> 1000	Cavernosas	

2.2.4.7. Enchimento ou Preenchimento

Enchimento (ou preenchimento) de uma descontinuidade pode definir-se como sendo o material existente entre as paredes da descontinuidade. O tipo de enchimento tem influência notável nos parâmetros geotécnicos de uma descontinuidade. É evidente a diferença de comportamento, quanto à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade, entre uma

descontinuidade preenchida por material argiloso mole e por material pétreo, por vezes, mais resistente e menos deformável que o próprio material que constitui o maciço rochoso.

É igualmente clara a diferença de comportamento, em termos hidráulicos, de uma descontinuidade preenchida por um material poroso e permeável, de outra preenchida por material impermeável. Nas falhas, o material de preenchimento corresponde, em geral, ao material rochoso esmagado pelo processo tectónico que as originou.

A caracterização do preenchimento deve conter, além da espessura, a descrição da natureza dos seus constituintes, mineralogia, textura, cor e outras informações que se mostrem relevantes. Deste modo, a ISRM (1978, 1981) propôs que em termos de enchimento a caracterização deve seguir a seguinte metodologia:

- A espessura do enchimento medida diretamente com uma régua graduada;
- A descrição do enchimento inclui a identificação do material, descrição mineralógica e tamanho do grão:
- A resistência pode-se estimar 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.

2.2.4.8. Percolação de água

Percolação é o fluxo de água livre, visível em descontinuidades individuais ou no maciço rochoso como um todo (Figura 14). A percolação de água nos maciços rochosos ocorre, principalmente, através de descontinuidades (permeabilidade secundária), mas em certas rochas sedimentares a permeabilidade primária do material pode ser significativa.

Problemas de estabilidade ou dificuldades na construção, podem ser previstos com a determinação do nível freático, a avaliação do circuito hidráulico e a pressão da água nos poros e descontinuidades.



Figura 14. Exemplos da percolação de água nas descontinuidades do maciço rochoso.

Para a análise da presença de água nas descontinuidades, Bieniawski (1989) definiu uma descrição básica, que se apresenta no Quadro 12.

Quadro 12. Descrição da presença de água nas descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).

Nomenclatura	Designação
S	Seco
H	Húmido*
G	Gotejante
F	Fluxo

**por vezes esta designação pode ser sub-dividida em: ligeiramente húmido e húmido.*

2.3. Técnica de amostragem linear aplicada às superfícies de descontinuidade

2.3.1. Traços gerais da técnica

A técnica de amostragem linear resume-se à colocação de uma fita graduada ao longo das faces expostas do maciço rochoso e no registo dos parâmetros geológico-geotécnicos (ISRM, 1981) de todas as descontinuidades que intersectam a fita ao longo do seu comprimento (Figura 16.). 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 Galiza et al. (2011 a,b).

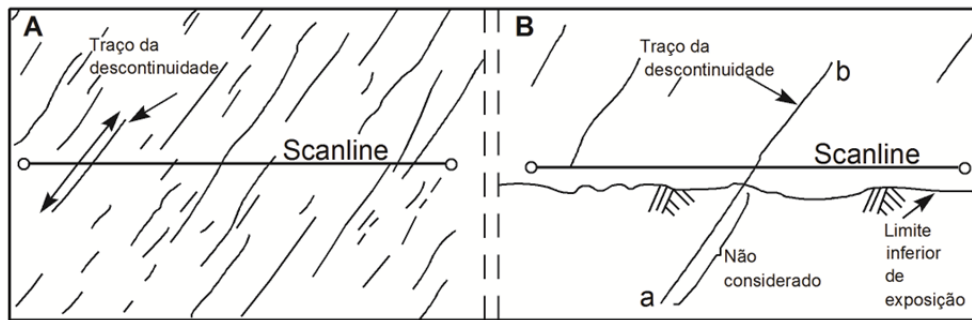


Figura 15. A técnica de amostragem linear (adaptado de Hudson & Harrison, 1997).



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

A recolha dos dados deve ser sistemática e uniforme, registando-se para cada descontinuidade interseçada pela linha de amostragem as seguintes características (e.g., Priest & Hudson, 1981; ISRM, 1981; Priest, 1983; Brady & Brown, 1985; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995):

- D - distância à origem da fita graduada;
- L - semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face exposta de rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
- T - tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R - na rocha; D - noutra descontinuidade; O - obscura);
- Atitude da descontinuidade (direção e inclinação) medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem com a descontinuidade;
- Curvatura (C), numa escala de C1 a C5, em que C1 representa superfícies planas e C5 superfícies muito curvas;
- Rugosidade (R), numa escala de R1 a R5, representando R1 superfícies lisas e R5 superfícies muito rugosas;
- Observações várias, tais como natureza do enchimento, abertura, percolação de água, etc.

Todos os dados respeitantes a cada linha de amostragem são devidamente registados numa ficha de levantamento de descontinuidades da qual constam, além das grandezas já mencionadas, as seguintes: i) número, localização e atitude da linha de amostragem; ii) orientação do hasteal (ou talude) estudado; iii) litologia e grau de alteração; iv) data do levantamento.

A Figura 17 representa a ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo, com aplicação da técnica de amostragem linear.

Esta técnica negligencia a representatividade das descontinuidades sub-horizontais, pois estas encontram-se sub-paralelas à fita, no entanto, sempre que estas forem detetáveis, devem ser registadas e cartografadas. Se, porventura, numa análise visual da frente exposta do maciço se verificar que as descontinuidades horizontais (e/ou sub-horizontais) são as mais representativas, a técnica de amostragem linear deverá ser complementada com aplicação de uma fita graduada na vertical (Singhal & Gupta, 2010).

A utilização de aplicativos informáticos relativos à compilação dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (por exemplo, *ScanGeoData/BGD* e *SchmidtData/UCS*; cf. Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011 a,b) – permite efectuar, entre outros, um cruzamento exaustivo de toda a informação e a interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos de modo a apoiar o estabelecimento da cartografia de zonamento geotécnico de um dado maciço rochoso (Figura 18).

2.4. Técnicas “in situ”

2.4.1. Esclerómetro Portátil

A determinação da resistência à compressão uniaxial é determinada, em geral, a partir de ensaios de laboratório ou de campo (e.g., ISRM, 1981; Cargill & Shakoor, 1990; Katz et al., 2000; Kahraman, 2001; Kahraman et al., 2002).

O esclerómetro portátil ou martelo de Schmidt é um instrumento portátil que permite a medição do “ressalto” por aplicação de uma determinada energia à superfície do material a testar (Schmidt, 1951). Este aparelho é usado comprimindo o êmbolo do martelo contra a superfície da rocha. Quando o êmbolo é disparado origina a libertação de uma carga sobre a superfície a ensaiar, a qual reage originando um ressalto (“rebound”) no martelo, que é designado por R (número de Schmidt). O ensaio pode ser aplicado tanto no material-rocha como nas discontinuidades e deverá ser executado numa superfície limpa, livre da camada superficial meteorizada e sem fissuras para que a leitura seja válida. Este ressalto é registado instantaneamente numa escala existente no martelo, que pode ir de 10 a 100 (West, 1991).

A medição do ressalto correlaciona-se, geralmente, com a resistência do maciço, mediante o designado ábaco de Miller, que tem em conta a densidade da rocha e a orientação do martelo em relação à superfície de rocha ensaiada (i.e., perpendicular à superfície de ensaio, e normalizada para as direções sub-horizontal, 45º e sub-vertical).

Para o estudo das propriedades mecânicas das rochas, podem ser utilizados martelos do tipo N ou L, que possuem diferentes energias de impacto. O tipo L, tem uma energia de impacto de 0.735 N.m, sendo o martelo mais utilizado em estudos de maciços rochosos, em relação ao martelo do tipo N, tem uma energia de 2.207 N.m sendo mais utilizado em estudo de betões.

Na Figura 19 é possível observar o martelo durante a realização de um ensaio sobre uma superfície rochosa.



Figura 19. Aspectos do martelo de Schmidt durante a realização de um ensaio “in situ”.

O valor estimado a partir do martelo de Schmidt deve ser obtido estatisticamente, de tal maneira que seja um valor representativo da resistência em causa. A ISRM (1981) recomenda a realização de 10 medições em cada superfície ensaiada, tomando como valor representativo a média dos 5 valores mais elevados. Com o valor médio obtido e conhecida a densidade do material-rocha, recorre-se ao ábaco de Miller (Miller, 1965), (Figura 20) obtendo-se o valor da resistência à compressão uniaxial, σ_c , para o material ensaiado. A ISRM (1981) sistematiza cinco termos de resistência à compressão (Quadro 13).

Na Figura 21 apresenta-se a ficha-tipo de registo das medições efetuadas em cada estação geomecânica.

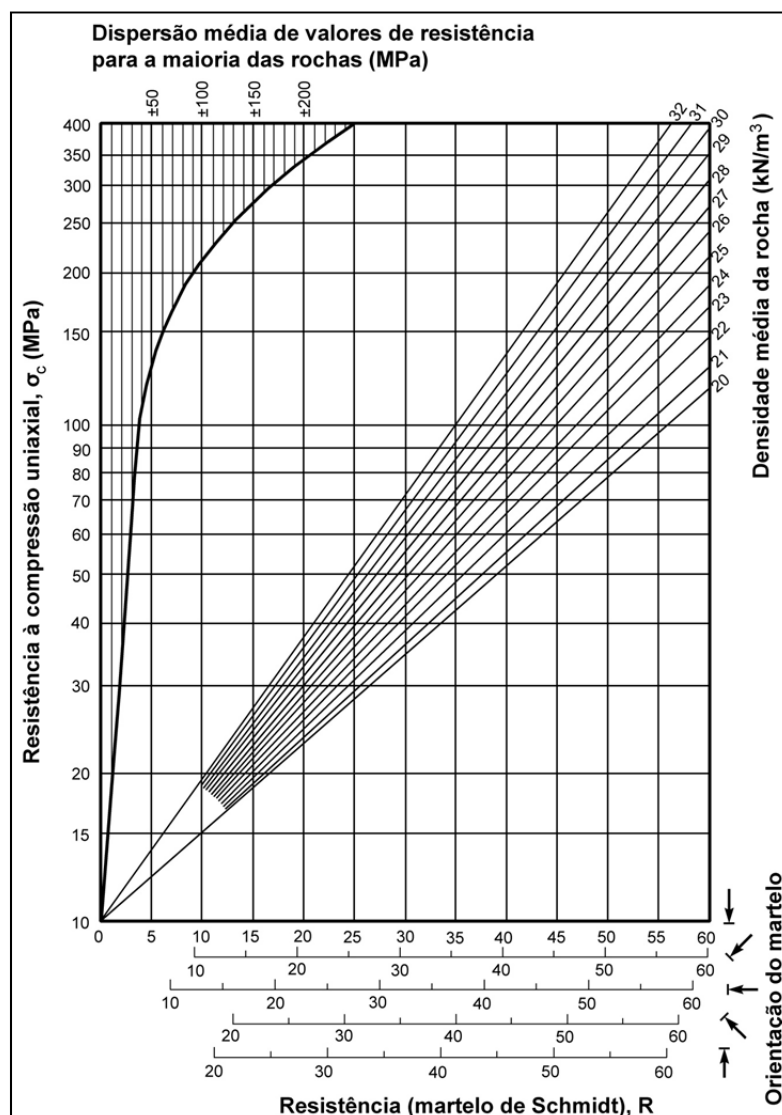


Figura 20. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2011).

Quadro 13. Classificação da resistência à compressão simples (adaptado da ISRM, 1981).

Classificação	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Designação
S ₁	> 200	Muito elevada
S ₂	60 – 200	Elevada
S ₃	20 – 60	Média
S ₄	6 – 20	Baixa
S ₅	< 6	Muito baixa

ESTACIONAMENTO GEOMECÂNICO, NÚMERO	DIREÇÃO DA ESTRADA	LITOLOGIA	ATITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO (ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995)	DIREÇÃO DO MARTELO SCHMIDT (TIPO L)	VALOR DO ENSAIO DE PERCUSSÃO (RESSALTO, REBOUND, R)										CINCO MAIORES VALORES DO RESSALTO, R (Segundo a norma proposta pela ISRM, 1978, 1981, 1987, 2007; ASTM, 2001)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAIXIAL, UCS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAIXIAL, UCS	CLASSE DE RESISTÊNCIA (ISRM, 1981)					OBSERVAÇÕES
			Direção	Inclinação			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				R	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
(RM)	N	(°)	E	(°)	Q		('Dureza de Schmidt', R)										R	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	S		

Figura 21. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo, com recurso ao martelo de Schmidt.

2.5. Técnicas Laboratoriais

2.5.1. Ensaio de Carga Pontual (“Point Load Test”)

O Ensaio de Carga Pontual ou Ensaio de Franklin, foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a resistência das rochas sob o efeito de uma carga pontual (e.g., Broch & Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Gunsallus & Kullhawy, 1984; ISRM, 1985; Norbury, 1986). É um método de

avaliação da resistência das rochas mediante a determinação de um índice que é estritamente correlacionável com a resistência à compressão uniaxial e com outros índices de resistência.

Este ensaio permite a determinação do $I_{s(50)}$, valor que é um índice de resistência o qual possibilita prever certos parâmetros, com ele relacionados, como são os casos das resistências à tração e à compressão uniaxiais. Permite ainda determinar o índice de anisotropia, $I_{a(50)}$, que é definido como sendo o quociente entre as resistências à carga pontual segundo as direções em que se registam os maiores e menores valores.

Trata-se de um equipamento extremamente simples de utilizar e de fácil transporte, podendo ser utilizado no campo sobre amostras de mão, o que constitui a sua grande vantagem.

De uma forma sucinta, o ensaio consiste na colocação do provete entre duas ponteiras cónicas, medindo de imediato a distância entre ambas (D). Posteriormente é aplicada uma carga, cujo aumento conduz o material à rotura. A carga responsável pela rotura (P) do material é registada num manómetro (Figura 22 e Figura 23).



Figura 22. Equipamento ELE Point Apparatus (modelo 77 - 0110) para execução do ensaio de carga pontual (cortesia do LGMC|ISEP).

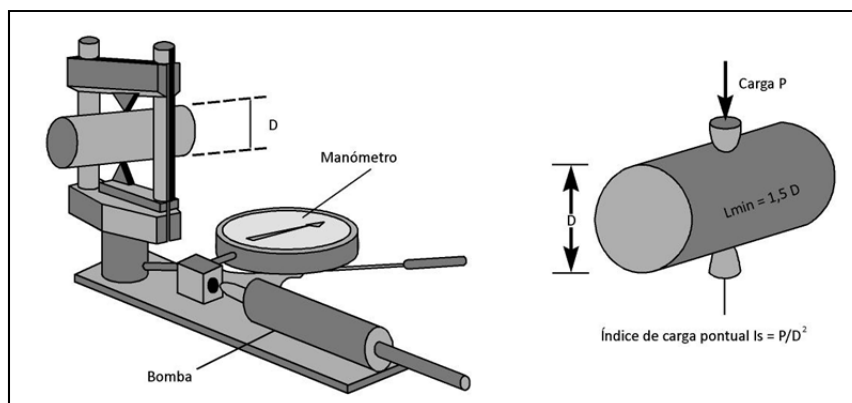


Figura 23. Representação esquemática do equipamento para a execução do ensaio de carga pontual (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A Figura 24 representa a ficha-tipo de registo das medições dos provetes submetidos ao ensaio de carga pontual.

LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (LGMC), ISEP																
ISRM: Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test)																
Local: Túnel Tibães, Galeria 2											Data:					
Zona Geotécnica																
Litologia:											Oper.: RFP					
Ensaio em provetes prismáticos											Verif.: MJA, HIC					
Amostra nº	Distância à origem da scanline (m)	Nº do provete	Dimensões			De (mm)	P(KN)	Is (MPa)	F (mm)	Is(50) (MPa)	Valor médio de Is(50) (MPa)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)	Observações		
			L (mm)	W (mm)	D (mm)											
2	89,10-94,0	1														
		2														
		3														
		4														
		5														
		6														
		7														
		8														
		9														
		10														
		11														
		12														
		13														
		14														
		15														
		16														
Nota explicativa:																
L	comprimento do provete					Fórmulas:										
W	largura do provete					$Is = \frac{P}{D^2}$										
D	altura do provete															
De	diâmetro equivalente da amostra															
P	carga de rotura					$Is(50) = F \times Is$										
F	factor de correcção obtido															
Is	índice de resistência à carga pontual					$F = \frac{D_0^{0.5}}{50} = \frac{D_0}{\sqrt{50}}$										
Is (50)	valor corrigido															

Figura 24. Ficha-tipo de registo das medições dos provetes submetidos ao ensaio de carga pontual.

O material-rocha é previamente cortado em provetes conforme as dimensões especificadas na recomendação da ISRM (1985). Estes devem ser cilíndricos, prismáticos (blocos) ou de forma irregular, e a direção aplicada da carga poderá ser axial ou diametral (ISRM, 1985). A carga a aplicar deve ser a necessária para romper os provetes com uma resistência semelhante a 50KN, permitindo executar o ensaio em provetes com dimensões desde os 15 mm aos 100 mm.

Para que os resultados obtidos sejam expressivos devem ser realizados, pelo menos, 10 ensaios por amostra, ou mais, quando se trata de rochas heterogéneas e anisotrópicas.

Consoante as características da forma do provete, o eixo escolhido para a aplicação da força, o tipo de rocha a ensaiar e a maior ou menor anisotropia, define-se qual o tipo de ensaio a efetuar. Deste modo existem três tipos de ensaios: o ensaio diametral, o ensaio axial e o ensaio em blocos e em fragmentos de formas irregulares (Figura 25).

Para determinar o índice de carga pontual (Is) é utilizada a seguinte fórmula:

$$Is = \frac{P}{D^2} \text{ (MPa)}$$

Em que, P é a carga aplicada que origina a rotura do provete (KN) e D é a distância entre as duas ponteiros no início da carga (mm).

O valor obtido deve ser então corrigido para $I_{s(50)}$, ou seja, valor que corresponde a um D de 50 mm:

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

Sendo F o fator de correção obtido através da expressão:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \cong \sqrt{\frac{D_e}{50}}$$

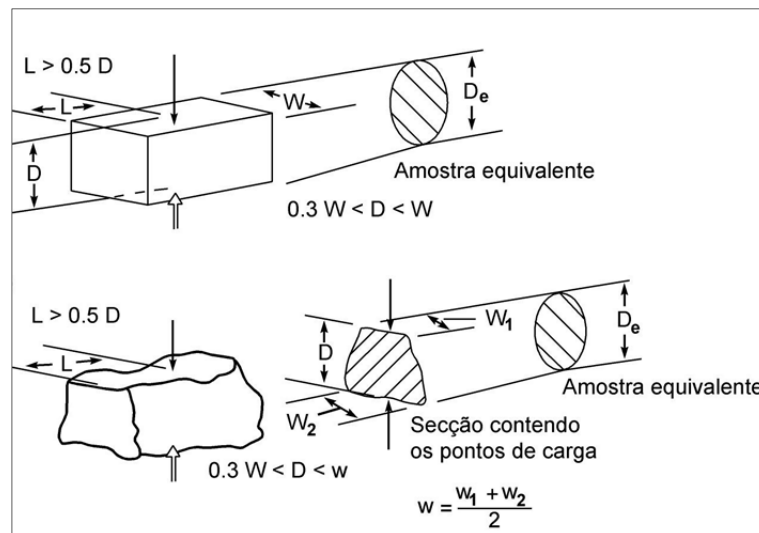


Figura 25. Relação de dimensões dos provetes (amostras regulares e irregulares) a satisfazer nos ensaios de carga pontual (adaptado da ISRM, 1985).

O valor $I_{s(50)}$ deve ser utilizado diretamente na classificação das rochas, enquanto as correlações com a resistência à compressão uniaxial são apenas aproximações. A resistência à compressão uniaxial é cerca de 20 a 25 vezes a resistência à carga pontual, como se pode constatar na Figura 2. 1.

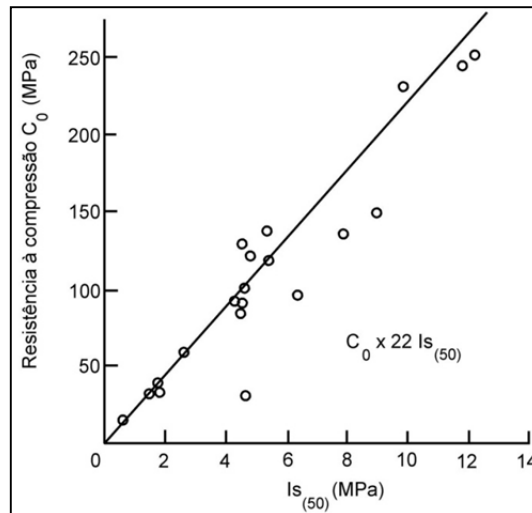


Figura 2. 1 - Gráfico que estabelece a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão uniaxial, segundo a ISRM (1985).

2.6. Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos: um breve apontamento

A geomecânica ocupa-se do estudo dos materiais geológicos naturais e do seu comportamento, bem como dos meios em que eles ocorrem (Mello Mendes, 1967/68). Assim, teremos de ter sempre em atenção que esta depende essencialmente do equilíbrio que se consegue estabelecer entre o realismo das suas bases de carácter físico-naturalista e o rigor dos conhecimentos físico-matemáticos de que se serve (Terzaghi, 1965; Rocha, 1981; Brown, 1991).

As propriedades geológico-geotécnicas do maciço rochoso na determinação de parâmetros geomecânicos são de fundamental importância mas de elevada complexidade. Segundo Hoek (2007) é nas primeiras fases de estudo de um projeto, onde a informação sobre o maciço rochoso é reduzida, que o uso das classificações geomecânicas traz grandes benefícios, e serve como um *check-list* que assegura que todas as informações relevantes sejam consideradas. Contudo, deve-se adotar metodologias distintas dependendo do tipo de maciço e dos objetivos da análise.

Nas últimas décadas, as classificações geomecânicas de maciços rochosos surgiram como importantes ferramentas auxiliares de projetos nas áreas da engenharia geotécnica, da engenharia civil, da engenharia de minas e das geociências de engenharia (e.g., Terzaghi, 1946; Hoek & Brown, 1980 a,b; Bieniawski, 1989; López Jimeno & Díaz Méndez, 1997; Barton, 2000, 2006, 2007). A experiência tem demonstrado que estas classificações podem ser uma ferramenta poderosa, quando usadas corretamente (Barton & Bieniawski, 2008).

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

Têm sido propostos diversos sistemas de classificação de maciços tendo em vista o estudo e caracterização de parâmetros geomecânicos. Deve-se a Ritter (1879) uma das primeiras sistematizações empíricas, com algum grau formal, para a execução de obras subterrâneas (especialmente túneis mineiros), em particular para a determinação dos sistemas de suporte. Outra referência na literatura internacional sobre túneis é o artigo “rock defects and loads on tunnel supports” de Terzaghi (1946) que apresenta as bases racionais da primeira classificação com um certo grau de formalismo denominada por “*Rock Load Mass Classification System*” (RLM-system). Em síntese, as primeiras classificações partiam, em regra, de descrições meramente qualitativas dos maciços ou com base na avaliação quantitativa de um só parâmetro, o que as tornava bastante subjetivas e dependentes do julgamento de quem as aplicava (e.g., Terzaghi, 1946). Com a experiência, foram surgindo novos sistemas classificação dos maciços rochosos, que permitem uma melhor caracterização dos parâmetros (e.g., Lauffer, 1958; Deere et al., 1967; Wickham et al., 1972; Bieniawski, 1973, 1989; Barton et al., 1974).

Os sistemas têm sofrido grandes desenvolvimentos e atualizações associados às inovações tecnológicas e à experiência adquirida. As classificações com uma base multi-paramétrica dadas a lume, nomeadamente, por Wickham et al. (1972, 1974), Bieniawski, (1973, 1976), Barton et al. (1974, 1980) são, geralmente, consideradas como as sistematizações fundadoras das classificações numéricas em escavações subterrâneas. Atualmente, as classificações mais utilizadas são a RMR – “*Rock Mass Rating*” e o *Q-system* – “*Rock Tunnelling Quality Index*” (Barton & Bieniawski, 2008). Ambas se aplicam na caracterização dos maciços rochosos direcionada para a construção de escavações subterrâneas (túneis) e minas. De salientar que a classificação Wickham et al. (1972, 1974) não teve grande adesão na comunidade técnica e apenas há reportado uma actualização do RSR – “*Rock Structure Rating*” por parte de Skinner (1988).

A maioria dos dados de base das classificações geomecânicas assenta numa série de parâmetros geológico-geotécnicos que podem ser adquiridos recorrendo à “*Basic Geotechnical*

Description of Rock Masses” (BGD) da ISRM (1981), aliada à técnica de amostragem linear aplicada a superfícies expostas dos maciços rochosos, bem como complementarmente a todos os ensaios geomecânicos “in situ” e/ou em laboratório previstos pela ISRM (2007). Pela importância prática que rapidamente se reconheceu a estas aplicações, as designadas classificações geomecânicas foram melhoradas passando então a incluir elementos de carácter geológico-estrutural, petrofísico e geotécnico, reconhecidamente imprescindíveis para a determinação da qualidade geotécnica de um dado maciço (presença ou ausência de diaclases e/ou superfícies de estratificação/xistosidade, atitude das superfícies de descontinuidade, espaçamento, abertura, preenchimento, rugosidade, etc.).

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

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

As classificações geomecânicas (e os índices geológico-geomecânicos) constituem, atualmente, ferramentas essenciais, uma vez que permitem, de uma forma expedita avaliar o comportamento geomecânico dos maciços e, algumas delas, estimar os sustimentos a aplicar em túneis (González de Vallejo & Ferrer, 2011). Saliente-se que a sua aplicação é particularmente indicada na definição do zonamento geotécnico do maciço. Apresenta-se no Quadro 14 uma breve apontamento das classificações RMR de Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989), *Q-system* (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006), do índice GSI – Geological Strength Index (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005) e, ainda, do índice hidrogeomecânico HP – *Hydro-Potential Value* (Gates, 1995, 1997, 2003).

Quadro 14. Principais classificações geomecânicas utilizadas em obras subterrâneas.

Classificação Geomecânica	Principais Parâmetros	Avaliação	Referências
“Rock Mass Rating” RMR	<ul style="list-style-type: none"> Resistência do material-rocha (UCS - resistência à compressão uniaxial; PLT - resistência à carga pontual) Índice de qualidade da rocha, RQD; Espaçamento das descontinuidades; Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; Condições de percolação de água; Orientação das descontinuidades em relação ao sentido da escavação. 	<ul style="list-style-type: none"> Qualidade geomecânica do maciço rochoso; Coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso; Módulo de deformabilidade do maciço; Período de auto-suporte; Tipos de sustimento e dimensionamento; Método de escavação. 	Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989)
“Rock Tunnelling Quality Index” Q-system	<ul style="list-style-type: none"> Índice de qualidade da rocha, RQD; Número de famílias de descontinuidades; Rugosidade das descontinuidades; Alteração das descontinuidades; Condições de percolação de água; Estados de tensão na envolvente da escavação. 	<ul style="list-style-type: none"> Qualidade geomecânica do maciço rochoso; Módulo de deformabilidade do maciço; Definição do sustimento e do revestimento. 	Barton et al. (1974, 1980); Barton (2006)
“Geological Strength Index” GSI	<ul style="list-style-type: none"> Descrição da geo-estrutura em termos de compartimentação e das condições geológico-geotécnicas das superfícies estruturais do maciço. 	<ul style="list-style-type: none"> Qualidade geológico-geomecânica do maciço rochoso; Módulo de deformabilidade do maciço; Coesão e ângulo de atrito do maciço; Resistência da rocha intacta. 	Hoek & Brown (1997); Hoek et al. (1998); Marinos & Hoek (2000); Marinos et al. (2005)
“Hydro-Potential Value” HP-value	<ul style="list-style-type: none"> Índice de qualidade da rocha, RQD; Número de famílias de descontinuidades; Rugosidade das descontinuidades; Abertura e forma das descontinuidades; Condições de percolação de água nas descontinuidades; Condições de condutividade hidráulica nas descontinuidades. 	<ul style="list-style-type: none"> Qualidade hidrogeomecânica do maciço rochoso; Previsão de potenciais problemas de infiltração. 	Gates (1995, 1997, 2003)

2.6.1. Classificação RMR – Rock Mass Rating

A classificação de Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989) denominada “*Rock Mass Rating*” (RMR) baseia-se na consideração de seis parâmetros geológico-geotécnicos, aos quais se atribuem pesos relativos (Quadro 15). O trabalho de Serafim & Pereira (1983) foi uma importante abordagem para a aplicação no RMR das condições geo-hidráulicas dos maciços e o cálculo do módulo de deformabilidade. O resultado do índice RMR para um determinado maciço pode variar entre 0 e 100 e é obtido através da soma algébrica dos pesos referidos, tal como se ilustra na Figura 26.

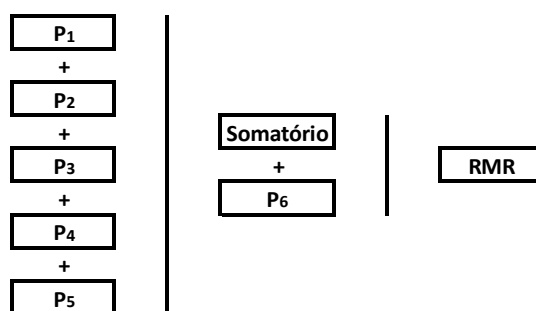


Figura 26. Representação gráfica da obtenção do valor de RMR (adaptado de Miranda et al., 2006).

Com base no valor de RMR determinado é possível classificar o maciço quanto à sua qualidade geomecânica (Quadro 16) e estudar os seus parâmetros de resistência, estimar o seu módulo de deformabilidade e analisar o sustimento necessário para suportar a escavação.

Quadro 15. Classificação geomecânica RMR: descrição e pesos atribuídos (adaptado de Bieniawski, 1989). (A) resistência; (B) RQD; (C) espaçamento das descontinuidades; (D) condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; (E) Orientações para a classificação pormenorizada das condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; (F) percolação de água; (G) Descrição da orientação das descontinuidades; (H) orientação das descontinuidades.

Descrição	Resistência à compressão uniaxial, (σ_c), (ISSO), PLT (MPa)	Resistência à carga pontual, Pesos
Excepcionalmente resistente	>250	8
Muito resistente	100-250	4-8
Mediamente resistente	50-100	2-4
Resistente	25-50	1-2
Pouco resistente	10-25	<i>Para esta gama baixa de valores, é preferível o recurso ao ensaio uniaxial</i>
Muito pouco resistente	2-10	1
Multíssimo pouco resistente	1-2	0

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

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

Descrição	Resistência à compressão uniaxial, (σ_c), (ISSO), PLT (MPa)	Resistência à carga pontual, Pesos
Excepcionalmente resistente	>250	8
Muito resistente	100-250	4-8
Mediamente resistente	50-100	2-4
Resistente	25-50	1-2
Pouco resistente	10-25	<i>Para esta gama baixa de valores, é preferível o recurso ao ensaio uniaxial</i>
Muito pouco resistente	2-10	1
Multíssimo pouco resistente	1-2	0

Descrição	Fluxo de água por cada 10 m de extensão (L/min)	Pesos
Nenhum	<10	10-25
Alguma	10-25	5-10
Muito	>25	0-5

Descrição	Pressão de águas das descontinuidades/tensão principal máxima	Pesos
Nenhuma	<0,1	0-0,1
Alguma	0,1-0,2	0,2-0,5
Muito	>0,5	>0,5

Descrição	Seco	Algo húmido	Húmido	Gotejante	Fluxo
Pesos	15	10	7	4	0

Descrição	Inclinação 45°-90°, a favor da escavação	Inclinação 20°-45°, a favor da escavação
Muito favorável	Muito favorável	Favorável
Razoável	Razoável	Desfavorável
Muito desfavorável	Muito desfavorável	Muito desfavorável

Descrição	Inclinação 45°-90°, a favor da escavação	Inclinação 20°-45°, a favor da escavação
Muito favorável	Muito favorável	Favorável
Razoável	Razoável	Desfavorável
Muito desfavorável	Muito desfavorável	Muito desfavorável

Descrição	Inclinação 45°-90°, a favor da escavação	Inclinação 20°-45°, a favor da escavação
Muito favorável	Muito favorável	Favorável
Razoável	Razoável	Desfavorável
Muito desfavorável	Muito desfavorável	Muito desfavorável

Descrição	Inclinação 45°-90°, a favor da escavação	Inclinação 20°-45°, a favor da escavação
Muito favorável	Muito favorável	Favorável
Razoável	Razoável	Desfavorável
Muito desfavorável	Muito desfavorável	Muito desfavorável

Descrição	Muito favorável	Favorável	Mediamente favorável	Desfavorável	Muito desfavorável
Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Quadro 16. Classes do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais e tipos de escavação e sugestão das condições de suporte associados (adaptado de Bieniawski, 1989).

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

O tempo médio de auto-suporte para túneis com tecto em arco, pode ser obtido através do ábaco de Bieniawski (1989), Figura 27.

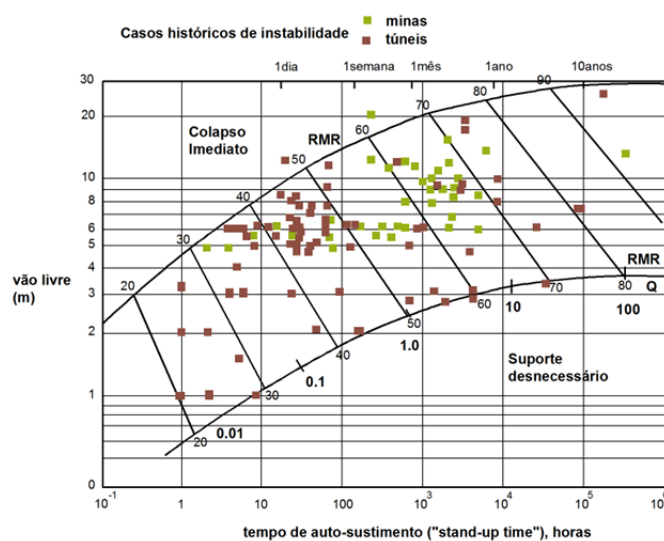


Figura 27. Ábaco do tempo de auto-suporte (horas) versus RMR, baseado em casos históricos segundo Bieniawski (1989). A conversão de RMR em Q segundo Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

2.6.2. Sistema Q – Rock Tunneling Quality Index

O sistema Q (Q-system) foi desenvolvido por Barton et al. (1974), os quais propuseram um índice de qualidade Q para a classificação de maciços rochosos e a respetiva necessidade de suporte, a saber:

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

Em que,

$\frac{RQD}{J_n}$	Representa a estrutura do maciço rochoso quanto à compartimentação;
$\frac{J_r}{J_a}$	Representa a rugosidade e as características de atrito das paredes das descontinuidades ou dos seus materiais de enchimento;
$\frac{J_w}{SRF}$	Representa o estado de tensão do maciço.

Índice de qualidade (*RQD*), Número de famílias de descontinuidades (J_n), Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r), Índice de alteração das descontinuidades (J_a), Fator de redução do caudal (J_w), Estado de tensão do maciço (*SRF*).

O valor numérico do Q varia numa escala logarítmica entre 0.001 (para maciços de qualidade muito fraca) a 1.000 (para maciços de qualidade excepcional). Quando a qualidade do maciço varia marcadamente de local para local, é desejável classificar as zonas geotécnicas separadamente (Barton et al., 1974, 1980).

Conhecendo os vários parâmetros característicos do maciço rochoso (Quadro 17, Figura 28), é possível estimar o valor do índice Q, o qual irá permitir analisar a estabilidade da escavação e definir o tipo de suporte a utilizar com vista a evitar situações de instabilidade.

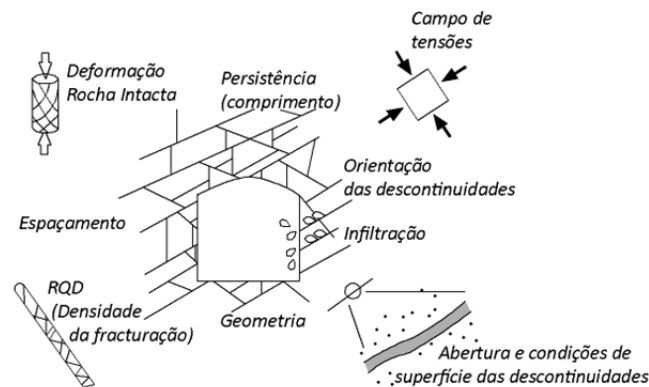


Figura 28. Visão esquemática dos parâmetros que são considerados no Q-system (adaptado de Barton, 2007).

Quadro 17. Classificação geomecânica Q-system: descrição e pesos (adaptada de Barton et al., 1974). (A) Índice de qualidade da rocha, RQD (adaptado de Deere et al., 1967); (B) Número de famílias de descontinuidades, J_n ; (C) Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r ; (D) Índice de alteração das descontinuidades, J_a .

A			B		
Qualidade da rocha	RQD (%)	Notas	Número de famílias de descontinuidades	J_n	Notas
A. Muito fraca	0-25	i) Quando RQD é ≤ 10 (incluindo 0), o valor a adotar é 10.	A. Nenhuma, ou poucas descontinuidades	0,5-1,0	i) Para interseções utilizar $3xJ_n$ ii) Para as bocas de entrada dos túneis utilizar $2xJ_n$
B. Fraca	25-50		B. Uma família	2	
C. Razoável	50-75	ii) a adoção de valores com intervalos de 5 é suficientemente adequada.	C. Uma família e uma aleatória	3	
D. Boa	75-90		D. Duas famílias	4	
E. Excelente	90-100		E. Duas famílias e uma aleatória	6	
			F. Três famílias	9	
			G. Três famílias e uma aleatória	12	
			H. Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços altamente fraturados	15	
			I. Rochas esmagada, tipo solo	20	

C			D				
Índice de rugosidade das descontinuidades	J_r	Notas	Índice de alteração das descontinuidades	J_a	$\phi(r)$	Notas	
a. Contacto das superfícies das descontinuidades			a. Contacto das superfícies das descontinuidades				
b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento			b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento				
A. Descontinuidades descontinuas	4	i) As descrições referentes às alíneas a. e b. referem-se a escalas de amostragem de dimensões pequena e média, respectivamente	A. Paredes duras e compactas, enchimento impermeável	0,75	-	i) Os valores $\phi(r)$, ângulo de atrito residual, são entendidos como uma aproximação às propriedades mineralógicas dos produtos de alteração, se existentes	
B. Rugosas e irregulares, onduladas	3		B. Paredes não alteradas, somente com descoloração superficial	1	25-35		
C. Lisas onduladas	2	ii) Somar 1,0 se o espaçamento da família principal for maior que 3 m	C. Paredes ligeiramente alteradas, películas minerais não brandas, partículas arenosas, etc	2	25-30		
D. Estriadas onduladas	1,5		iii) $J_r = 0,5$ pode ser utilizado para descontinuidades estriadas contendo lineações, se estas estão orientadas de acordo com menor resistência	D. Películas silto-arenosas ou silto-argilosas, pequena fracção argilosa (não branda)	3		20-25
E. Rugosas ou irregulares, planas	1,5		iv) v) Os valores de J_r e J_a devem ser obtidos aplicando-se à família de descontinuidades que for mais desfavorável para a estabilidade do ponto de vista da orientação e da orientação e da resistência ao corte, τ (onde $\tau = \text{ontg}(J_r/J_a)$)	E. Películas argilosas moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc. e pequenas quantidades de argilas expansivas.	4		8-16
F. lisas, planas	1		b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento				
G. Estriadas, planas	0,5		F. Partículas arenosas, sem argila, rocha desintegrada, etc.	4	25-30		
c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas			G. Preenchimentos argilosos não brandos, sobreconsolidados (contínuo, espessura <5mm)	6	16-24		
H. Zonas contendo minerais argilosos com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1		H. Preenchimentos argilosos subconsolidado (contínuo, espessura <5mm)	8	12-16		
I. Zonas esmagadas, arenosas ou cascalhentas com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1		A. Preenchimentos argilosos expansivos, i.e., montmorilonite (contínuo, espessura <5mm)	8,0-12,0	6-12		
			c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas				
			K., L. Zonas ou bandas com M. rochas desintegradas ou esmagadas e argila (ver G, H e J para as condições argilosas)	6,0, 8,0 ou 8,0-12,0	6-24		
			N. Zonas ou bandas de argilas siltosas ou arenosas, pequena fracção argilosa, não brandas	5			
			O. Zonas contínuas espessas ou bandas argilosas	10,0-13,0			
			P. & R. (ver G, H. e J. para condições argilosas)	6,0-24,0			

Quadro 17. (continuação) - Classificação geomecânica Q-system: : descrição e pesos (adaptada de Barton et al., 1974): (E) Fator de redução do caudal, J_w ; (F) Estado de tensão do maciço, SRF; (G) Tipos de escavação e valores de ESR - "Excavation Support Ratio".

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

Estado de tensão do maciço	SRF	Notas
a. Zonas de fraqueza intersectando a escavação, o que pode causar perdas no maciço rochoso quando o túnel for escavado		
A. Ocorrências múltiplas de zonas de baixa resistência, contendo argilas ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (a qualquer profundidade)	10	
B. Zonas de baixa resistência, contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (profundidade $<50m$)	5	
C. Zonas de baixa resistência, contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (profundidade $>50m$)	2,5	
D. Zonas múltiplas de cisalhamento em rocha competente (sem argila), com rocha desintegrada na vizinhança (qualquer profundidade)	7,5	i) Para a situação A, reduzir os valores de SRF de 25-50%, apenas se as zonas de cisalhamento relevantes não intersectarem a escavação.
E. Zona singular de cisalhamento em rocha competente (sem argila); (profundidade de escavação $<50m$)	5	
F. Zona singular de cisalhamento em rocha competente (sem argila); (profundidade de escavação $>50m$)	2,5	
G. Descontinuidades abertas, fraturação muito intensa (qualquer profundidade)	5	

Estado de tensão do maciço	σ_1/σ_3	σ_2/σ_3	SRF	Notas
b. Rocha competente, problemas de tensão na rocha				
H. Tensões baixas, próximo da superfície	>20	>13	2,5	ii) Para campos de tensões virgens fortemente anisotrópicas (se medidas): quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduzir α_1 para $0,8\alpha_1$. Quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduzir α_1 e α_2 para $0,6\alpha_1$ e $0,6\alpha_2$, onde α_1 = resistência à compressão não confinada, α_2 = resistência de carga pontual (σ_1 e σ_3 são a tensão principal máxima e mínima, respetivamente)
J. Tensões médias	200-10	13-0,66	1	
K. Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	10-5	0,66-0,33	0,5-2	
L. Explosões moderadas de rochas maciças	5-2,5	0,33-0,16	5-10	iii) Sugere-se aumentar SRF de 2,5 a 5 para os casos em que a profundidade do coroamento é inferior à largura do vão (ver H.)
M. Explosões intensas de rochas maciças	$<2,5$	$<0,16$	10-20	

Estado de Tensão do maciço	SRF	Notas
c. Rocha esmagada, fluxo plástico de rocha incompetente sob influência de elevada pressão rochosa		
N. Pressão moderada de esmagamento	5-10	
O. Pressão elevada de esmagamento	10-20	
d. Rochas expansivas, atividade química expansiva devida à presença de água		
P. Pressão de expansão moderada	5-10	
Q. Pressão de expansão elevada	10-15	

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

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

$$D_e = \frac{\text{Vão livre, diâmetro ou altura (m)}}{ESR} \quad [12]$$

O valor de ESR está relacionado com a finalidade de cada escavação e com o grau de segurança exigido pelo sistema de suporte instalado para manter a estabilidade da mesma. Barton et al. (1974) propõem os valores apresentados no Quadro 18.

Quadro 18. Tipos de escavação e valores de ESR – “*Excavation Support Ratio*” (adaptado de Barton et al., 1974).

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

A comparação e correlação entre estes dois sistemas de classificação, estabeleceram-se a partir do estudo de mais de uma centena de casos provenientes de diferentes continentes (Bieniawski, 1989), Figura 29.

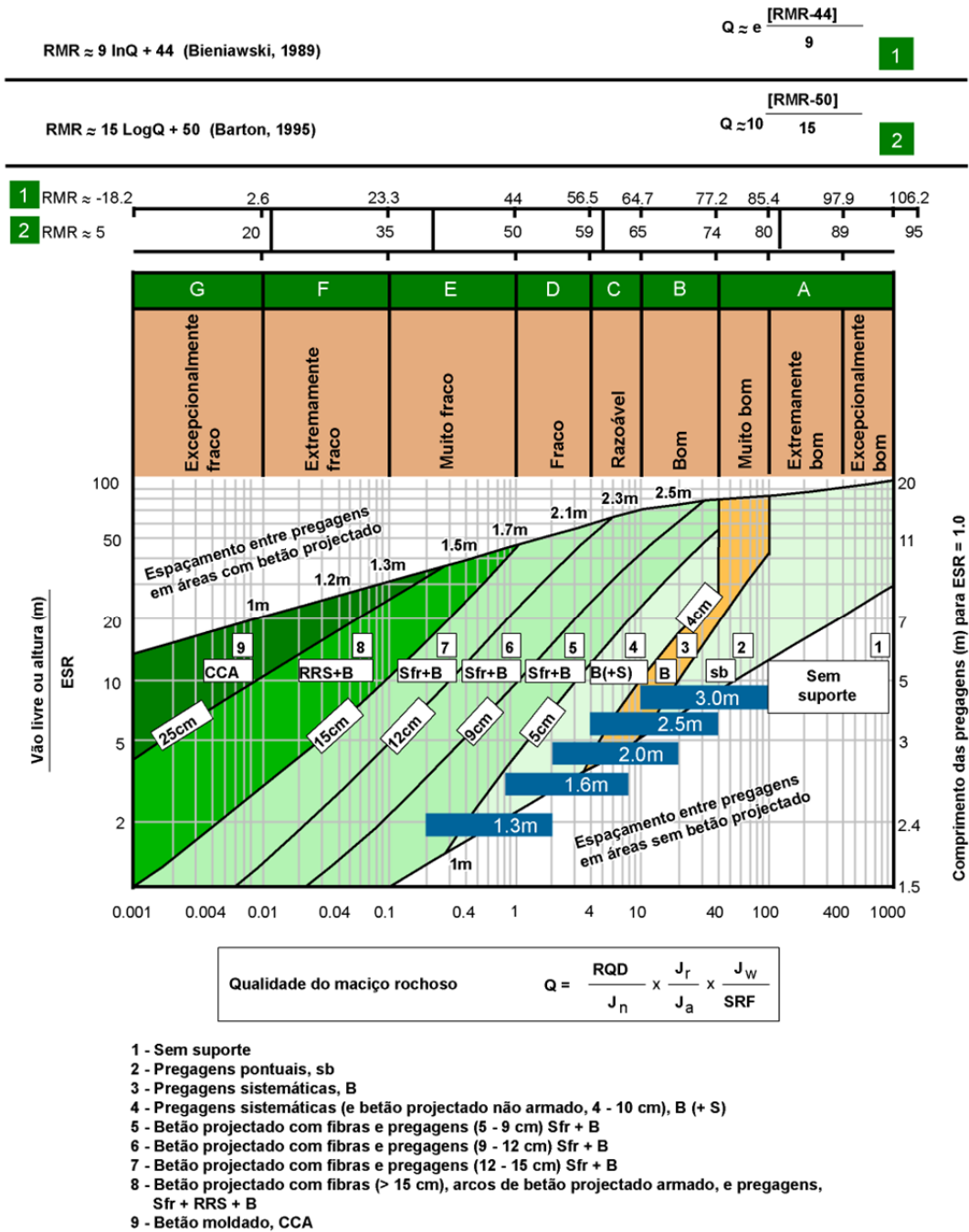


Figura 29. Ábaco com correlações do Q-system com o RMR, baseado nas propostas de Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

2.6.3. Sistema GSI – Geological Strength Index

O GSI (*Geological Strength Index – Índice Geológico de Resistência*) foi criado para complementar a aplicação do critério de rotura de Hoek & Brown (1980a,b, 1997) em materiais rochosos. Por volta dos anos 80, do século passado, foi desenvolvido um critério com intuito de fornecer informação para apoiar a análise geotécnica em projetos de escavações subterrâneas (Hoek & Brown, 1980a,b; Hoek et al., 1992, 2002; Hoek & Marinos, 2007 e referências nos trabalhos citados). O critério original de Hoek & Brown (1980a,b) pressupõe que a rotura da massa rochosa é controlada por processos dinâmicos nos blocos de rocha intacta separados por descontinuidades e é, em regra, expresso da seguinte maneira:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c * \left(m_i * \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{1/2} \quad [16]$$

em que,

σ'_1 - tensão efetiva principal máxima à rotura

σ'_3 - tensão efetiva mínima à rotura

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

σ_c - resistência à compressão simples da rocha intacta

O critério de Hoek & Brown (1980a,b) sofreu adaptações e melhoramentos, generalizando-se a expressão anterior tomando a designação de *critério generalizado de Hoek & Brown* (Hoek et al., 2002):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c * \left(m_b * \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [17]$$

em que,

m_b – valor reduzido do parâmetro m_i

s, a – constantes que dependem do material-rocha

No GSI há seis classes principais qualitativas relacionadas com a geoestrutura, a maioria destas adaptadas da sistematização de Terzaghi (1946). O GSI pretende, assim, traduzir a qualidade geológico-geotécnica do maciço. É o único sistema que providencia um procedimento integrado para a estimativa dos parâmetros do critério de Hoek & Brown (1980a,b) e do correspondente critério de rotura Mohr-Coulomb (Hoek et al., 1992; Hoek, 1994; Hoek & Marinos, 2007). Usando este índice é ainda possível estimar o valor do módulo de deformabilidade a partir de correlações. O índice GSI apoia-se, assim, na descrição de dois

parâmetros fundamentais do maciço rochoso, a geoestrutura (em termos de compartimentação do maciço rochoso) e as condições geológico-geotécnicas das descontinuidades.

O valor de GSI pode ser determinado por intermédio do valor de RMR, tendo em consideração que (Hoek, 2007): $RMR > 23$; ou seja, o índice para a presença de água é igual ao peso 15 (i.e. maciço seco) e o índice de relação entre a orientação das descontinuidades e a orientação da escavação é muito favorável (peso 0). Deste modo, a relação entre os dois índices será a seguinte:

$$GSI = RMR - 5$$

No entanto, para Barton (2011) a relação algébrica anterior, dada o seu carácter simplista e redutor, não é minimamente adequada no estado actual do conhecimento das classificações geomecânicas e deverá ser abandonada. Todavia, outros autores referem-na como válida e plausível para se proceder a uma avaliação exploratória do GSI (e.g., Hoek, 2007; Singh & Goel, 2011).

Todavia, existe um ábaco (Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001; Marinos et al. 2005, 2007) onde são descritas as características da geoestrutura do maciço rochoso, em termos de compartimentação e o estado das descontinuidades, do qual se pode igualmente deduzir o intervalo do valor do GSI (Figura 30). Face à especificidade das rochas metassedimentares, Hoek et al. (1998) propuseram um novo ábaco (Figura 31) que privilegia as estruturas tectónicas em rochas muito deformadas e brandas (Marinos & Hoek, 2001; Marinos et al., 2005, 2006).

No Quadro 19 apresenta-se a avaliação da qualidade do maciço rochoso em termos de GSI.

Quadro 19. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek, 1994, 2007).

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

2.6.4. Hydro-Potential (HP) Value

Segundo Gates (1995, 1997, 2003), o índice hidrogeomecânico *HP-value* consiste numa técnica semi-quantitativa aplicada para avaliar o potencial para o desenvolvimento da água subterrânea em maciços rochosos, podendo ser adaptada para estimar infiltrações de água em escavações subterrâneas. O fluxo de água subterrânea através dos maciços rochosos fraturados é controlado por diversas características físicas do maciço rochoso que se interrelacionam, nomeadamente, a heterogeneidade litológica, a qualidade da rocha, bem como diversos parâmetros hidrogeotécnicos relacionados com as descontinuidades (i.e., número, densidade, rugosidade, condutividade hidráulica, abertura, conectividade), (Gates, 1997, 2003).

O valor HP corresponde ao potencial para um maciço rochoso transmitir hidraulicamente água subterrânea. O método constitui numa técnica simples e rápida usada para avaliar as vizinhanças de afloramentos rochosos e, mesmo assim, nas obras de escavação (Gates, 1997; Price, 2009).

O índice HP é uma modificação da classificação *Q-system* de Barton et al. (1974, 1980), sendo este sistema descrito por seis características das descontinuidades, atribuindo um valor numérico a cada parâmetro (Quadro 20). O *Hydro-Potential Value* (HP) é dado pela seguinte expressão:

$$HP = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{(J_k)(J_{af})} \right) \times (J_w)$$

Em que,

- RQD* Índice de qualidade da rocha;
- J_n* Número de famílias de descontinuidades;
- J_r* Índice de rugosidade das descontinuidades;
- J_{af}* Fator de abertura das descontinuidades;
- J_k* Fator de condutividade hidráulica das descontinuidades;
- J_w* Fator de percolação de água nas descontinuidades.

Os valores numéricos de HP variam entre 1.33×10^{-3} , para maciços de muito fraca qualidade, e 800, para maciços de qualidade excelente.

Quadro 20. Índice hidrogeomecânico HP-value: descrição e pesos (adaptado de Gates, 1995, 1997, 2003). (A) parâmetro Jaf (adaptado de Hencher, 1987; Harp & Noble, 1993; in Gates, 1997, 2003); (B) parâmetro Jk (adaptado de Freeze & Cherry, 1979; in Gates, 1997, 2003); (C) parâmetro Jw (adaptado de Barton et al., 1974; Hencher, 1987; in Gates, 1997, 2003); (D) Número de famílias de descontinuidades, Jn (adaptado de Barton et al., 1974); (E) Índice de rugosidade das descontinuidades, Jr (adaptado de Barton et al., 1974).

(A)			(D)		
Descrição	Pesos		Número de famílias de descontinuidades	J _n	Notas
Descontinuidades todas fechadas, <0,1 mm	1		A. Nenhuma, ou poucas descontinuidades	0,5-1,0	
0,1 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 1,0 mm	1,2		B. Uma família	2	
1,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 5,0mm	1,4		C. Uma família e uma aleatória	3	
5,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 10,0mm	1,8		D. Duas famílias	4	i) Para interseções utilizar 3xJn
10,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 20,0mm	2,5		E. Duas famílias e uma aleatória	6	ii) Para as bocas de entrada dos túneis utilizar 2xJn
20,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 50,0mm	5		F. Três famílias	9	
50,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 100,0mm	7,5		G. Três famílias e uma aleatória	12	
100,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 200,0mm	10		H. Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços altamente fraturados	15	
Abertura de 90% das descontinuidades > 200,0mm	15		I. Rochas esmagada, tipo solo	20	

(B)			(E)		
Descrição	Pesos	Condutividade hidráulica (m/d)	Índice de rugosidade das descontinuidades	J _r	Notas
Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1	< 10 ⁻⁶	a. Contacto das superfícies das descontinuidades		
90% das descontinuidades com preenchimento argiloso; baixo fluxo	2	10 ⁻³ - 10 ⁻²	b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento		
90% das descontinuidades com preenchimento silto-arenoso; fluxo moderado	3	10 ⁻² - 10 ⁻¹	A. Descontinuidades descontínuas	4	i) As descrições referentes às alíneas a. e b. referem-se a escalas de amostragem de dimensões pequena e média, respectivamente
90% das descontinuidades preenchidas por areia ou cascalho; fluxo moderado a abundante	3,5	10 ⁻¹ - 10 ⁰	B. Rugosas e irregulares, onduladas	3	ii) Somar 1,0 se o espaçamento da família principal for maior que 3 m
90% das descontinuidades sem preenchimento; fluxo abundante	4	10 ⁰ - 10 ¹	C. Lisas onduladas	2	iii) Jr = 0,5 pode ser utilizado para descontinuidades estriadas contendo lineações, se estas estão orientadas de acordo com menor resistência
90% das descontinuidades abertas e sem preenchimento; fluxo muito abundante	5	> 10 ¹	D. Estriadas onduladas	1,5	iv) Os valores de Jr e Ja devem ser obtidos aplicando-se à família de descontinuidades que for mais desfavorável para a estabilidade do ponto de vista da orientação e da orientação e da resistência ao corte, τ (onde τ = ontg(Jr/Ja))
			E. Rugosas ou irregulares, planas	1,5	
			F. Lisas, planas	1	
			G. Estriadas, planas	0,5	
			c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas		
			H. Zonas contendo minerais argilosos com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1	
			I. Zonas esmagadas, arenosas ou cascalhentas com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1	

(C)		
Descrição	Pesos	Condutividade hidráulica (m/d)
Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1	< 10 ⁻⁶
90% das descontinuidades com preenchimento argiloso; baixo fluxo	2	10 ⁻³ - 10 ⁻²
90% das descontinuidades com preenchimento silto-arenoso; fluxo moderado	3	10 ⁻² - 10 ⁻¹
90% das descontinuidades preenchidas por areia ou cascalho; fluxo moderado a abundante	3,5	10 ⁻¹ - 10 ⁰
90% das descontinuidades sem preenchimento; fluxo abundante	4	10 ⁰ - 10 ¹
90% das descontinuidades abertas e sem preenchimento; fluxo muito abundante	5	> 10 ¹

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

$$Q (L/min) = 3,785 * (919,71e^{-2,314HP}) \quad [26]$$

2.7. Zonamento geotécnico vs. zonamento geomecânico

O zonamento geotécnico é uma etapa fundamental dos estudos geotécnicos e visa definir maciços geológicos com idênticas respostas geotécnicas a curto e a longo prazo (Oliveira, 1986). Numa primeira fase efectua-se um reconhecimento de campo para se definir os constrangimentos cartográficos e geológico-estruturais do maciço em estudo e área envolvente (especialmente, a caracterização das unidades geológicas regionais e/ou locais, a descrição e caracterização das litologias, a cartografia das macro e meso-estruturas, a identificação das zonas alteradas e cartografia das suas espessuras, a localização das exurgências/infiltrações de água, etc.). Complementa-se esta informação com a realização de uma série de ensaios “in situ” e laboratoriais para se definirem, com maior rigor, os valores dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso. Na fase seguinte procede-se à recolha, tratamento, análise e interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos do maciço. Recorre-se, como referido, a bases de dados geológico-geomecânicas (por exemplo: ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS; Galiza et al., 2011 a,b), as quais permitem efectuar cruzamentos sistemáticos de toda a informação e, assim, apoiar a interpretação de todos os geo-dados para o estabelecimento da cartografia de zonamento geotécnico (IAEG, 1981a,b, 2005). Esta abordagem integrativa permite estabelecer o modelo geotécnico do maciço em estudo.

Em suma, o zonamento geotécnico baseia-se na classificação de unidades geotecnicamente “homogéneas”, que podem agrupar diferentes idades geológicas. Por sua vez, estas podem dividir-se em “sub-unidades geotécnicas” ou “grupos geotécnicos”. O pormenor e o grau de homogeneidade dependerão da escala, do objectivo do mapa e dos dados disponíveis (González de Vallejo & Ferrer, 2011). Esta forma de dividir o maciço em zonas que exibem comportamentos geotécnicos semelhantes, tem sido um valioso auxiliar para a engenharia geotécnica e a geologia de engenharia, uma vez que permite a aplicação das mesmas técnicas em zonas com características comparáveis, permitindo o apoio no dimensionamento da obra e a otimização da mesma. Segundo Oliveira (1986), trata-se assim de limitar o maciço rochoso dentro de intervalos bem definidos e aceitáveis, relativos à deformabilidade, resistência, permeabilidade e estado de tensão.

O passo seguinte será o zonamento geomecânico que pretende avaliar a qualidade global do maciço recorrendo a uma síntese integrada: por um lado, com base, especialmente, nas feições geológicas, no zonamento geotécnico (CFCCF, 1996; ISRM, 2007) e nas propriedades geomecânicas (resistência, coesão, ângulo de atrito, deformabilidade, etc.) e, por outro lado, com a determinação baseada em sistemas multiparamétricos de índices geológico-geomecânicos (GSI),

de classificações geomecânicas generalistas (RMR, *Q-system*, etc.) e de classificações geomecânicas específicas (*HP-value*, etc.). Logo, a partir desta síntese e da análise ponderada com base na similitude paramétrica dos resultados geomecânicos será possível uma divisão e sistematização em unidades geomecânicas que esboçam as zonas geomecânicas de um dado maciço rochoso.

Capítulo 3 - Estudo da compartimentação geotécnica do maciço rochoso da rede de galerias da Mina de Tibães

Capítulo 3. Estudo da compartimentação geotécnica do maciço rochoso da rede de galerias da Mina de Tibães

3.1. Enquadramento geotectónico e geomorfológico regional

A região de Mire de Tibães (Oeste de Braga) insere-se, do ponto de vista geotectónico, na Zona Centro-Ibérica (Ribeiro et al., 2007). Esta região enquadra-se na designada Unidade Metassedimentar Parautóctone do Minho Central e Ocidental (Ferreira et al., 2000), envolvida pelos maciços graníticos de Braga, de Gondizalves e de Avelada (Teixeira et al., 1973; Dias et al., 2000b), (Figura 32 e Figura 33). Estes maciços fazem parte, no Noroeste Peninsular, de uma vasta faixa de granitóides, com orientação geral NW-SE, e distribuem-se pelas regiões naturais desde o Alto Minho até às Beiras.

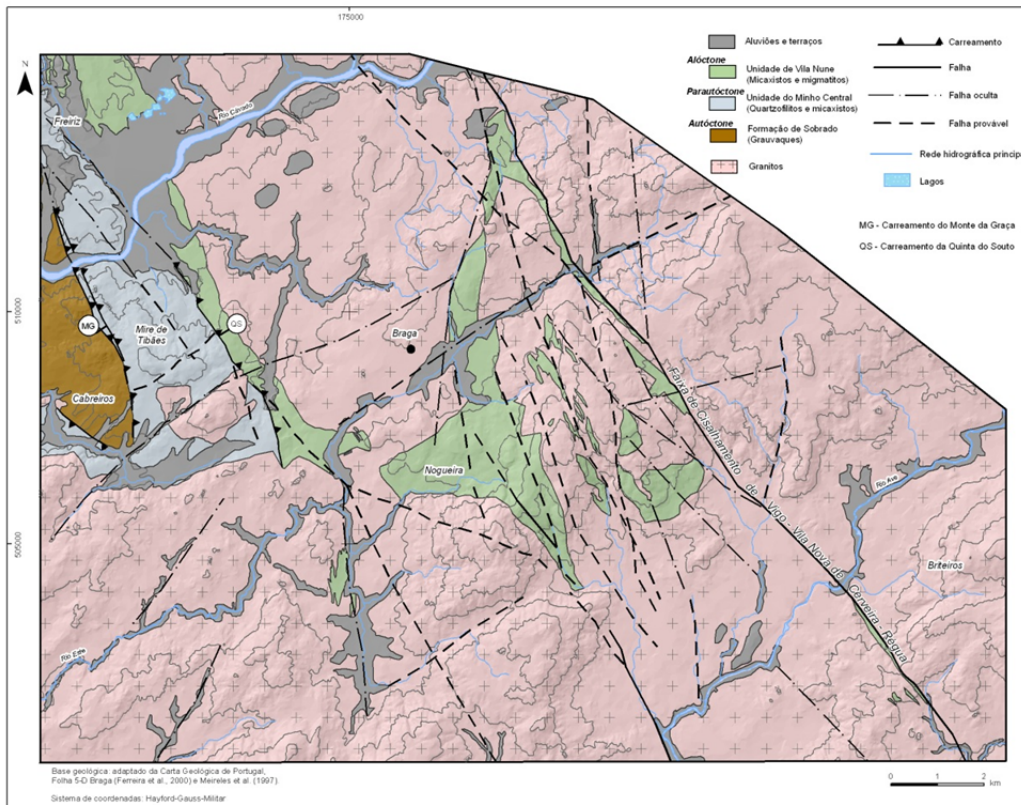


Figura 32. Esboço geológico regional de Braga (adaptado e simplificado de Ferreira et al., 2000).

A disposição destes granitóides está diretamente associada ao megacisalhamento crustal de Vigo – Vila Nova de Cerveira – Amarante – Peso da Régua. Estes incluem-se nos maciços sin- e tardi-tectónicos relativamente à 3ª fase de deformação (D3) varisca (Ferreira et al., 1987, 2000). Nas proximidades do sector de Mire de Tibães afloram várias manchas graníticas de distintas

fácies, i.e., na parte Nordeste, o Complexo Granítico de Braga, e a Sul, o granito de Gondizalves e o granito de Celeirós (Dias et al., 1998, 2000b; Ferreira et al., 2000). O extenso vale preenchido por depósitos de cobertura do rio Cávado, controlado tectonicamente segundo a direção geral ENE-WSW, materializa uma linha morfoestrutural divisória na região. Este vale é constituído por depósitos aluvionares do Holocénico (Ribeiro et al., 1943; Teixeira et al., 1973; Sequeira Braga, 1987; Braga et al., 1989) ou, na terminologia de Soares de Carvalho (1992), de depósitos fluviais, não atuais, que acompanham o canal atual dos rios e ribeiras.

De seguida são apresentadas as principais unidades geológicas presentes na área de estudo (Teixeira et al., 1973; Ferreira et al., 2000):

- Depósitos de cobertura - Ocorrem, quer preservados em depressões tectónicas, quer como terraços fluviais, essencialmente ligados ao rio Cávado. Os depósitos considerados de cobertura correspondem a unidades plio-pleistocénicas e holocénicas, ocorrendo desde depósitos flúvio-lacustres até depósitos fluviais, aflorando ainda depósitos de solifluxão e de vertente e aluviões atuais;
- Rochas metassedimentares - Ocorrem, na parte ocidental da cidade de Braga, a Oeste da faixa de cisalhamento de Vigo-Vila Nova de Cerveira-Régua. Na região de Mire de Tibães há indícios de estruturas graníticas subaflorantes, como apófises e veios graníticos a cortar as rochas metassedimentares. As unidades metassedimentares que afloram na região de Mire de Tibães, de idade Silúrica, são genericamente constituídas por micaxistos, metagrauvaques e metapelitos, com intercalações de quartzofilitos e quartzitos.
- Rochas graníticas - Ocorrem no sector a Nordeste e a Sul de Mire de Tibães, sendo constituídas por rochas graníticas, de instalação sin-tectónica (granito de Gondizalves, com 320-310 Ma; Dias et al., 1998, 2000a) e tardi-tectónica (granitos de Braga e de Celeirós; com 310-305 Ma; Dias et al., 1998) relativamente à 3ª fase de deformação da orogenia Varisca. Genericamente, afloram na região, desde granitóides de duas micas, de grão médio a fino (fácies de Gondizalves e Caldas) a monzogranitos biotíticos, de tendência porfiróide, de grão médio a fino (fácies de Braga) e, por vezes, grosseiro (fácies de Celeirós).
- Filões e massas - Afloram inúmeras rochas filonianas de composição variada, tais como filões de quartzo, filões e massas aplíticas e/ou pegmatíticas. Algumas destas massas foram alvo, no passado, de explorações mineiras, dadas as suas mineralizações em volfrâmio e estanho.

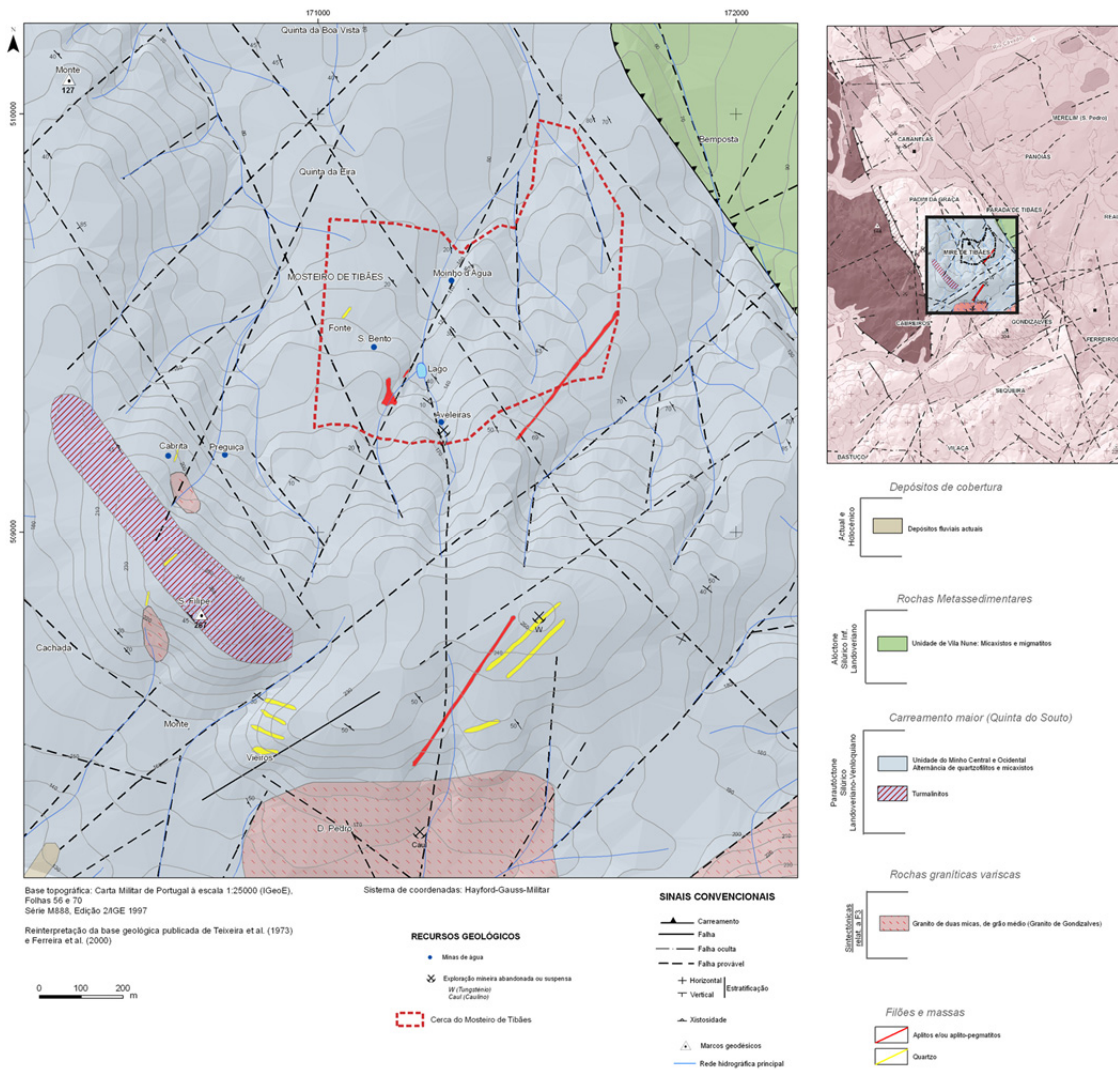


Figura 33. Esboço geológico da região de Mire de Tibães (revisto e reinterpretado de Ferreira et al., 2000; adaptado de LABCARGA, 2007/2008; Lopes, 2012).

Em termos geomorfológicos regionais, a área em estudo enquadra-se num contraste entre o fundo plano dos vales e as vertentes íngremes das elevações que os acompanham o que, de resto, constitui uma fisionomia abundante na região minhota (Feio, 1949). Esta zona de relevo acidantado, apresentando uma direção principal NE-SW, reflete o condicionamento estrutural que guiou a evolução geomorfológica recente da área. As cortinas contínuas de elevações (Sameiro – 572 m; Esporões – v.g. Santa Marta: 562 m; Tebosa – v.g. Bandeira: 279 m), as sucessivas áreas deprimidas, umas de formato oval, outras com uma forma mais alongada segundo os cursos de água, a rede hidrográfica de padrão retangular e alguns vales lineares são evidências morfológicas que refletem o condicionamento tectónico na morfologia atual (Figura 34).

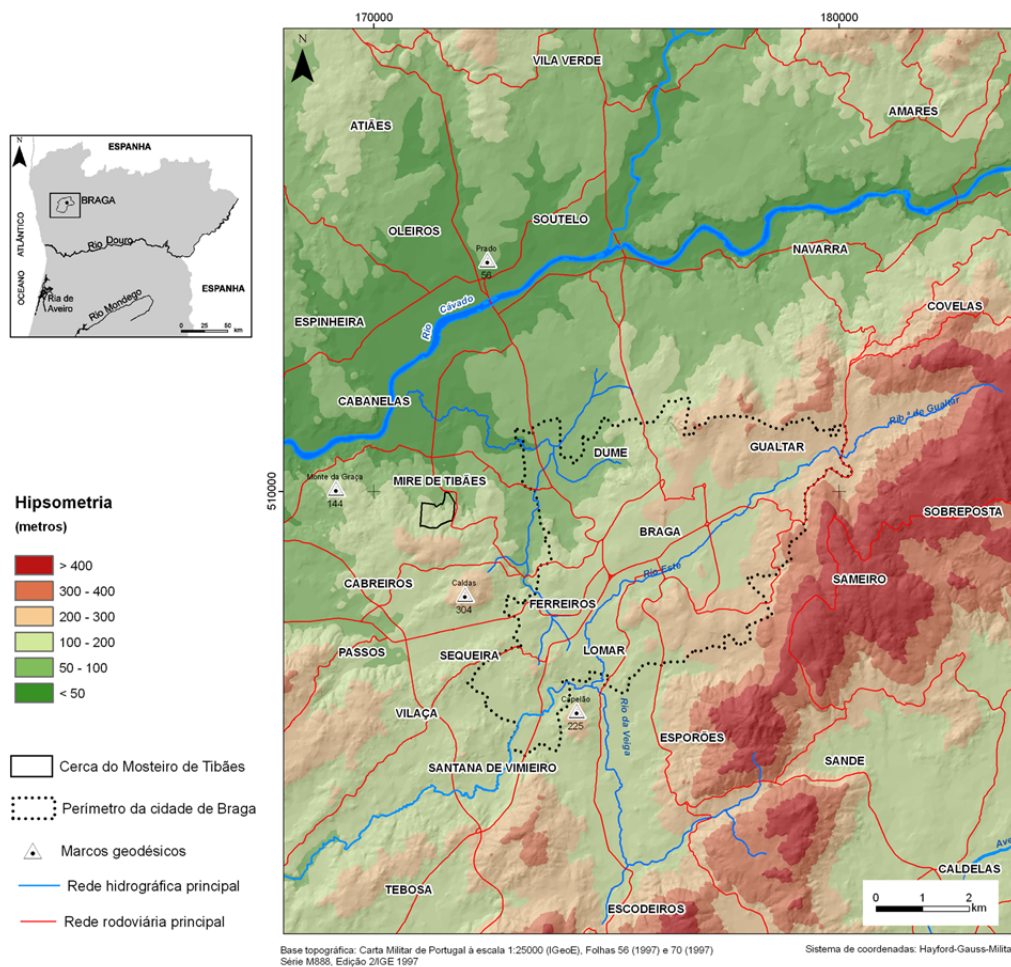


Figura 34. Esboço hipsométrico da área de Braga, vale do rio Cávado (adaptado de LABARGA, 2007/2008; Lopes, 2012).

3.2. Geologia e geotecnia subterrânea da Mina das Aveleiras

Generalidades: Materiais e métodos

O presente estudo apresenta uma caracterização geológico-geotécnica e geomecânica do maciço rochoso das Aveleiras (Mosteiro de Tibães). Para tal, foi tido como objecto de investigação a rede de galerias da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras – concessão nº 2314 Tibães (DGMSG, 1962) – ou “mina de Tibais” (Lagoa, 1941; Fonseca, 1943; Pousada, 1947). Esta mina situa-se nos domínios da Cerca do Mosteiro de Tibães, na freguesia de Mire de Tibães, a cerca de 7 km de Braga (Mata & Dias Costa, 1998; Dias Costa 2002; Coelho Dias, 2010). A mina atingiu o seu apogeu no período da segunda guerra mundial e foi declarada campo livre em 1963 (Lopes, 2012).

O Mosteiro de São Martinho de Tibães foi fundado em finais do século XI e conheceu épocas em que assumiu uma grande importância no contexto nacional, tendo chegado a ser a Casa-Mãe da Congregação Beneditina portuguesa (Oliveira, 1974; Mata, 2002; Fontes, 2005).

A Mina das Aveleiras (ou Mina de Tibães) é constituída por duas galerias longitudinais principais (aqui denominadas G1 e G2), e várias galerias transversais ou travessas (tomando a designação T1 a T7). O comprimento total da rede de galerias é de 362,91 m e a largura média das galerias principais é de 1,65 m, apresentando uma altura média de 1,90 m (Figura 35).

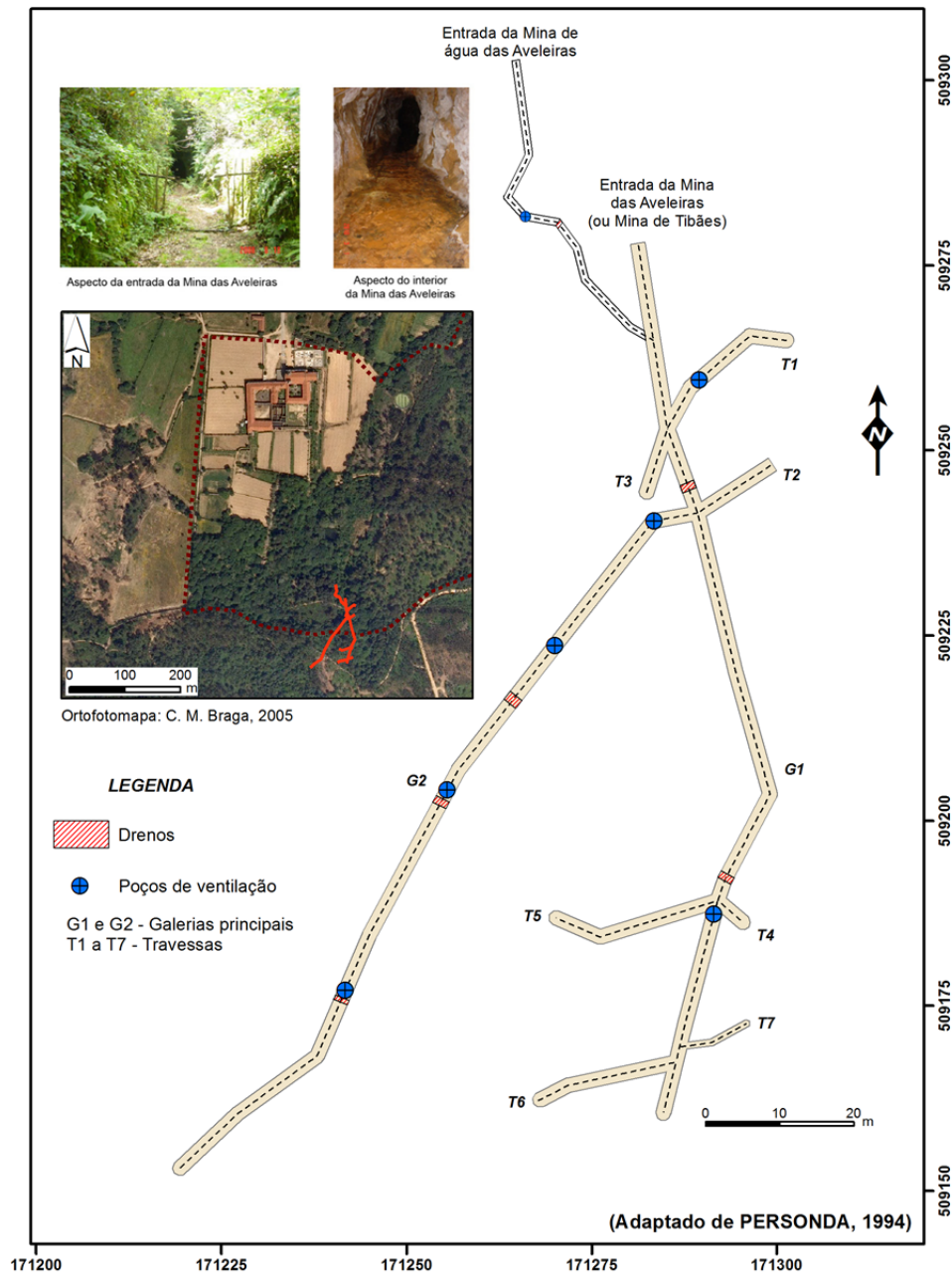


Figura 35. Planta do traçado subterrâneo da mina das Aveleiras, Tibães: galerias, travessas e poços de ventilação (adaptado e actualizado de Personda, 1994) – in: Lopes (2012).

O objecto do estudo geotécnico foi a galeria principal G2 e a parte terminal da galeria principal G1 (Figura X), visto que o tramo inicial da G1 (cerca 75m) foi anteriormente estudado em detalhe por LABCARGA (2007/2008), Neto (2007) e Ramos (2009). De referir ainda na categoria de estudos técnicos prévios, os relatórios técnicos da lavra da mina de Tibães da autoria de Lagoa (1941, de Fonseca (1943), de Pousada (1947), o relatório hidrogeológico da Personda (1994) e as dissertações de Flor Pereira (2010) e de Lopes (2012) em que apresentam uma sùmula de apontamentos diversos sobre o contexto geo-patrimonial envolvente e a rede geo-hidráulica de Tibães. Além destes importantes documentos há uma sùrie de publicações científicas de interesse, a saber: Lopes et al. (2008), Meixedo et al. (2011), Trigo et al. (submt).

A galeria principal G2 apresenta dimensões equivalentes às da galeria G1, constituindo um tramo com cerca de 110 m de extensão, e aquela donde provém grande parte da água circulante na mina e onde se encontra a galeria da nascente das Aveleiras (T7). A galeria principal G1 é interceptada por quatro poços de ventilação, realçando-se que um deles, com cerca de 8 m de altura (com um piso superior), do qual circula muita água, conduzida para o chão da galeria G2 através de um tubo de polipropileno (Personda, 1994). A parte terminal da galeria G1 tem cerca de 45 m de comprimento, é interceptada por um poço de ventilação e pelas travessas T5, T6 e T7. O chão desta galeria encontra-se na maior parte da sua extensão coberto de água, nalguns locais com cerca de 50 cm de altura.

Inicialmente, procedeu-se, entre Abril a Maio de 2012, ao levantamento geológico mineiro de pormenor (hasteais, teto e chão das galerias) para se definir o quadro geológico estrutural, seguindo-se o levantamento geotécnico mineiro, em particular a cartografia da rede de discontinuidades do maciço rochoso heterogéneo e a descrição dos parâmetros geológico-geotécnicos das superfícies estruturais e da matriz rochosa. Em ambos os levantamentos aplicou-se a técnica da amostragem linear. Procedeu-se, complementarmente, a ensaios geomecânicos “in situ” (ensaio esclerométrico) sobre as superfícies estruturais do maciço rochoso para se determinar a resistência à compressão uniaxial. Numa fase posterior, foi efectuada uma campanha de recolha de material-rocha (cerca de 50 kg) para a realização em laboratório do ensaio de carga pontual (PLT), (Figura 36).



Figura 36. (A) entrada principal da Mina das Azeleiras; (B) aspecto da galeria G2, com a *scanline*; (C) realização do ensaio esclerométrico; (D) exemplo de material-rocha recolhido para o ensaio PLT.

No total foram cartografados *in situ* 237 planos de descontinuidade e realizadas 47 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico com martelo Schmidt, tipo L). Além disso, foram ensaiados em laboratório 31 provetes recorrendo ao ensaio de carga pontual.

Todos os dados geológico-geotécnicos foram compilados, uniformizados e tratados de forma exaustiva em duas bases de dados dinâmicas, criadas em Microsoft® Excel 2007 – SCANGEODATA|BGD e SCHMIDTDATA|UCS (Fonseca et al. 2010; Galiza et al., 2011 a,b), (Figura 37).

A análise estatística das discontinuidades foi efectuada com recurso ao programa geoinformático Dips v5.1 da RocScience® (licença LABCARGA|ISEP), o qual permitiu a definição das principais famílias de discontinuidades. Numa fase posterior, foi realizado o estudo da compartimentação do maciço rochoso com vista ao zonamento geotécnico e geomecânico do maciço rochoso, bem como à aplicação das classificações geomecânicas.

Aspetos históricos sobre a mina de Tibães

A mina das Aveleiras (ou Mina de Tibães), inicialmente escavada para o abastecimento de água ao Mosteiro de Tibães, foi objecto de intensa exploração de volfrâmio entre os anos 40 e 60 do Século XX. Devido a esse facto, a mina das Aveleiras, ao contrário das outras minas existentes na área da Cerca do Mosteiro de Tibães (e.g. Mina de S. Bento, Mina da Cabrita), tem duas entradas (ver Figura 36), uma das quais de grande extensão, sendo considerada como entrada principal ligada à antiga exploração de volfrâmio, e uma outra de menores dimensões (ca. 0,70 x 1 m) relacionada com a mina de água (Lopes, 2012).

Desde 1632 são conhecidas referências alusivas a trabalhos de encanamento das águas da Mina de água da Cabrita para o Mosteiro. Existem também referências, datadas do período de 1776-1778, nos arquivos do Mosteiro de Tibães, em que os frades beneditinos procederam à reformada denominada “fonte das Aveleiras”, sendo construído, entre 1795-1797, um lago no sítio das Aveleiras com cantaria a toda a volta, com cascata e bancos laterais. O lago era alimentado por quatro novas minas de água, que também alimentavam um engenho de serra acabado de construir.

Nos anos 40, do Século XX, o substrato rochoso da área do monte de S. Gens, em Tibães, é palmilhado por pesquisadores em busca do volfrâmio motivado pelas cotações excepcionais deste minério no período da Segunda Grande Guerra Mundial (Vilar, 2008). Em 20 de Janeiro de 1940 foi efetuado o registo na Câmara Municipal de Braga e tendo sido requerido à sociedade por cotas “Silva, Barbosa & Marques, Lda” (Porto) a concessão da mina de volfrâmio denominada de “Tibães”, situada na freguesia de Mire de Tibães. A Direção Geral de Geologia e Minas (DGGM) atribuiu, em 12 de Abril de 1948, o alvará nº 2314 (DGMSG, 1962) à sociedade supracitada a concessão da exploração da mina de volframite denominada “Tibães”.

No período de 1941 a 1963 o jazigo de volframite desta mina, de pequenas dimensões, sofreu intensa exploração, especialmente no período da última grande guerra mundial, muito embora não oferecesse especiais condições económicas. As cotações excepcionais permitiram, assim, um grande volume de trabalhos que conduziu, praticamente, ao esgotamento do jazigo

mineral (Lagoa, 1941; Fonseca, 1943; Pousada, 1947). Porém, esta mina foi envolta em alguma polémica, devido a vários contenciosos judiciais relativos ao seu registo, desde o seu arranque até ao seu fecho nos anos 60, do Século XX. Assim, por despacho ministerial de 8 de Outubro de 1963 a concessão mineira de Tibães nº 2314 é declarada campo livre para novos registos a área nela consignada. Os dados da Delegação Regional da Industria e Energia do Norte indicam, entre 1940 e 1962, uma produção de 12200 toneladas de minério em Tibães (Teixeira et al., 1973).

Geologia e Geotecnia Subterrânea da Mina das Aveleiras

Como se referiu anteriormente, procedeu-se ao estudo geológico-geotécnico, recorrendo à técnica de amostragem linear, do hasteal direito da galeria principal G2 (tramo com 110 m) e os 45m finais do hasteal direito galeria principal G1 da mina das Aveleiras. Todavia, procedeu-se a inspecções sistemáticas do hasteal esquerdo, teto e chão da galeria; caso se justificasse executou-se, nessas partes da mina, um esboço cartográfico dos aspectos geológicos relevantes.

O maciço rochoso subterrâneo inspeccionado reflete globalmente a geologia de superfície e evidencia, de uma forma cabal, a existência de estruturas filonianas quartzosas e de filões aplitóides quartzo-feldspáticos. Assim, do ponto de vista geológico, o maciço estudado caracteriza-se, globalmente, como sendo de natureza metassedimentar, de granulometria fina, micáceo, com foliações tectonometamórficas (xistosidade e clivagem de fractura) e com intercalações de veios quartzosos. Foi identificado na Galeria 2 uma mancha de granito, de grão fino a médio. De uma maneira geral o maciço encontra-se medianamente alterado a pouco alterado e com elevado grau de descontinuidades.

Nos hasteais das galerias cartografadas reconheceram-se as seguintes unidades litológicas (LABCARGA, 2007/08):







- *Corneanas* – metapelíticas e quartzosas, de tonalidade castanha, com abundantes intercalações de segregações quartzosas, conferindo à rocha uma textura siliciosa, compacta e maciça. As rochas apresentam uma xistosidade penetrativa bem desenvolvida, com uma orientação média N15° a 45°W e N30°E;
- *Filões e massas de quartzo* – estas estruturas estão, por vezes, brechificadas, com possança variável entre 0,5 e 1 m, com mineralização associada em volframite, pirite, arsenopirite. Foram registados filões com uma extensão superior a 10m;
- *Filões e massas aplíticas e/ou pegmatíticas quartzo-feldspáticas* – são estruturas com grão médio a fino, são a pouco alterados (W_{1-2}); com possanças médias idênticas aos filões de quartzo;

-
- Granito moscovítico de granularidade fina a média, são a muito pouco alterado (W_1), de tonalidade esbranquiçada-amarelada a rosada, nas zonas mais ricas em feldspato. Esta unidade foi apenas cartografada na galeria G2.

As duas amostras de material-rocha aplitóide e granítico recolhidas na galeria G2 para a realização do ensaio de carga pontual (PLT) – TB-G2.1 e TB-G2.2 – foram submetidas a uma análise geoquímica dos principais elementos maiores, bem como de alguns dos elementos menores (Quadro 21). Estas análises foram realizadas no Laboratório de fluorescência de raio-X do Centro GEOBIOtec da Universidade de Aveiro. Com o intuito de estabelecer uma comparação, incluem-se duas análises geoquímicas características do granito de Gondizalves (Ferreira et al., 2000), unidade geológica plausivelmente equivalente ao granito moscovítico que ocorre na galeria G2.

Segundo Lopes (2012), em termos geoquímicos globais as amostras metassedimentares enquadram-se nas litologias identificadas, sendo de destacar que o xisto argiloso, por comparação com os quartzofilitos e as corneanas quartzosas, apresentam valores mais elevados de Al_2O_3 , de K_2O e valores mais baixos de SiO_2 , de CaO e de Na_2O . Há uma nítida diferenciação geoquímica das corneanas quartzosas das restantes litologias. Quanto às análises características do granito de Gondizalves, os índices observáveis no Quadro 22, permitem estabelecer um certo grau de proximidade com a amostra de granito aflorante na Galeria 2 (TB-G2.2).

Quadro 21. Análise geoquímica de 6 amostras características das zonas geotécnicas da Mina das Aveliras (Tibães). As análises das amostras TB-G1.1. a TB-G1.4 foram compiladas de Lopes (2012) e as análises geoquímicas das amostras TB-G2.1 e TB-G2.2 foram realizadas no âmbito desta dissertação.

	TB-G1.1	TB-G1.2	TB-G1.3	TB-G1.4	TB-G2.1	TB-G2.2
Análise Geoquímica						
	Xisto argiloso	Quartzofilito	Metagrauvaque	Corneana metapelítica e quartzosa	Aplitóide quartzo-feldspático, grão médio a fino	Granito moscovítico, grão fino a médio
Elementos maiores (%)						
F	-	-	-	0,40	0,39	0,24
Na ₂ O	0,17	1,08	0,82	0,20	0,56	1,64
MgO	1,72	1,74	1,60	0,23	0,36	0,27
Al ₂ O ₃	29,63	16,66	18,03	16,45	19,75	15,22
SiO ₂	52,03	68,71	68,97	73,33	69,78	74,87
P ₂ O ₅	0,13	0,41	0,13	0,23	0,15	0,63
SO ₃	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	-
K ₂ O	3,16	3,06	1,29	4,34	4,80	3,90
CaO	0,12	0,40	0,49	-	0,16	0,40
TiO ₂	0,83	0,67	0,59	0,04	0,06	0,07
Fe ₂ O ₃	4,39	4,57	4,14	2,35	1,42	1,19
LOI	7,45	2,48	3,71	2,24	2,41	1,44
Elementos menores (ppm)						
Ba	1197,4	567,3	272,4	71,4	99,0	67,6
Rb	167,0	157,3	62,9	541,3	483,9	527,8
Sr	32,5	62,9	79,7	2,7	10,7	29,6
Cr	192,7	75,0	68,7	19,0	12,8	18,0
Zr	240,1	225,1	190,2	12,1	16,7	8,1
Y	42,2	23,1	22,8	nd	nd	nd

Quadro 22. Análise geoquímica de duas amostras do granito de Gondizalves (Ferreira et al., 2000) bem como da amostra TB-G2.2 do granito moscovítico aflorante na galeria G2 (Mina das Aveliras).

Análise Geoquímica	Granito de Gondizalves		TB-G2.2
Elementos maiores (%)			
SiO ₂	73,95	74,50	74,87
Al ₂ O ₃	15,40	14,80	15,22
Fe ₂ O ₃	0,66	0,53	1,19
MnO	0,02	0,01	-
MgO	0,10	0,01	0,27
CaO	0,40	0,35	0,40
Na ₂ O	3,19	3,93	1,64
K ₂ O	3,93	3,92	3,90
TiO ₂	0,07	0,02	0,07
P ₂ O ₅	0,34	0,48	0,63
Elementos menores (ppm)			
Ba	12,00	<3	67,6
Rb	562,00	567,00	527,8
Sr	13	12	29,6
Cr	-	-	18,0
Zr	45,0	21,0	8,1
Y	6,0	4,0	-

3.3. Parâmetros geológico-geotécnicos

Seguidamente apresentar-se-á uma análise global das características geológico-geotécnicas da galeria principal G2. Remete-se para o 3.2 a descrição pormenorizada do tramo cartografado da galeria principal G1, uma vez que a litologia é monótona, ocorrendo apenas corneanas quartzosas e/ou metapelíticas com algumas intercalações de filões de quartzo e de estruturas aplitóides quartzo-feldspáticas.

A galeria G2, tal como foi referido anteriormente, apresenta uma extensão de cerca de 110 m (Figura 35). Os primeiros 81 m têm uma direcção aproximada de N15º-30ºE e correspondem às corneanas quartzosas e/ou metapelíticas com intercalações de filões de quartzo

e aplitóides. Neste tramo foram, no hasteal direito, recolhidos dados, com recurso à técnica de amostragem linear, referentes a um universo de 138 descontinuidades (Anexo 1) e 26 estações geomecânicas (Anexo 2). O segundo tramo tem 29 m, apresentando uma direção aproximada de N40º-50ºE, no qual ocorre o granito moscovítico, tendo sido cartografadas 58 descontinuidades e realizadas 9 estações geomecânicas.

Grau de Alteração

Através da análise da Figura 38, verifica-se que, de uma forma geral (> 86%), o maciço metassedimentar encontra-se são a pouco alterado (W_{1-2}), mas tendencialmente W_2 para as corneanas e para os granitos W_1 , podendo ocorrer ocasionalmente faixas de corneanas, medianamente alteradas (W_3).

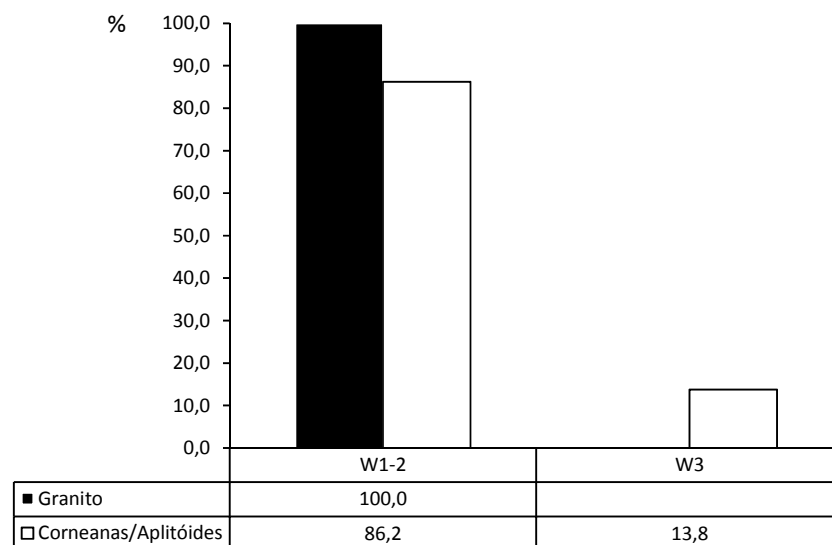


Figura 38. Grau de alteração do maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Tipos de descontinuidade

Verifica-se pela análise da Figura 39 que as descontinuidades correspondem, na sua maioria (>74%), a diaclases, no entanto na unidade granítica as falhas têm uma representatividade relevante (ca. 26%).

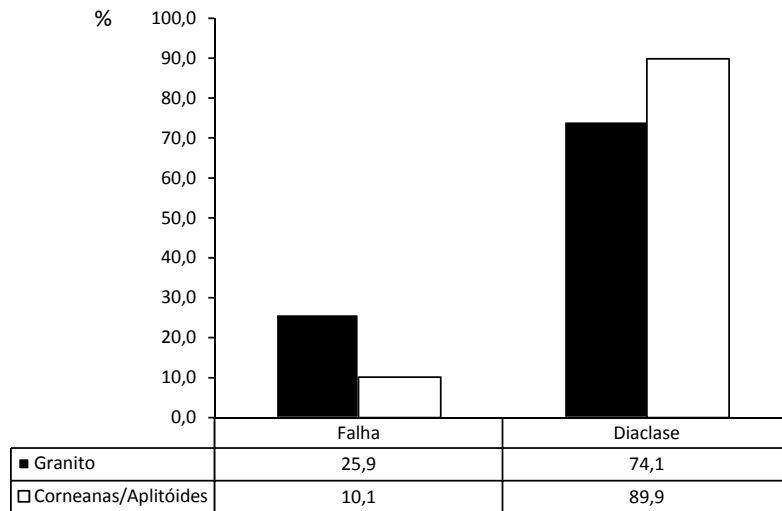


Figura 39. Tipos de descontinuidade presentes no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Famílias de descontinuidades

Com base na análise dos diagramas geológico-estruturais (Figura 40 e Figura 41) constata-se que as descontinuidades se agrupam em três famílias principais nas unidades das corneanas/aplitóides e do granito, a saber:

Corneanas/Aplitóides

Família 1: N 115° – 130°E; 75° – 85° NE/SW

Família 2: N 100° – 110°E; 45° – 60° NE

Família 3: N 155° – 165°E; 60° - 70° SW

Granito

Família 1: N 165° – 175°E; 70° – 85° SW/NE

Família 2: N 60° – 70°E; 60° – 75° SE

Família 3: N 130° – 140°E; 70° – 85° SW

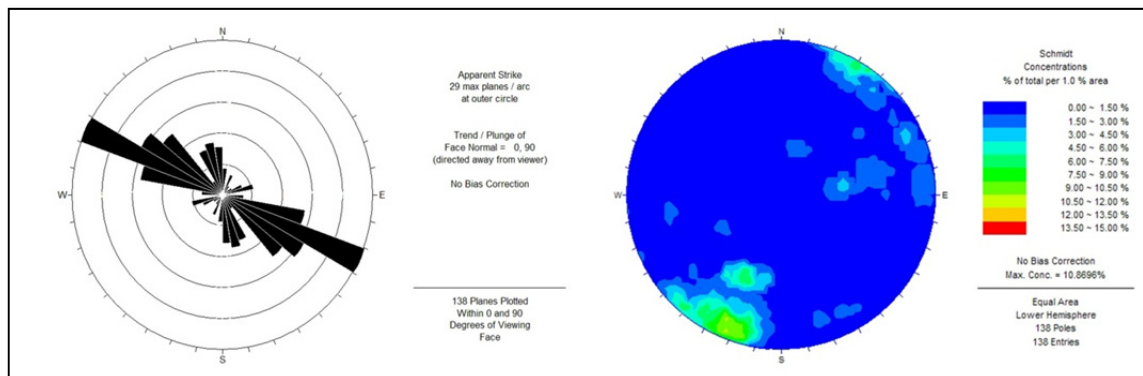


Figura 40. Diagramas de rosetas e de contorno estrutural relativos à unidade das corneanas/aplitóides (n=138) no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

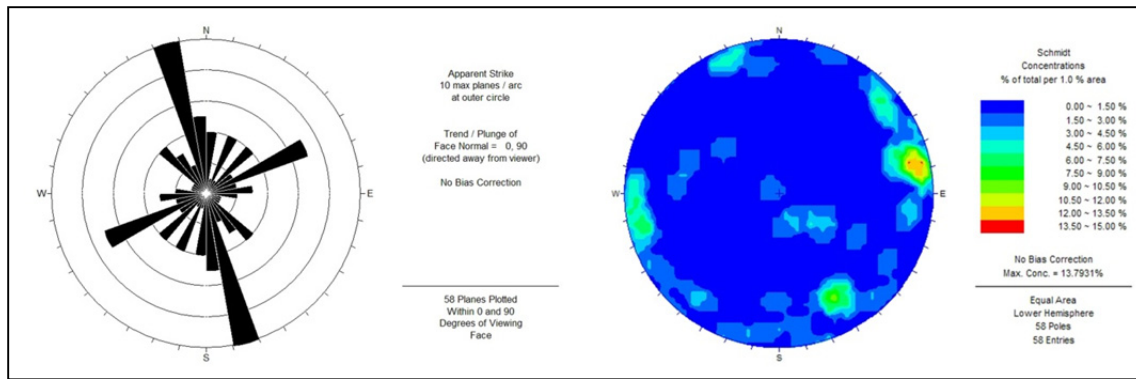


Figura 41. Diagramas de rosetas e de contorno estrutural relativos à unidade granítica (n=58) no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Abertura

No que toca à abertura (Figura 42), as descontinuidades identificadas no granito são, na sua maioria (ca. 78%), fechadas (valores < 0,5 mm), contudo com um valor médio global de 14,6 mm, face à percentagem de descontinuidades muito abertas (ca. 16%).

No caso das corneanas/aplitóides, as descontinuidades definem-se preferencialmente (ca. 54%) como abertas (valores entre 2,5 e 10 mm). Com menor representatividade, mas relevante (ca. 39%) ocorrem descontinuidades fechadas. O valor médio para esta unidade é de 7,6 mm.

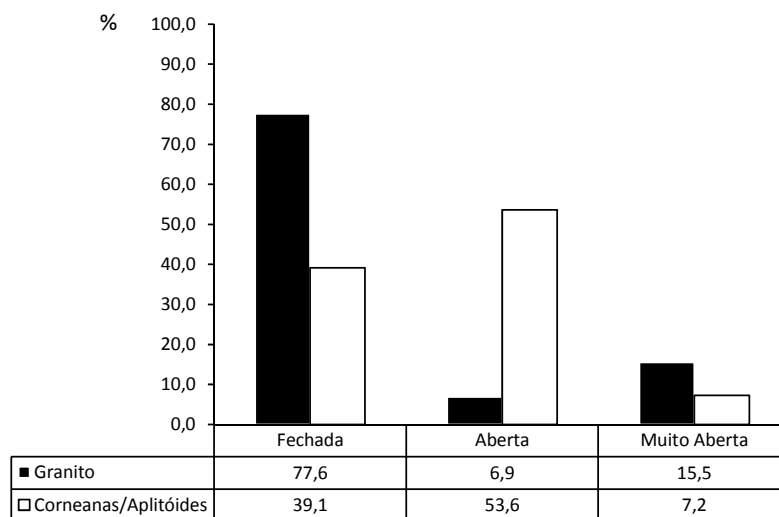


Figura 42. Abertura das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Grau de fracturação

Quanto ao grau de fracturação, é possível observar através da Figura 43, que as descontinuidades se apresentam medianamente afastadas (F₃, 20-60 cm) a afastadas (F₁₋₂, > 60 cm) nas corneanas/aplitóides, com um valor médio de 38,5 cm, e medianamente afastadas a próximas (F₄₋₅, < 20 cm) no granito, com um valor médio de 39,5 cm.

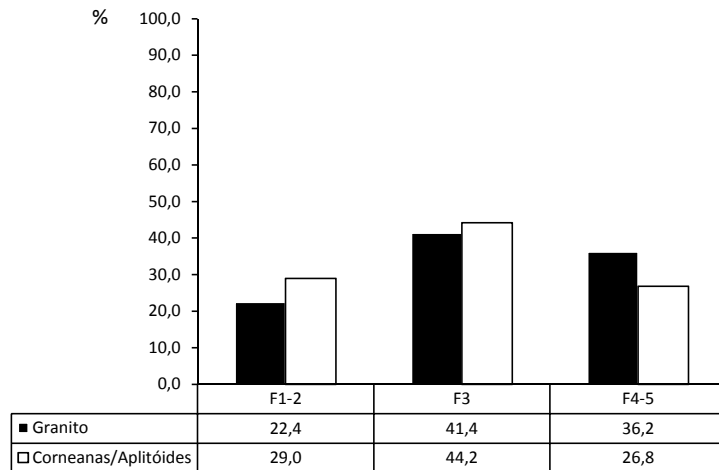


Figura 43. Grau de fracturação das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveliras).

Continuidade

As descontinuidades cartografadas, em ambas as unidades são descritas como pouco contínuas (1 a 3 m), como se pode constatar pela análise da Figura 44.

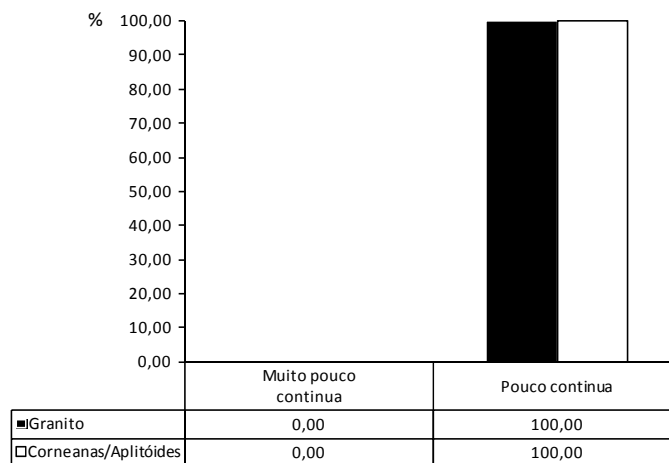


Figura 44. Continuidade das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveliras).

Terminação

No que diz respeito à terminação, é observável na Figura 45 a existência de um equilíbrio entre a terminação obscura (>32%) e a terminação noutra descontinuidade para ambas as unidades estudadas. Estes factos indiciam o elevado grau de penetratividade da fracturação registada.

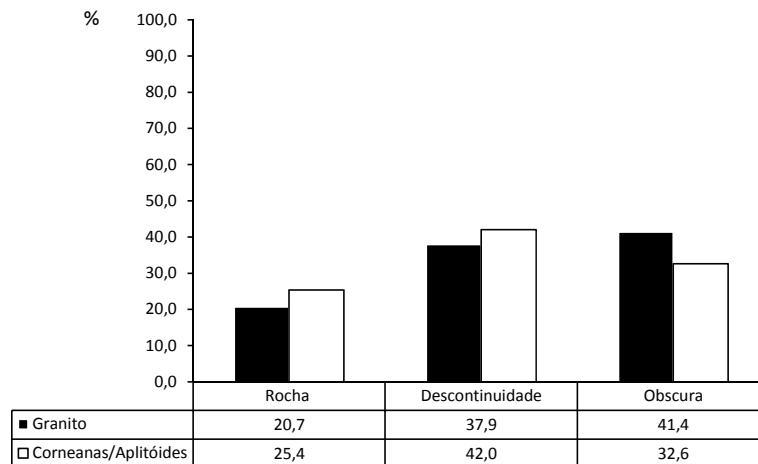


Figura 45. Terminação das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Curvatura

Em termos gerais (> 75%), a curvatura predominante é do tipo C_{1-2} , ou seja descontinuidades planas a ligeiramente curvas. No entanto, nas corneanas/aplitóides as descontinuidades curvas (C_3) apresentam alguma representatividade (ca. 23%), (Figura 46).

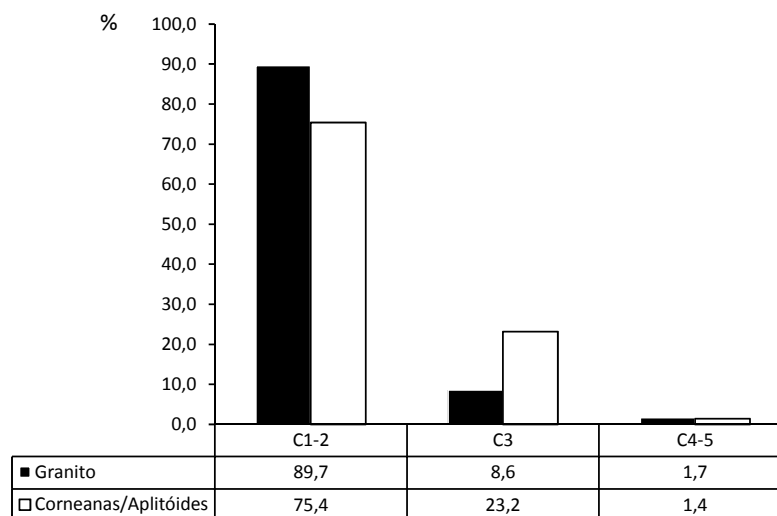


Figura 46. Curvatura das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Rugosidade

Regra geral, verifica-se no maciço em estudo uma clara predominância (> 65%) das descontinuidades lisas a algo rugosas, R₁₋₂. Contudo, as descontinuidades rugosas (R₃) ocorrem com alguma relevância (> 24%), (Figura 47).

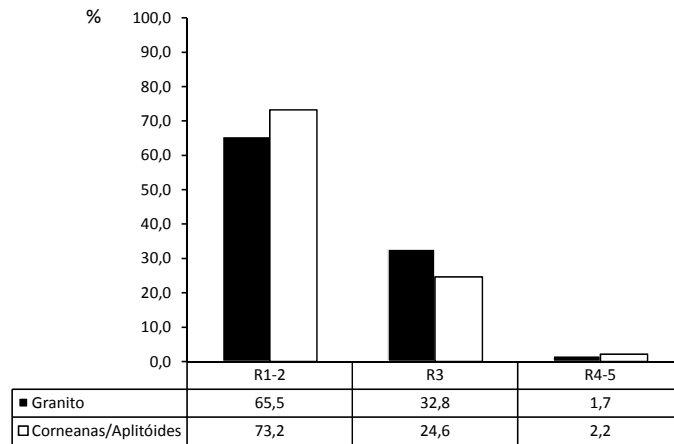


Figura 47. Rugosidade das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Preenchimento

Quanto ao tipo de enchimento (Figura 48) presente, apesar de as descontinuidades não apresentarem em geral qualquer preenchimento, os valores relativos às corneanas/aplitóides e aos granitos são claramente distintos. Assim, no granito domina com muita relevância (ca. 82%) o “nenhum” e nas corneanas/aplitóides, a percentagem de descontinuidades com enchimento argiloso é muito significativa (ca. 39%).

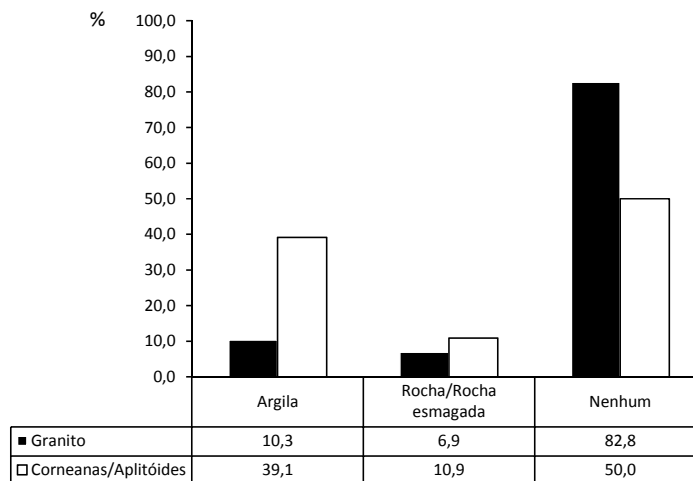


Figura 48. Preenchimento das descontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Presença de água

Relativamente à percolação de água nas discontinuidades, verifica-se que no granito o maciço se encontra maioritariamente (ca. 77%) ligeiramente húmido a húmido. Por outro lado, nas corneanas/aplitóides, o maciço apresenta-se ligeiramente húmido a húmido a seco (Figura 49).

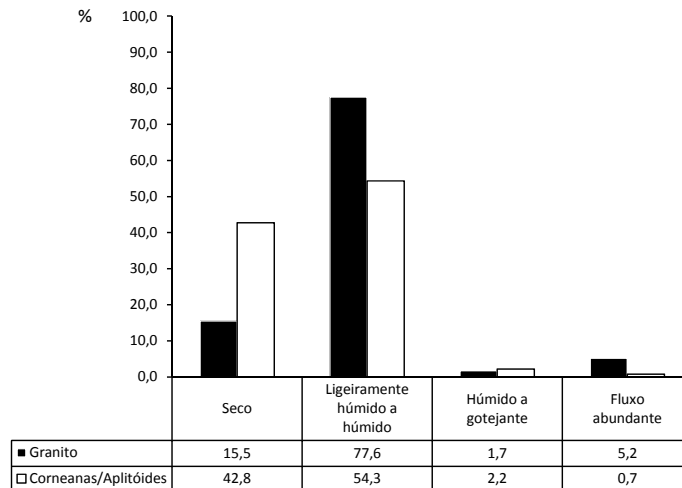


Figura 49. Presença de água nas discontinuidades no maciço da galeria G2 (Mina das Azeleiras).

Ensaios de resistência do maciço rochoso

A avaliação da resistência do maciço rochoso foi realizada por intermédio de dois ensaios: o ensaio esclerométrico (UCS – *Uniaxial Compressive Strenght*) realizado “*in situ*” nas superfícies de discontinuidades (Figura 50) e em laboratório, o ensaio de carga pontual (PLT – *Point Load Test*) na matriz-rochosa. O ensaio de carga pontual foi efectuado no Laboratório de Mecânica das Rochas do Centro de Prestação de Serviços Especializados Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do ISEP, tendo contemplado apenas material-rocha aplitóide e granítico.



Figura 50. Aspectos das realização do ensaio esclerométrico “*in situ*”.

Os dados obtidos das 26 estações geomecânicas na unidade das corneanas/aplitóides e das 9 estações geomecânicas realizadas no granito (ver Anexo 3) encontram-se reflectidos no gráfico da Figura 51.

Relativamente ao granito, este apresenta-se maioritariamente (80%) na classe de resistência elevada (S_2), com um valor médio de 89,6 MPa. Por seu turno, as corneanas/aplitóides partilham as classes de resistência elevada (S_2) e média (S_3), com um valor médio de 63,7 MPa. Contudo, é importante referir que os valores mais elevados desta unidade se devem aos aplitóides, com um valor médio de 107,3 MPa.

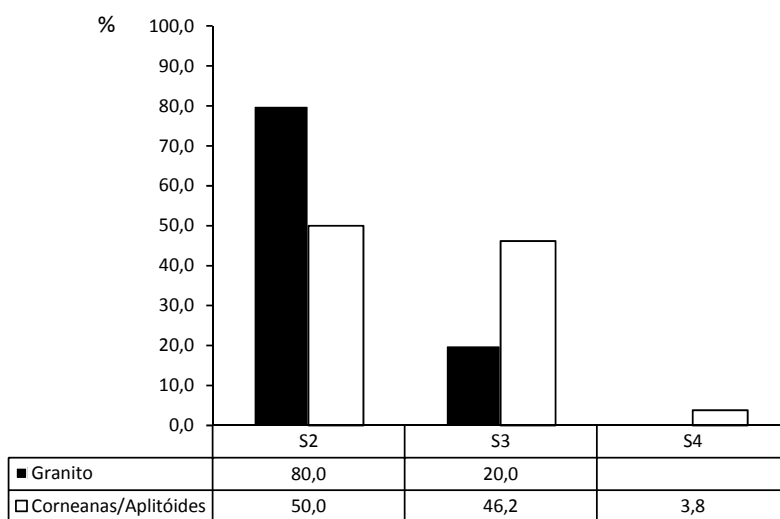


Figura 51. Avaliação da resistência à compressão do maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Previamente à preparação dos blocos rochosos de aplitóide (TB-G2.1) e de granito (TB-G2.2) para o corte em provetes para a realização do ensaio de carga pontual (PLT), foi efetuado o ensaio esclerométrico expedito para se estimar o valor da resistência à compressão uniaxial da matriz rochosa (Figura 52). Assim, foram ensaiadas várias superfícies dos blocos, tendo-se realizado, para cada superfície, 4 séries de 10 medições com o martelo de Schmidt, tipo L (Anexo 3).

Os resultados obtidos permitem concluir que os aplitóides se classificam na sua maioria (ca. 67%) na classe S_3 (resistência média), com um valor médio de 63,4 MPa, e o granito na classe S_2 (resistência elevada), com um valor médio de 98,9 MPa (Figura 53). Estes valores estão de acordo com os apresentados anteriormente para o ensaio esclerométrico *in situ*.



Figura 52. (A) Amostra de granito moscovítico (TB-G2.2); (B) Ensaio esclerométrico sobre a amostra TB-G2.2; (C) Amostra de aplitóide (TB-G2.1); (D) Ensaio esclerométrico sobre a amostra TB-G2.1.

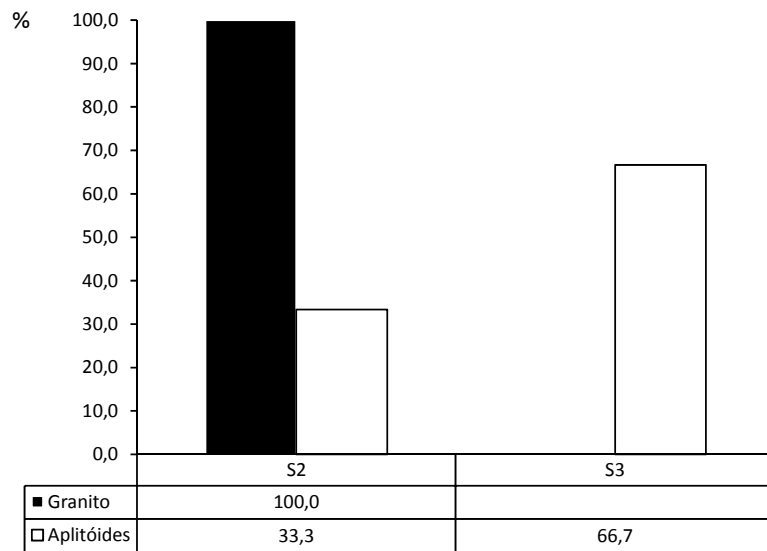


Figura 53. Avaliação da resistência à compressão uniaxial mediante o ensaio esclerométrico, em laboratório, na matriz rochosa para as amostras da galeria G2 (Mina das Aveliras).

Para a avaliação da resistência por intermédio do ensaio de carga pontual (PLT), os blocos foram previamente limpos e secos e, posteriormente, transformados em 31 provetes de forma prismática com as dimensões aproximadas de 100x50x50 mm, as quais foram medidas com um

paquímetro digital eletrônico Controls, modelo 82-C0109/1, tal como consta do procedimento previsto pela ISRM (1985). Durante a fase de preparação laboratorial dos provetes, nomeadamente o seu corte, surgiram algumas dificuldades, fruto do grau de alteração apresentado pelo material-rocha bem como da presença de veios quartzosos (Figura 54). Dos 31 provetes ensaiados apenas 5 foram considerados inválidos, 3 nos aplitóides e 2 no granito (Figura 55, Anexo 4).

Para o cálculo do $I_s(50)$, (índice de carga pontual) foram excluídos dos resultados, o valor mais elevado e o mais baixo nos aplitóides e os dois valores mais altos e mais baixos no granito. Para avaliar o valor da resistência à compressão uniaxial (UCS') através de $I_s(50)$, recorreu-se às propostas da ISRM (1985), i.e., pela via analítica ou algébrica (ver tópico 2.5.2).

Os resultados obtidos permitem concluir que o material-rocha correspondente aos aplitóides (TB-G2.1) tem um valor médio de $I_s(50)$ de 5,3 MPa, ao qual corresponde um UCS' 116,5 MPa, pelo que estes se classificam na classe de resistência S_2 (resistência elevada). Por outro lado, o material-rocha granítico (TB-G2.2) apresenta um valor médio de $I_s(50)$ de 7,5 MPa, ao qual corresponde um UCS' de 165,8 MPa, classificando-se assim na classe de resistência elevada. Estes valores são mais elevados do que os obtidos "*in situ*", podendo dever-se à presença de finos veios de quartzo no seio da matriz rochosa. Contudo, estes resultados encontram-se em sintonia com os anteriormente apresentados, pelo que os aplitóides e o granito se podem classificar como de resistência elevada (S_2).







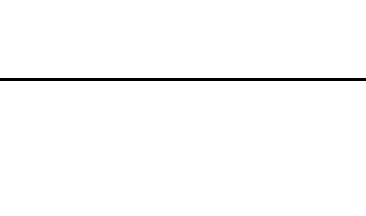
Figura 54. (A) Máquina de corte, LGMC|ISEP; (B) Preparação laboratorial das amostras na máquina de corte, LGMC|ISEP; (C) Amostras de aplitóide (TB-G2.1); (D) Amostras de granito (TB-G2.2); (E) e (F) Amostras TB-G2.1 e TB-G2.2 devidamente numeradas.



Figura 55. (A) Execução do ensaio de carga pontual; (B) Exemplo de ensaio inválido.

No Quadro 23 e no Quadro 24 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos referentes, respectivamente, à unidade das corneanas/aplitóides e ao granito.

Quadro 23. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos para a unidade das corneanas/aplitóides no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Galeria 2 - Mina das Aveleiras (Tibães)				Ilustrações
Tipo de litologia	Corneanas/Aplitóides			
Grau de alteração	W ₁₋₂ 86%	W ₃ 14%		
Estado de fracturação	N = 138 descontinuidades			
	Tipo de descontinuidade	Falha 10%	Diaclase 90%	
	Famílias principais	1 - N 115° – 130° E; 75° – 85° NE/SW 2 - N 100° – 110° E; 45° – 60° NE 3 - N 155° – 165° E; 60° – 70° SW		
Abertura	Fechada 39%	Aberta 54%	Muito aberta 7%	
	Valor médio = 7,6mm			
Grau de Fracturação (espaçamento / "fracture intercept", F)	F ₁₋₂ 29%	F ₃ 44%	F ₄₋₅ 27%	
	Valor médio = 38,5cm			
Continuidade	Pouco contínua 100%			
Terminação	Rocha 25%	Descontinuidade 42%	Obscura 33%	
Curvatura	C ₁₋₂ 75%	C ₃ 23%	C ₄₋₅ 1%	
Rugosidade	R ₁₋₂ 73%	R ₃ 25%	R ₄₋₅ 2%	
Preenchimento	Argila 39%	Rocha/Rocha esmagada 11%	Nenhum 50%	
Percolação	Seco 43%	Ligeiramente húmido a húmido 54%	Húmido a gotejante 2%	
			Fluxo abundante 1%	
Resistência à Compressão Uniaxial "in situ"	S ₂ 50%	S ₃ 46%	S ₄ 4%	
	Valor médio = 63,7 Mpa			
Resistência à carga pontual (PLT), nos Aplitóides	Valor médio de IS(50) = 5,29 MPa (S2)			

Quadro 24. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos para a unidade do granito no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras).

Galeria 2 - Mina das Aveleiras (Tibães)				Ilustrações
Tipo de litologia	Granito			
Grau de alteração	W ₁₋₂ 100%			
Estado de fracturação	N = 58 descontinuidades			
	Tipo de descontinuidade	Falha 26%	Diaclase 74%	
	Famílias principais	1 - N 165°– 175° E; 70° – 85° SW/NE 2 - N 60°– 70° E; 60° – 75° SE 3 - N 130°– 140° E; 70° – 85° SW		
	Abertura	Fechada 78%	Aberta 7%	
Grau de Fracturação (espaçamento / "fracture intercept", F)	Valor médio = 14,6mm			
	F ₁₋₂ 22%	F ₃ 41%	F ₄₋₅ 36%	
	Valor médio = 39,5cm			
Continuidade	Pouco contínua 100%			
Terminação	Rocha 21%	Descontinuidade 38%	Obscura 41%	
Curvatura	C ₁₋₂ 90%	C ₃ 9%	C ₄₋₅ 2%	
Rugosidade	R ₁₋₂ 66%	R ₃ 33%	R ₄₋₅ 2%	
Preenchimento	Argila 10%	Rocha/Rocha esmagada 7%	Nenhum 83%	
Percolação	Seco 16%	Ligeiramente húmido a húmido 78%	Húmido a gotejante 2%	
Resistência à Compressão Uniaxial "in situ"	S ₂ 80%		S ₃ 20%	
Resistência à carga pontual (PLT), no Granito	Valor médio = 89,6 Mpa			
	Valor médio de IS(50) = 7,54 MPa (S2)			

3.4. Zonamento geotécnico

A proposta de zonamento geotécnico do maciço rochoso foi elaborada com base nos seguintes critérios: heterogeneidade litológica, grau de alteração, grau de fracturação e grau de resistência. Além destes parâmetros foram registadas, descritas e cruzadas as características geológico-geotécnicas das superfícies estruturais (descontinuidades) e petrofísicas da matriz rochosa. Todos os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos foram obtidos e descritos segundo as recomendações e procedimentos propostos pela CFCFF (1996) e ISRM (2007). Complementarmente foram compilados e integrados todos os dados geológico-geotécnicos e geomecânicos avaliados pelo signatário desta dissertação, bem como toda a informação previamente publicada por LABCARGA (2007/2008), Neto (2007), Ramos (2009) e Lopes (2012).

A rede de galerias da mina das Aveleiras estudada no âmbito desta dissertação, como foi referido anteriormente, consta do seguinte: i) zonamento geotécnico da galeria 2 (110 m), ii) zonamento geotécnico da galeria 1 (tramo 2: 45 m), e iii) zonamento geotécnico revisitado da galeria 1 (tramo 2: 75 m), a partir das investigações de Neto (2007), Ramos (2009) e Lopes (2012). Para o efeito, foi realizado, inicialmente, uma inspeção e reconhecimento do maciço para se tomar contato com o setor de estudo e se definir a melhor estratégia do estudo. Numa fase seguinte, procedeu-se a um trabalho subterrâneo intenso, que envolveu mais de 8 dias, para as investigações de geotecnia mineira “in situ” e no laboratório de mecânica das rochas (LGMC|ISEP) procedeu-se à preparação das amostras para realização dos ensaios geomecânicos. Por fim, em gabinete, no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP) procedeu-se a todo o processamento, tratamento, análise e síntese da informação geológico-geotécnica, geomecânica e cartográfica.

Para cada zona geotécnica será apresentada uma descrição geral e uma síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos e, por fim, apresentar-se-á um perfil do zonamento geotécnico do maciço da Mina das Aveleiras. Previamente a este foi elaborado um levantamento geológico mineiro das galerias (hasteais, teto e chão) onde se reuniu toda a informação litológica e geológico estrutural. Este levantamento geológico inédito foi executado e disponibilizado por LABCARGA (H. I. Chaminé & M. J. Afonso). Nos levantamentos geotécnicos subterrâneos obteve-se a colaboração do colega Eng.º Rogério Pinheiro (LGMC|ISEP).

3.4.1. Galeria 2

Para a galeria 2 da Mina das Aveleiras, com uma extensão global de 110 m, foram definidas cinco zonas geotécnicas distintas, que se descrevem seguidamente.

ZG1.(G2)

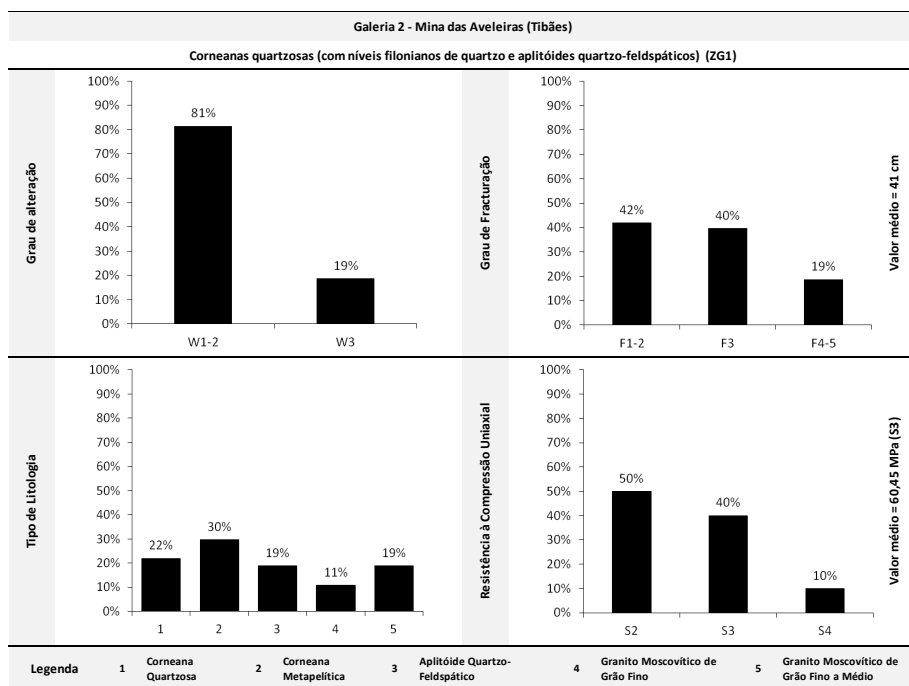
A Zona Geotécnica 1 – ZG1.(G2) – tem uma extensão total de 32,6 m, onde se registaram 43 descontinuidades, em que foram realizadas 10 estações geomecânicas e procedeu-se à amostragem do material-rocha aplitóide quartzo-feldspático para o ensaio de carga pontual, PLT (Quadro 25 e Quadro 26).

Nesta zona predominam as corneanas quartzosas (com níveis filonianos de quartzo e aplitóides quartzo-feldspáticos) são a pouco alteradas (W_{1-2}). Definiram-se três famílias principais de descontinuidades, a saber:

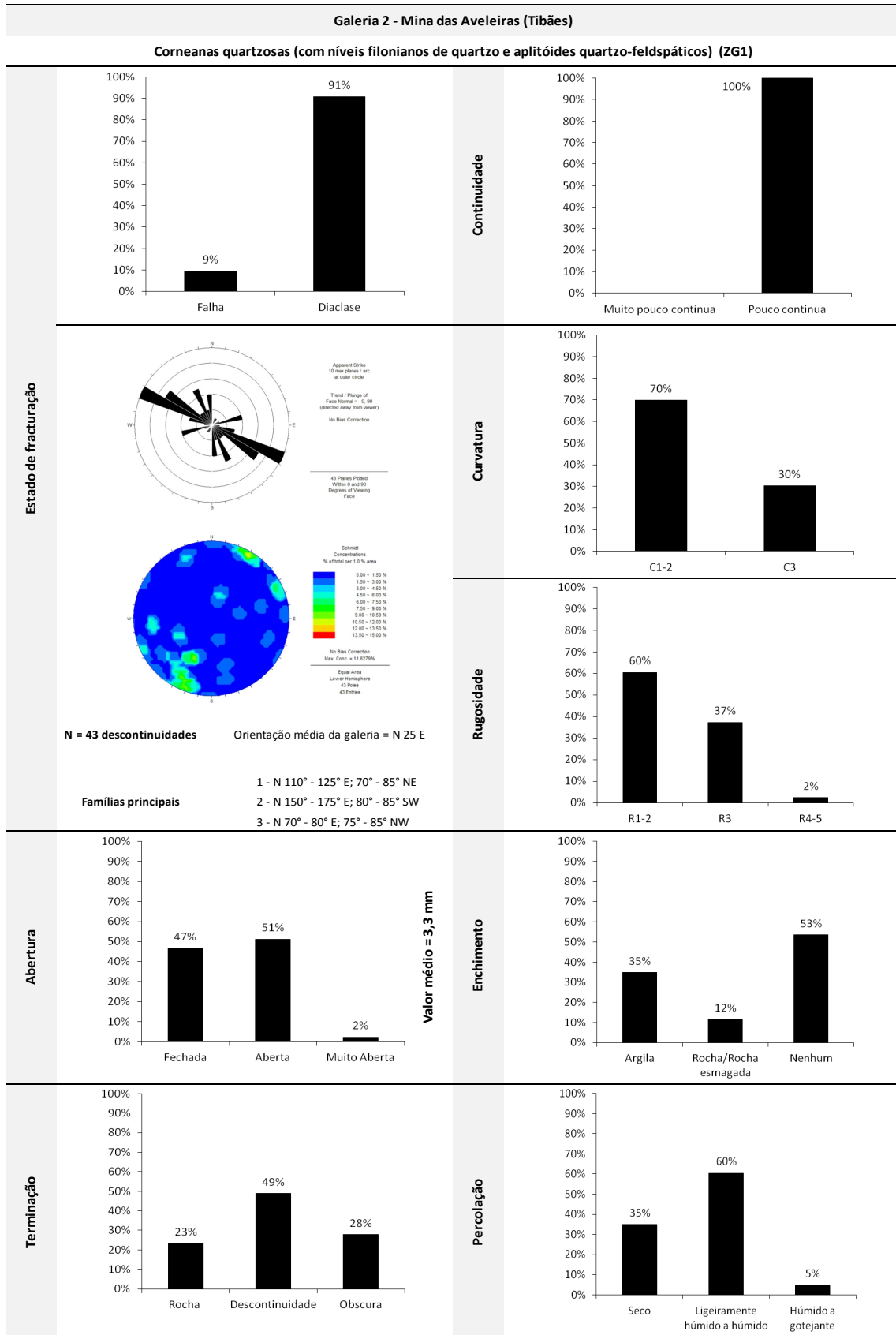
- N110°-125°E; 70°-85°NE
- N150°-175°E; 80°-85°SW
- N70°-80°E; 75°-85°NW

As descontinuidades apresentam um espaçamento afastado (F_2) a medianamente afastado (F_3), com um valor médio de 41 cm, em termos de “fracture intercept” (F). A resistência à compressão uniaxial é elevada (S_2), com um valor médio de 60,4 MPa e a resistência à carga pontual avaliada nos aplitóides apresenta um valor médio de $Is(50)$ de 5,3 MPa, correspondendo a uma resistência elevada.

Quadro 25. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG1.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveliras (Tibães).



Quadro 26. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG1.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveliras (Tibães).



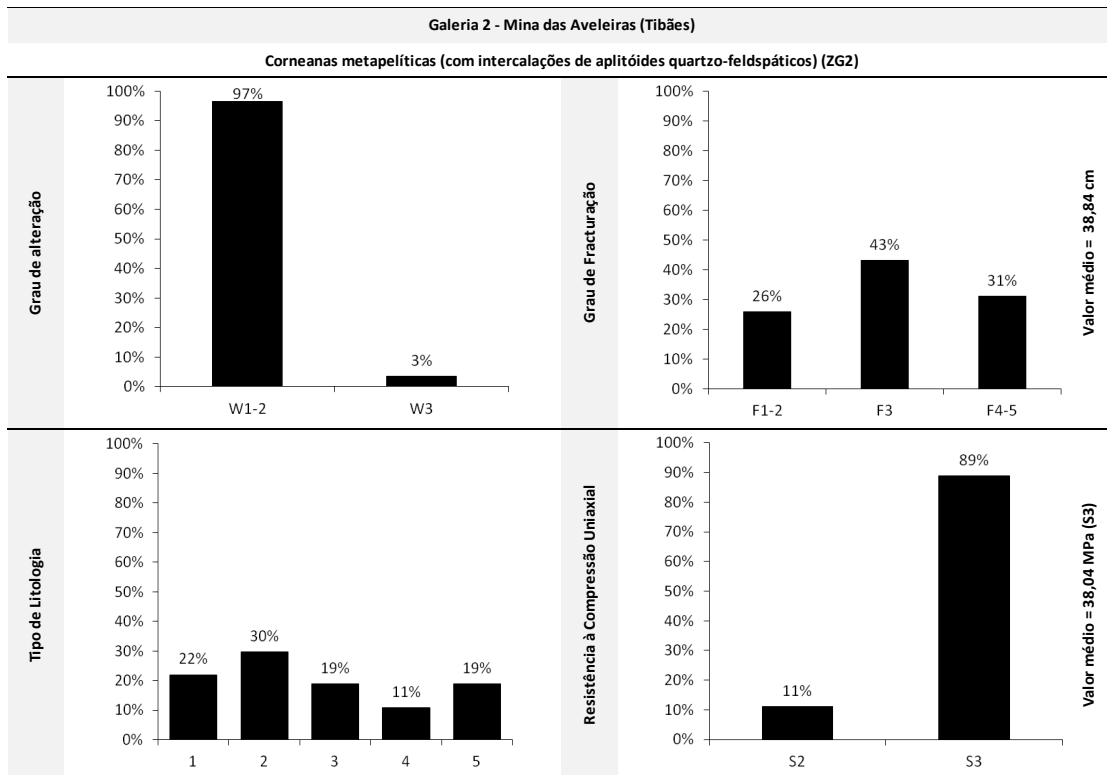
ZG2.(G2)

A Zona Geotécnica 2 – ZG2.(G2) – tem uma extensão total de 26,2 m, onde se registaram 58 descontinuidades e foram realizadas 9 estações geomecânicas (Quadro 27 e Quadro 28). Nesta zona dominam as corneanas metapelíticas (com intercalações de aplitóides quartzo-feldspáticos) sãs a pouco alteradas (W_{1-2}). Foram definidas três famílias principais de descontinuidades, a saber:

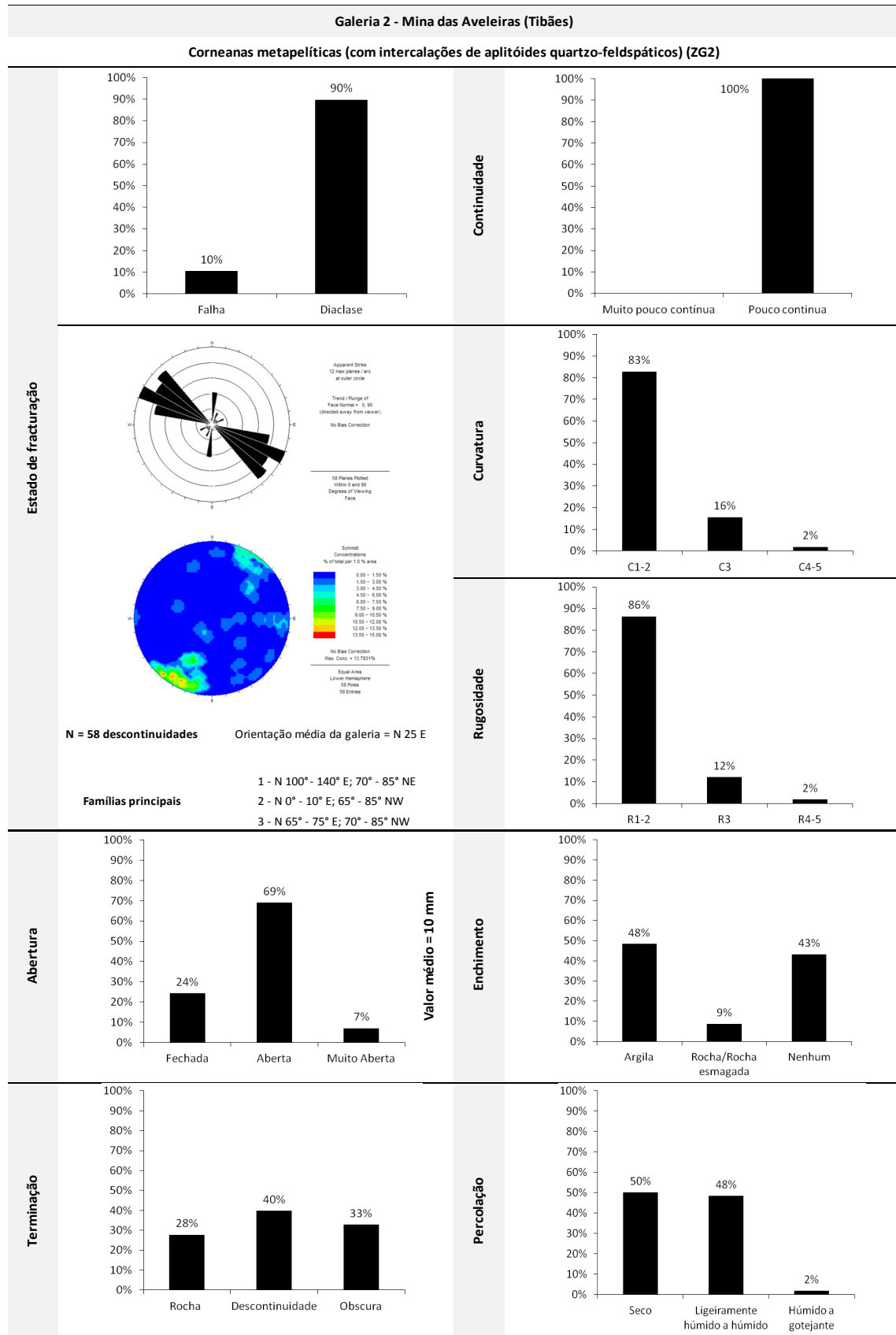
- N100°-140°E; 70°-85°NE
- N0°-10°E; 65°-85°NW
- N65°-75°E; 70°-85°NW

O espaçamento entre descontinuidades é medianamente afastado (F_3) a próximo (F_{4-5}), com um valor médio de 38,8 cm. Em termos de resistência à compressão uniaxial, esta zona classifica-se claramente na classe média (S_3), com um valor médio de 38 MPa.

Quadro 27. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG2 da Galeria 2 da Mina das Azeleiras (Tibães).



Quadro 28. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG2.(G2) da Galeria 2 da Mina das Azeleiras (Tibães).



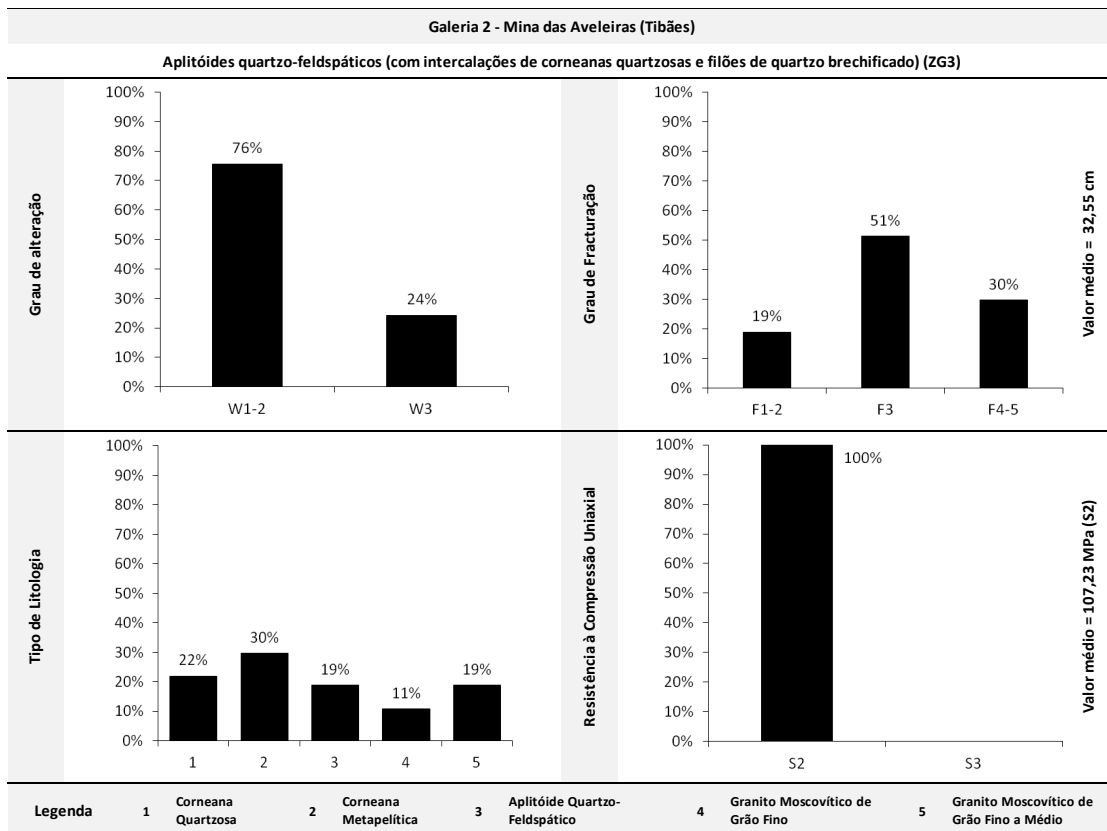
ZG3.(G2)

A Zona Geotécnica 3 – ZG3.(G2) – apresenta uma extensão total de 20,2 m, na qual se registaram 37 descontinuidades e foram realizadas 7 estações geomecânicas (Quadro 29 e Quadro 30). Esta zona é caracterizada pela predominância de aplitóides quartzo-feldspáticos (com intercalações de corneanas quartzosas e filões de quartzo brechificado) são a pouco alterados (W_{1-2}). Foram definidas três famílias principais de descontinuidades, a saber:

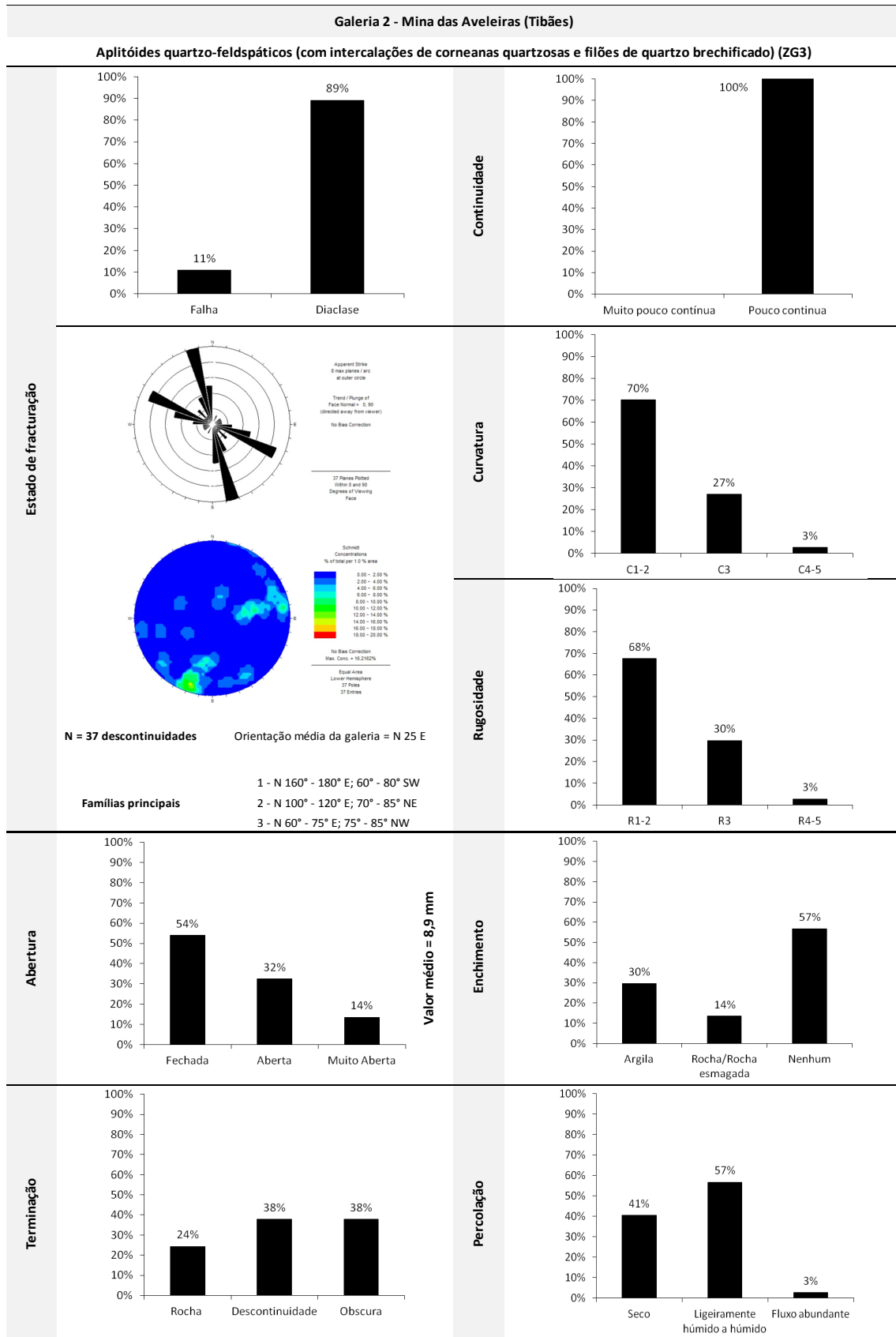
- N160°-180°E; 60°-80°SW
- N100°-120°E; 70°-85°NE
- N60°-75°E; 75°-85°NW

Relativamente ao espaçamento das descontinuidades, estas apresentam-se medianamente afastadas (F_3) a próximas (F_4), com um valor médio de 32,6 cm. A resistência à compressão uniaxial é elevada (S_2), com um valor médio de 107,2 MPa.

Quadro 29. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG3.(G2) da Galeria 2 da Mina das Azeleiras (Tibães).



Quadro 30. Síntese dos parâmetros das discontinuidades da zona geotécnica ZG3.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveliras (Tibães).



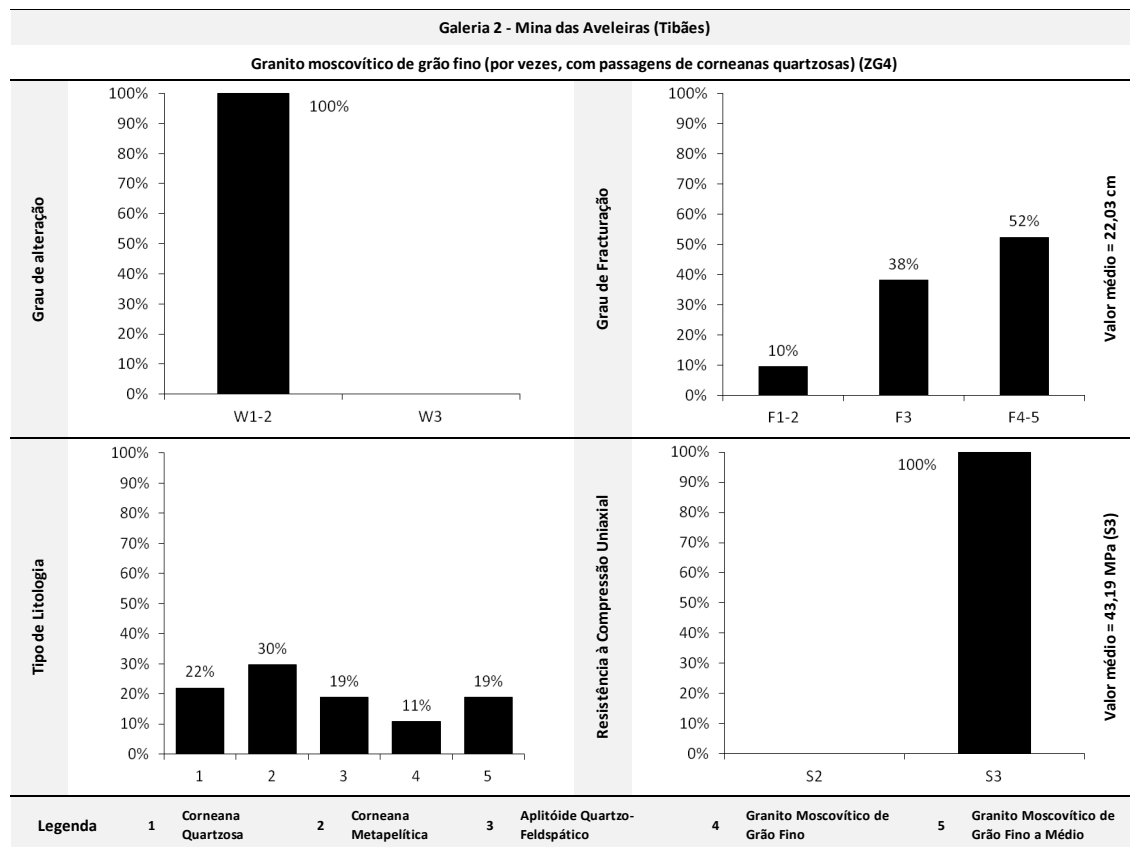
ZG4.(G2)

A Zona Geotécnica 4 – ZG4.(G2) – tem uma extensão total de 3,8 m, na qual se registaram 21 descontinuidades e foram realizadas 2 estações geomecânicas (Quadro 31 e Quadro 32). Nesta zona verifica-se o domínio do granito moscovítico de grão fino (por vezes, com passagens de corneanas quartzosas), são a muito pouco alterado (W_1). Foram definidas três famílias principais de descontinuidades, a saber:

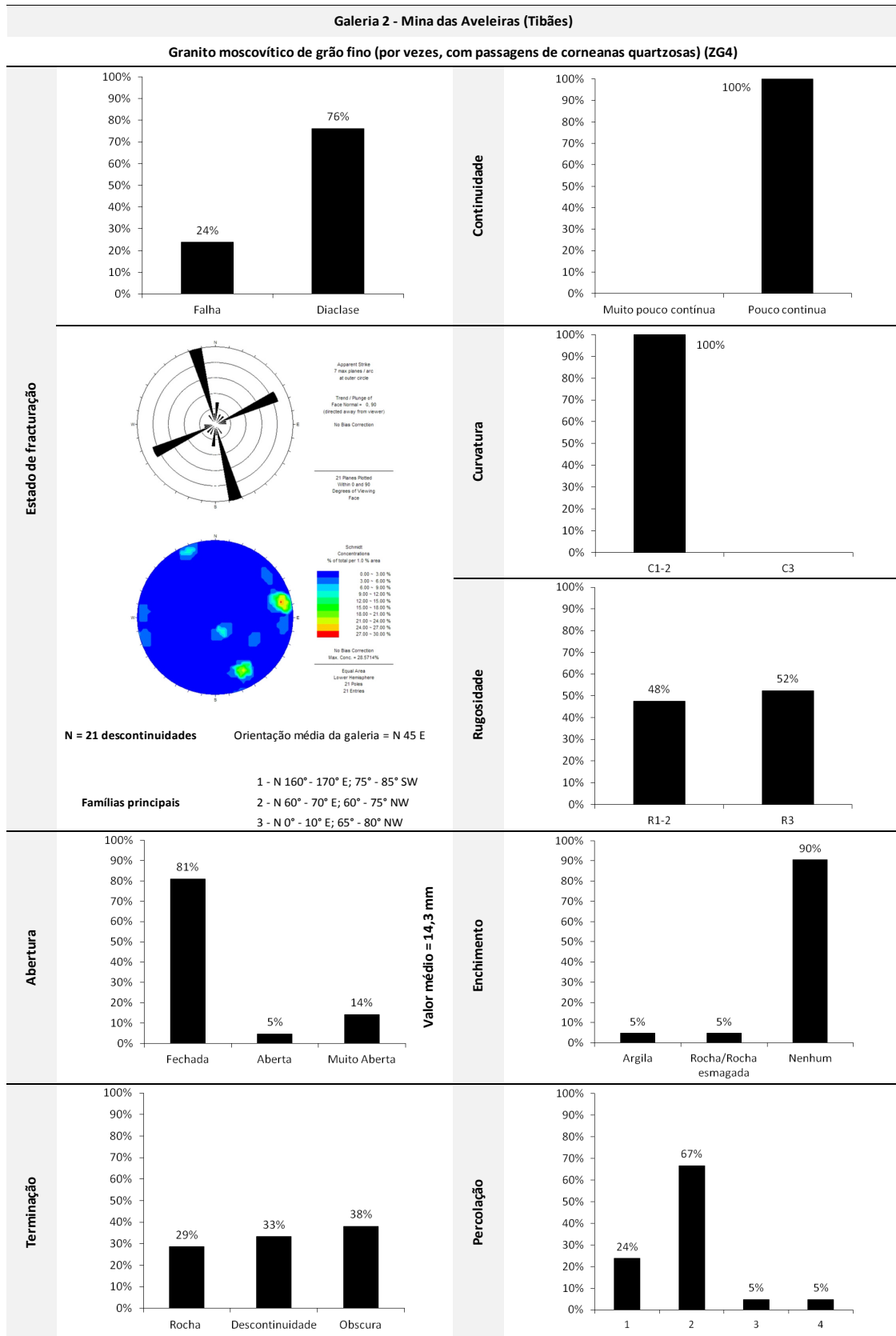
- N160°-170°E; 75°-85°SW
- N60°-70°E; 60°-75°NW
- N0°-10°E; 65°-80°NW

As descontinuidades apresentam-se próximas (F_4) a medianamente afastadas (F_3), com um valor médio de 22 cm, e a resistência à compressão uniaxial média é de 43,2 MPa, caracterizando o material-rocha na classe média (S_3).

Quadro 31. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).



Quadro 32. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4.(G2) da Galeria 2 da Mina das Avelheiras (Tibães).



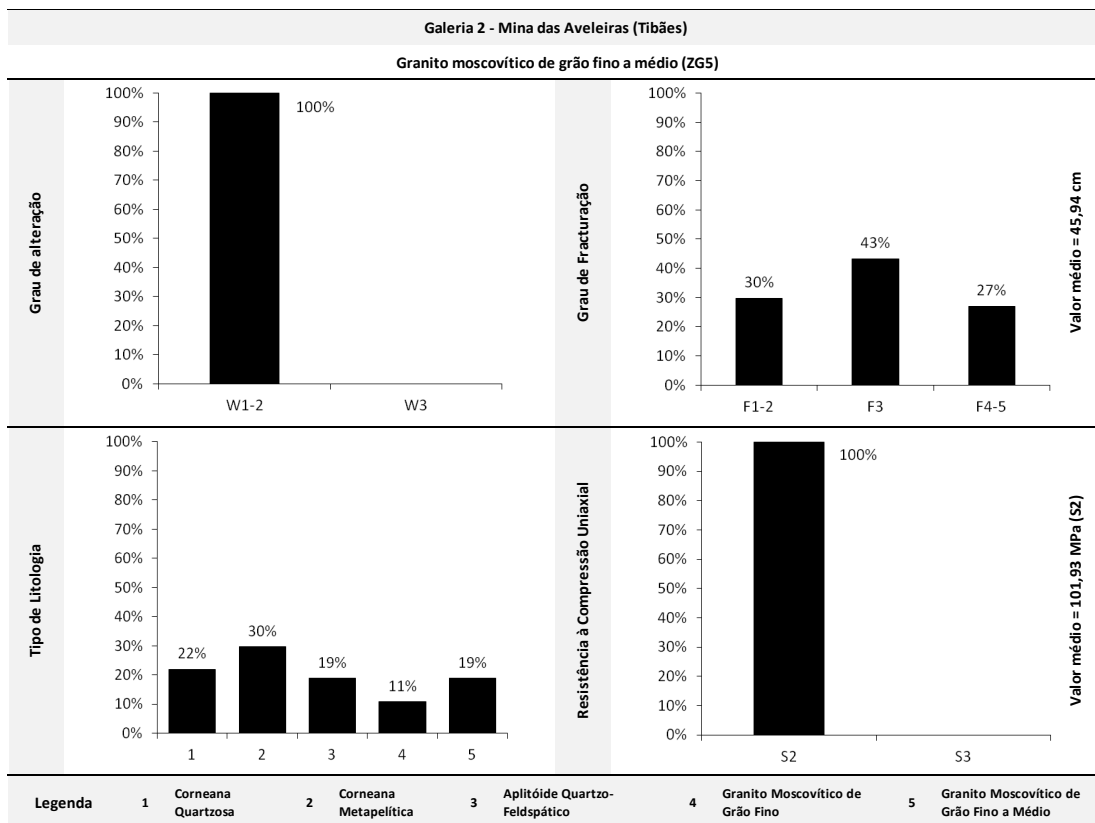
ZG5.(G2)

A Zona Geotécnica 5 – ZG5.(G2) – tem uma extensão total de 23,4 m, na qual se registaram 37 descontinuidades, foram realizadas 8 estações geomecânicas e foi amostrado material-rocha granítico para o ensaio PLT (Quadro 33 e Quadro 34). Nesta zona ocorre apenas o granito moscovítico de grão fino a médio, de são a muito pouco alterado (W_1). Definiram-se quatro famílias principais de descontinuidades, a saber:

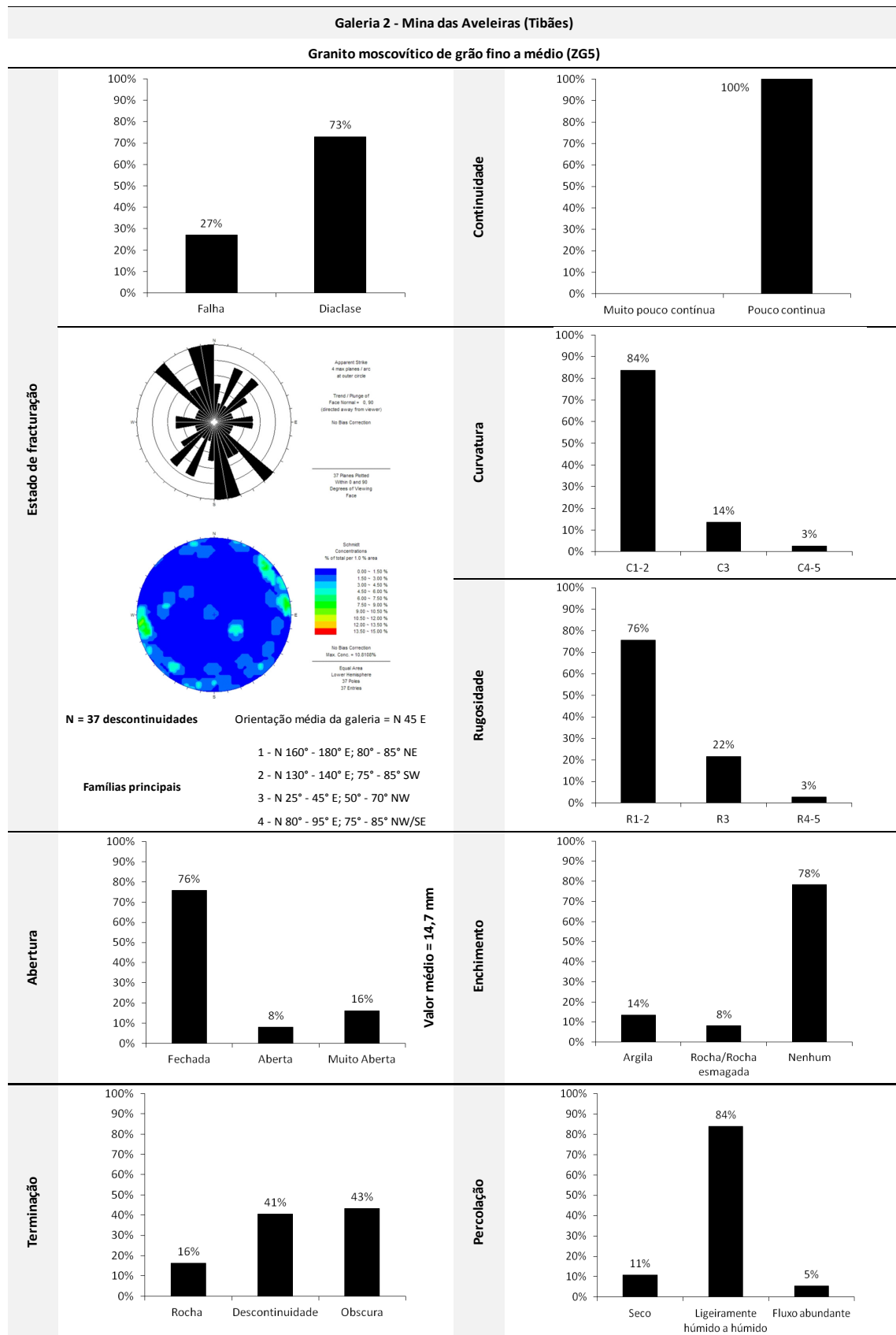
- N160°-180°E; 80°-85°NE
- N130°-140°E; 75°-85°SW
- N25°-45°E; 50°-70°NW
- N80°-95°E; 75°-85°NW/SE

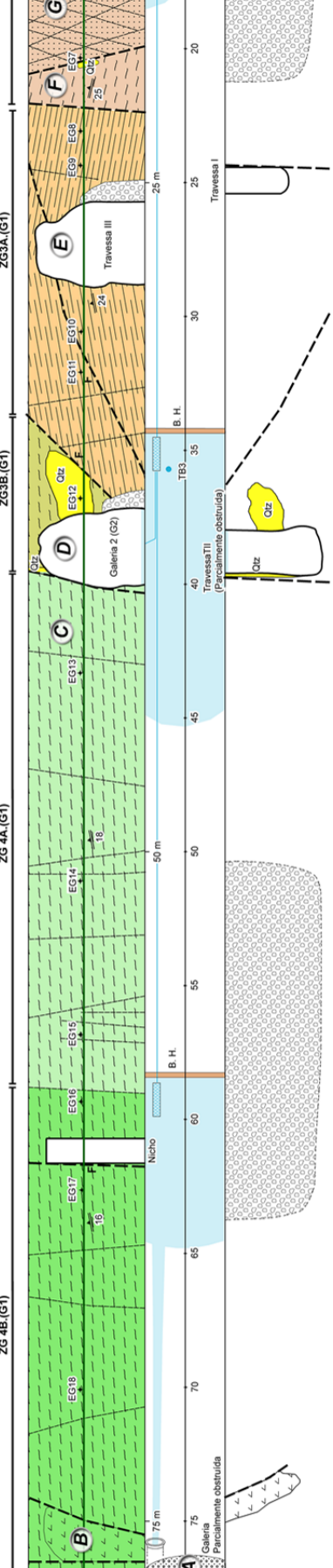
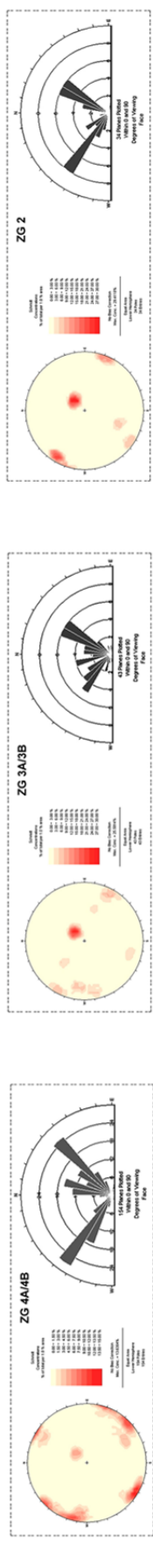
As descontinuidades apresentam um espaçamento medianamente afastado (F_3) a afastado (F_2), com um valor médio de 45,9 cm. Quanto à resistência à compressão uniaxial, esta é elevada (S_2), com um valor médio de 101,9 MPa. Relativamente à resistência à carga pontual, esta unidade apresenta, igualmente uma resistência elevada, com um valor médio de $I_s(50)$ de 7,5 MPa. Na Figura 56 apresenta-se uma proposta preliminar do zonamento geotécnico-geomecânico do maciço subterrâneo da Galeria 2 da Mina das Aveleiras.

Quadro 33. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG5.(G2) da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães).



Quadro 34. Síntese dos parâmetros das discontinuidades da zona geotécnica ZG5.(G2) da Galeria 2 da Mina das Azeleiras (Tibães).





Rochas metassedimentares (Silúrico):

- Corneanas metapelíticas e quartzosas
- Metagrauwaques
- Quartzofílios
- Xistos argilosos com alternâncias de quartzofílios
- Xistos argilosos

Filões e Massas:

- Quartzo
- Aplósidos: atóis e (ou) pegmatitos
- quartzo-feldspáticos

Estrutura:

- Falha
- Diáclise
- Xistoidade regional
- Estação geomecânica (UCS, PLT)
- Amostra análise físico-química e radiológica
- Barreira Hidráulica

Zonas Geotécnicas:

- ZG1 (G1): Xisto argiloso alterado e muito alterado (W4-5); espessamento medianamente atestado (F3) a próximo (F4-5); [40-20 cm]; resistência a compressão uniaxial baixa (UCS, $\sigma_{cr} < 18$ MPa, S4)
- ZGZ (G1): Quartzofílio com alternâncias de xisto argiloso, pouco alterado (W2), por vezes alterado (W4); espessamento medianamente atestado (F3) a próximo (F4-5); [30-15 cm]; resistência a compressão uniaxial baixa a média (UCS, σ_{cr} 15-35 MPa, S4 a S3)
- ZG3A (G1): Metagrauwaques e corneanas metapelíticas, medianamente alteradas (W3); espessamento medianamente atestado (F3); [25-50 cm]; resistência a compressão uniaxial baixa a média (UCS, σ_{cr} 15-40 MPa, S4 a S3)
- ZG3B (G1): Corneanas quartzosas, pouco a medianamente alteradas (W2 a W3); espessamento medianamente atestado (F3); [45-65 cm]; resistência a compressão uniaxial elevada (UCS, σ_{cr} 65-120 MPa, S2)
- ZG4A (G1): Corneanas metapelíticas, pouco a medianamente alteradas (W2 a W3);

Legenda das Fotografias:

- A - Alívio parcial da galeria principal (material argiloso e dístico, provavelmente dum inclinado da mina, junto a uma estrutura filoniana quartzosa)
- B - Filo de quartzo (mineralizado com volfrâmio)
- C - Corneanas metapelíticas
- D - Bifurcação das Travessas III e II (parcialmente obturada)
- E - Travessa IV (obstruída) em grauwaques
- F - Corneanas quartzosas
- G - Quartzofílios
- H - Caixa de falha em xisto argiloso

Dados geológico-estruturais:

Descontinuidades (diáclises, falhas, xistoidade, n=0, n=1, n=2)

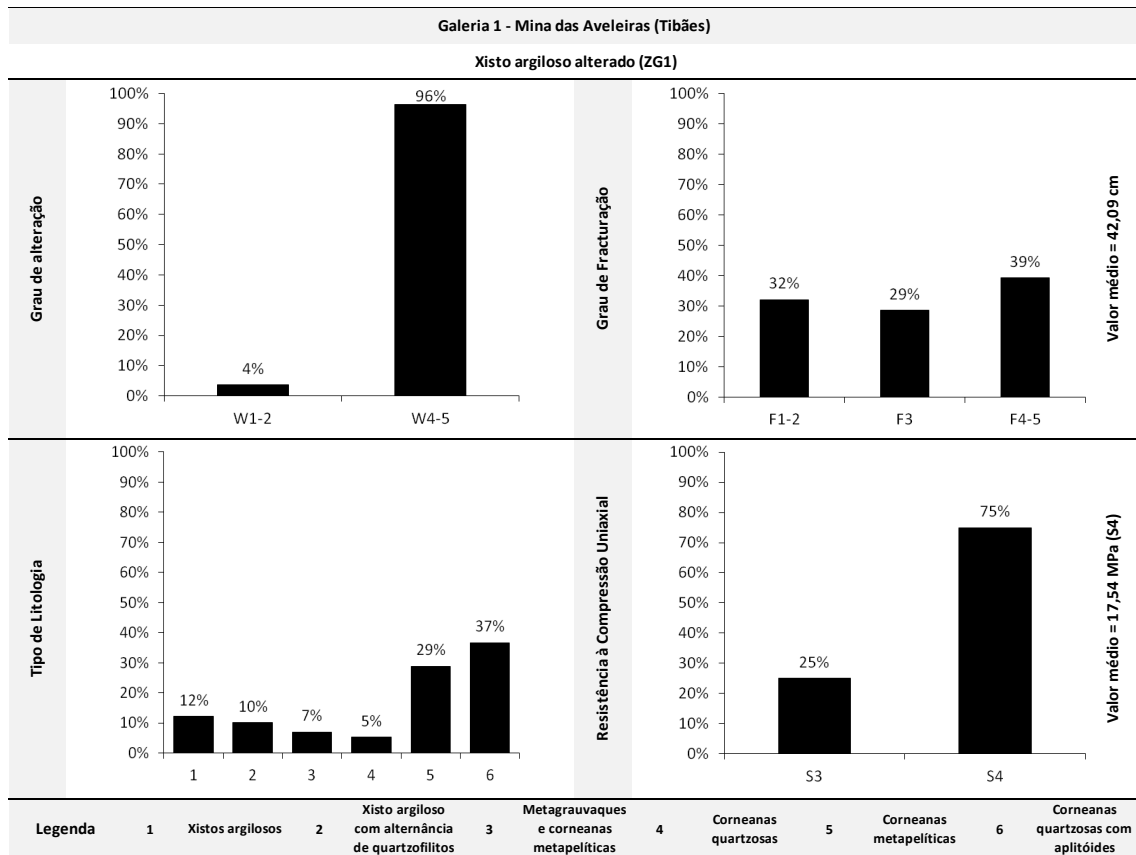
3.4.2. Zonamento geotécnico revisitado: Galeria 1 – Tramo 1

Neste tópico retomam-se as unidades geotécnicas resultantes do cruzamento de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica ao longo do traçado da galeria 1 sintetizadas por LABCARGA (2007/2008), Neto (2007), Ramos (2009) e Lopes (2012). Nesta síntese procedeu-se à passagem, revisão e uniformização das bases de dados originais do levantamento geotécnico e do ensaio esclerométrico “in situ” (LABCARGA, 2007/2008; Neto, 2007) para as bases de dados geológico-geomecânicas ScanGeoData|BGD e a SchmidtData|UCS. Esta transferência de dados permitiu uma revisão e otimização da informação prévia e apresentação de um zonamento geotécnico revisitado dos cerca 75 metros que constitui o tramo 1 da galeria 1 da mina das Aveleiras.

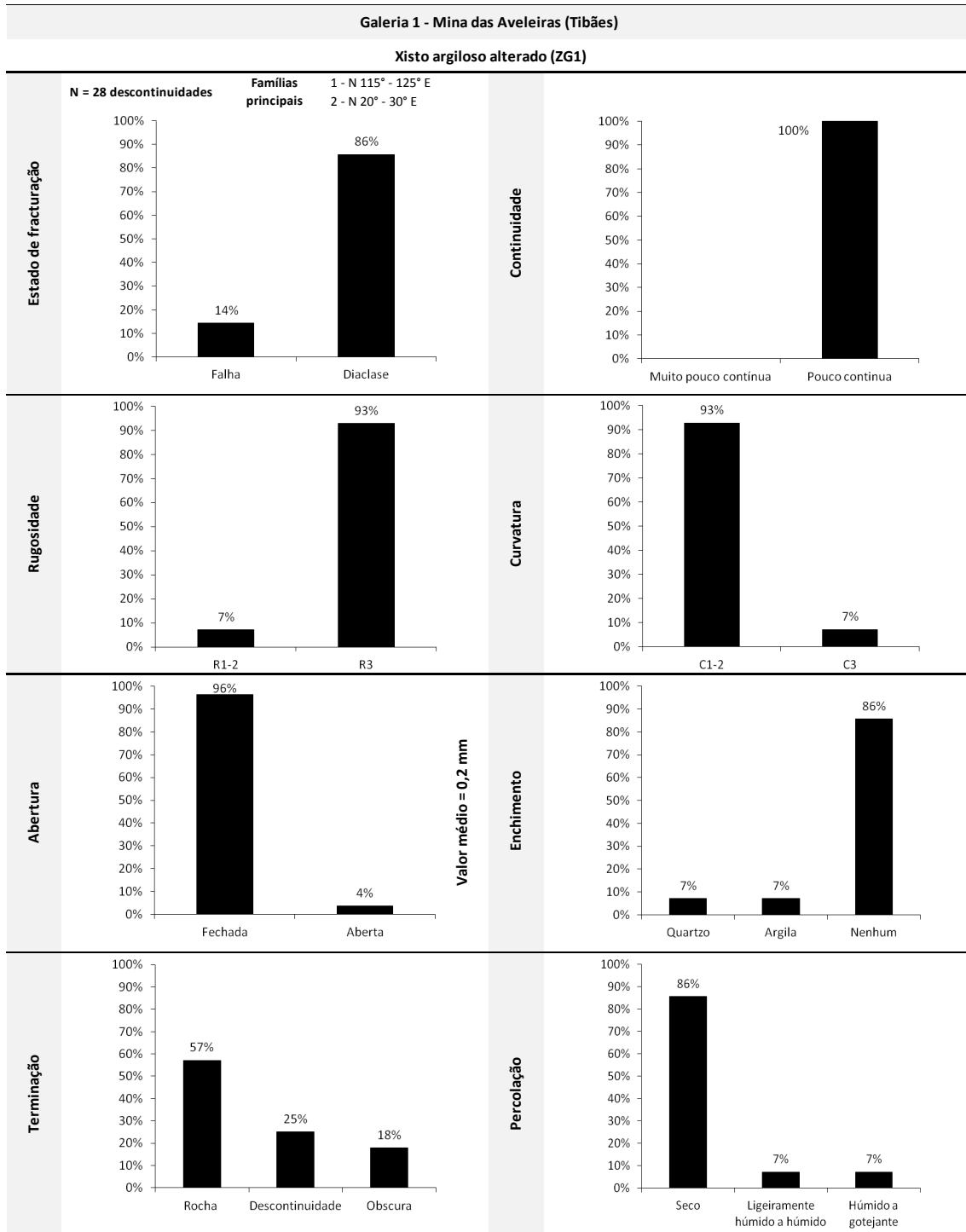
ZG1.(G1)

Esta zona corresponde, sensivelmente, aos primeiros 13 m da Mina das Aveleiras, na qual se registaram 38 descontinuidades e foram realizadas 4 estações geomecânicas. É representada por xisto argiloso alterado a muito alterado (W_{4-5}). Foram definidas duas famílias principais de descontinuidades: $N115^{\circ}-125^{\circ}E$ e $N20^{\circ}-30^{\circ}E$. As descontinuidades apresentam espaçamentos medianamente afastados a próximos (F_3 a F_{4-5}), [45-20 cm]. A resistência à compressão uniaxial nas superfícies das descontinuidades é baixa (UCS, $\sigma_c = < 18$ MPa, S_4), e em laboratório não foi possível a sua determinação devido ao elevado grau de alteração do material-rocha. Apresentam-se seguidamente os parâmetros geológico-geotécnicos característicos no Quadro 35 e no Quadro 36.

Quadro 35. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG1. (G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



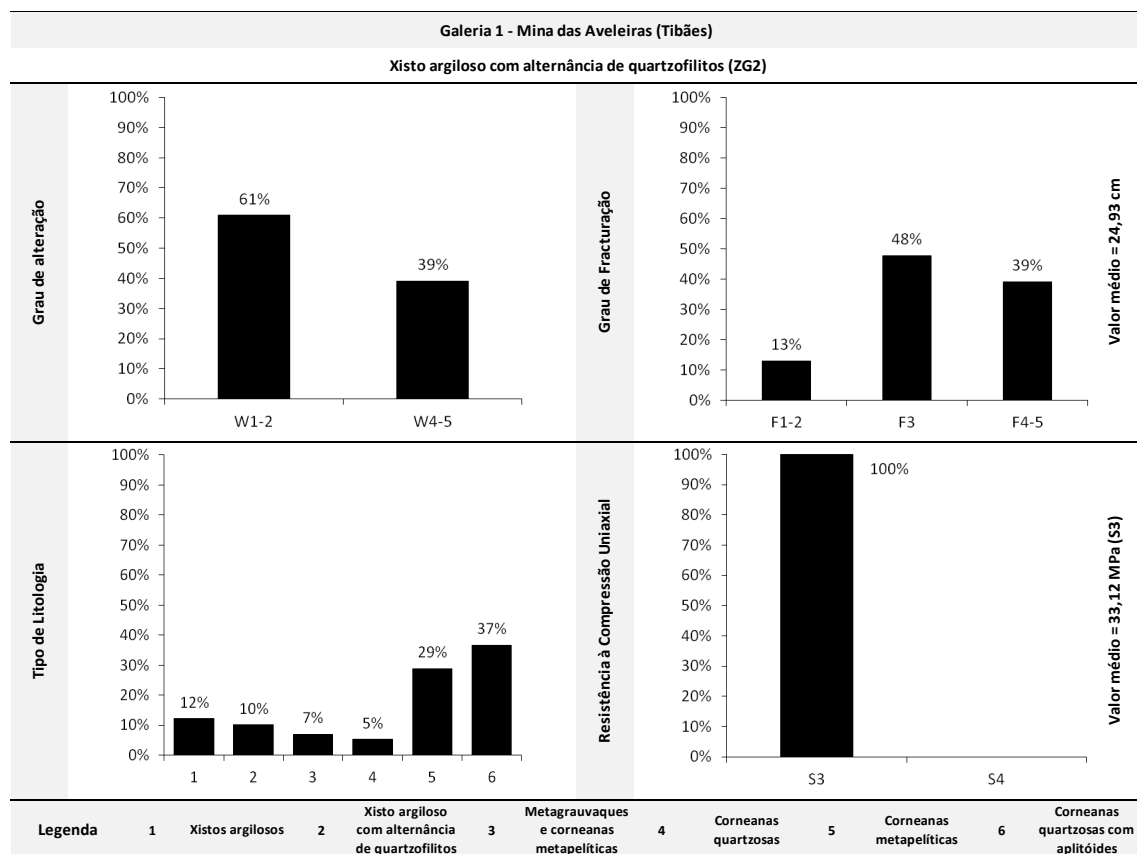
Quadro 36. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG1.(G1) - Mina das Avelleiras (Tibães).



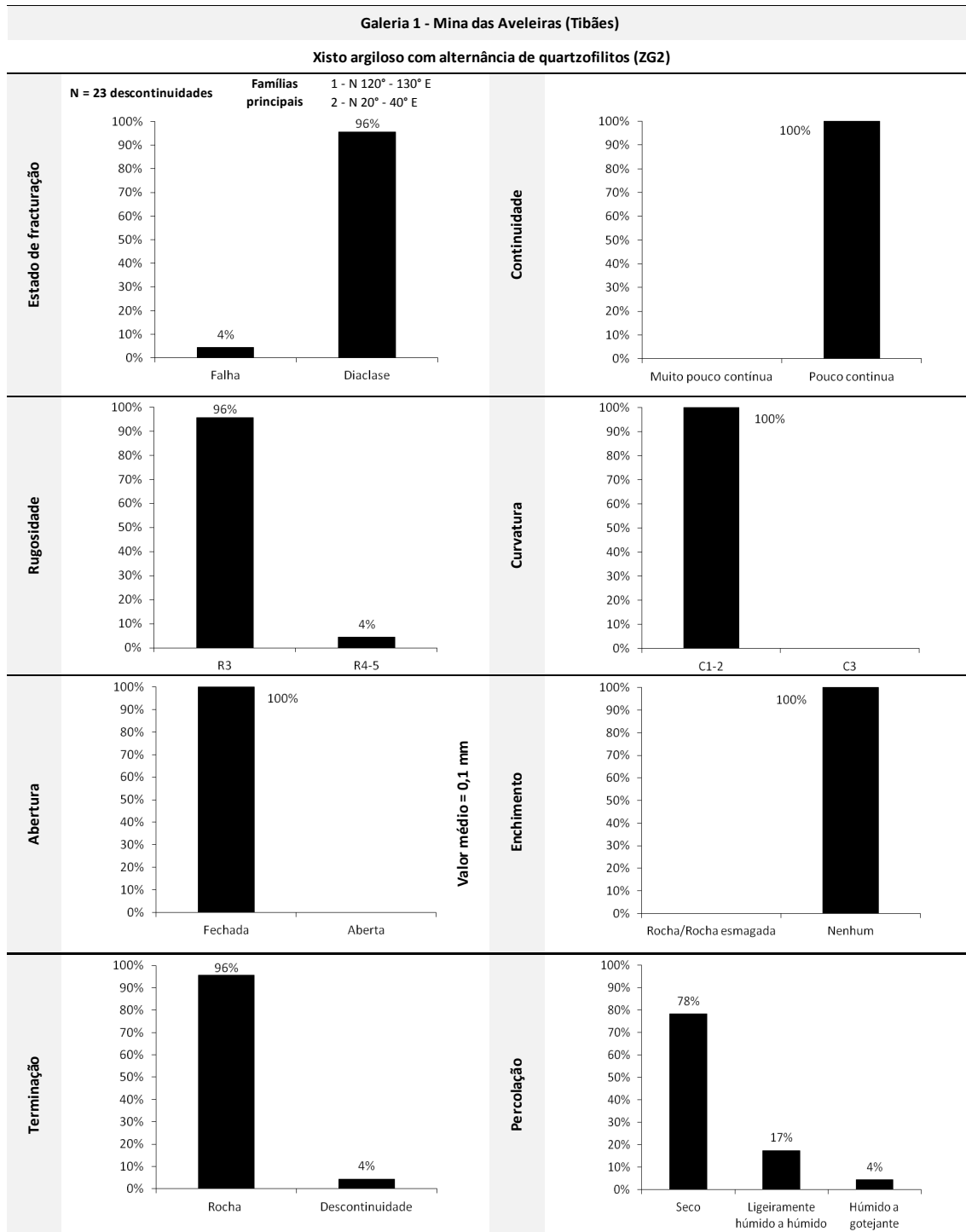
ZG2.(G1)

Esta zona tem uma extensão de cerca de 8 m (13 – 21 m), na qual se registaram 9 descontinuidades e foram realizadas 3 estações geomecânicas. É caracterizada quartzofilitos com alternâncias de xisto argiloso, predominantemente pouco alterado (W_2) e nas litologias xistosas são muito alteradas (W_4). Definiram-se duas famílias principais de descontinuidades: $N120^\circ-130^\circ E$ e $N20^\circ-40^\circ E$. Estas descontinuidades apresentam espaçamentos medianamente afastados a próximos (F_3 a F_{4-5}), [30-15 cm]. A resistência à compressão uniaxial nas superfícies de descontinuidades, é baixa a média (UCS, $\sigma_c = 15-35$ MPa, S_4 a S_3). No Quadro 37e no Quadro 38 apresentam-se os parâmetros geológico-geotécnicos característicos.

Quadro 37. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG2.(G1) - Mina das Aveliras (Tibães).



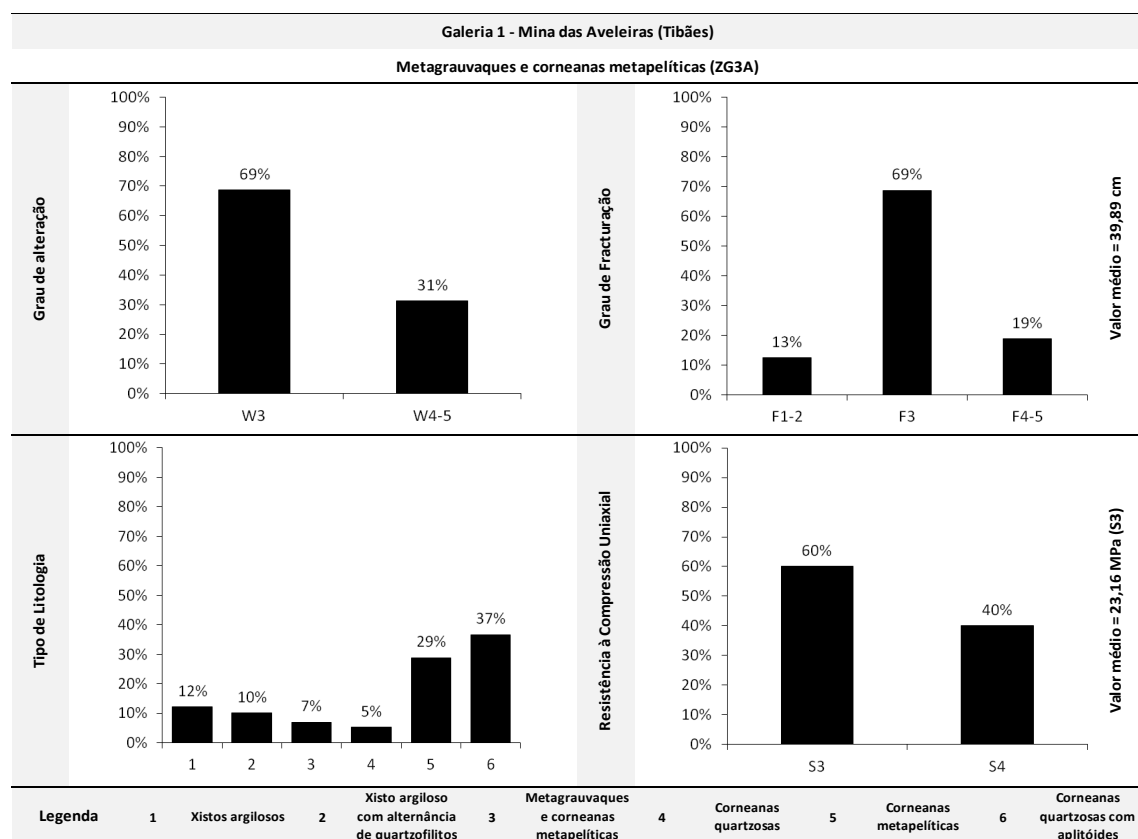
Quadro 38. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da da zona geotécnica ZG2.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



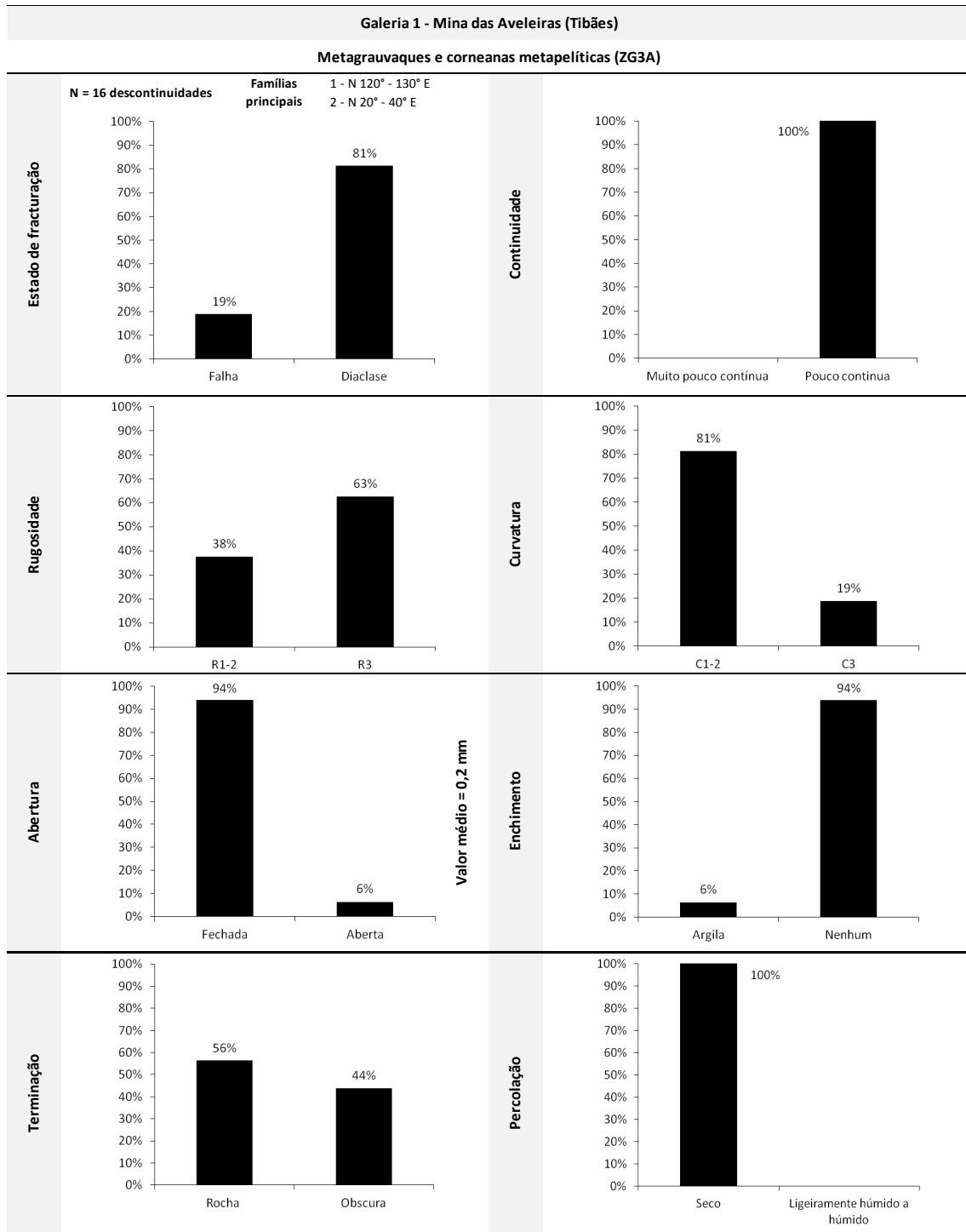
ZG3A.(G1)

Esta zona tem uma extensão de cerca de 10 m (21 – 31 m), na qual se registaram 16 descontinuidades e foram realizadas 5 estações geomecânicas. É caracterizada, predominantemente, por metagrauvaques e por uma estreita faixa de corneanas metapelíticas, medianamente alterados (W_3). As famílias de descontinuidades definidas são as mesmas que na zona ZG2.(G1), isto é: $N120^\circ-130^\circ E$ e $N20^\circ-40^\circ E$. As descontinuidades apresentam espaçamentos medianamente afastados (F3); [25-50 cm]. A resistência à compressão uniaxial nas superfícies de descontinuidades, é média a baixa (UCS, $\sigma_c = 15 - 40$ MPa, S_4 a S_3). No Quadro 39 e no Quadro 40 apresentam-se os parâmetros geológico-geotécnicos característicos.

Quadro 39. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG3A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



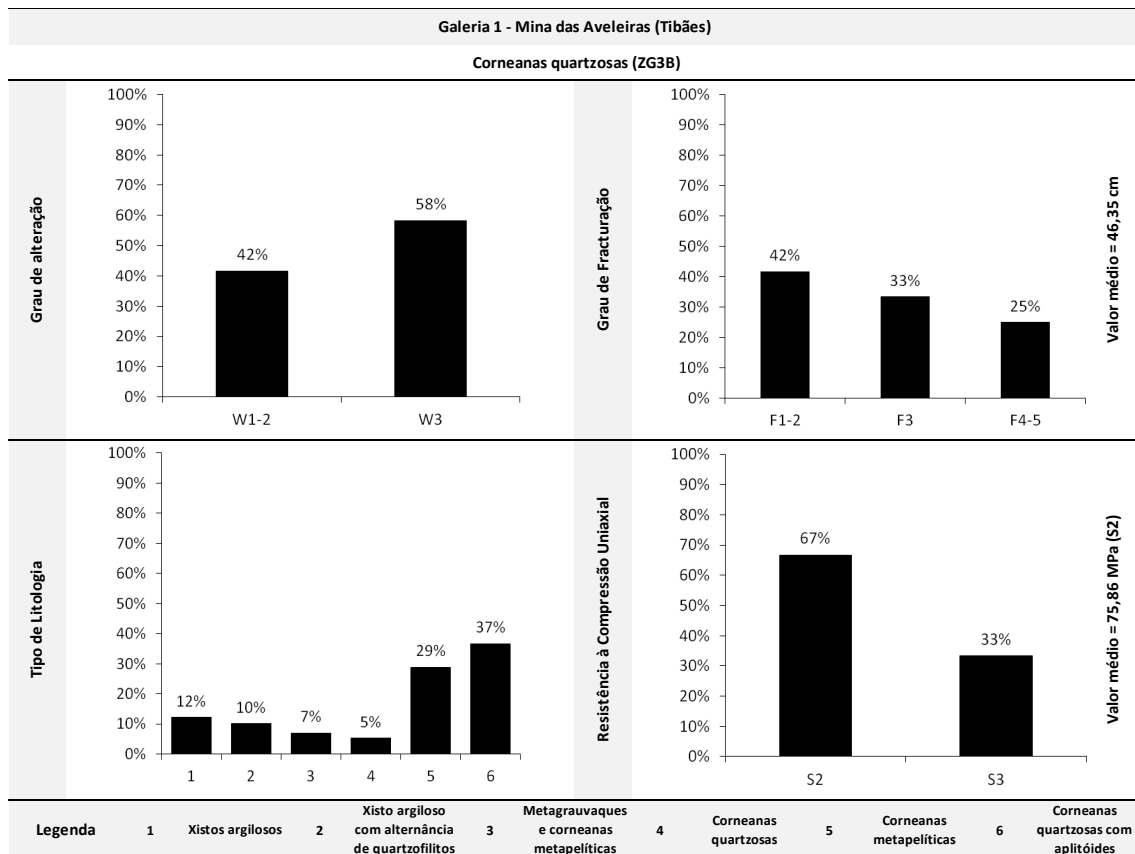
Quadro 40. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG3A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



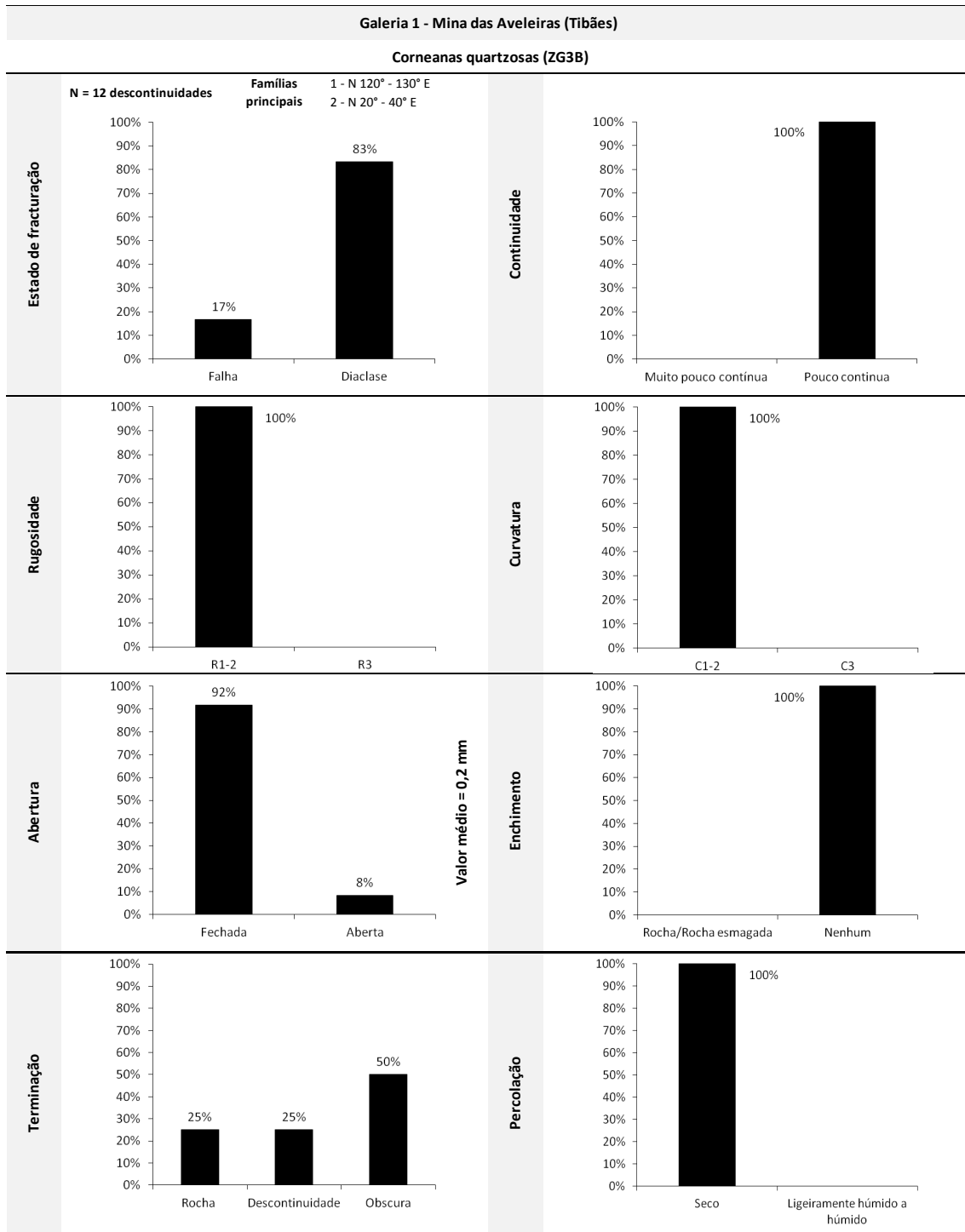
ZG3.B (G1)

Esta zona tem uma extensão de cerca de 9 m (31 – 40 m), na qual se registaram 12 descontinuidades e foram realizadas 3 estações geomecânicas. É caracterizada, predominantemente, por corneanas quartzosas, medianamente alteradas a pouco alteradas (W_3 a W_2). As famílias de descontinuidades definidas são as mesmas que na zona ZG3A.(G1). As descontinuidades apresentam espaçamentos afastados a medianamente afastados (F_{1-2} a F_3); [45-55 cm]. A resistência à compressão uniaxial nas superfícies de descontinuidades, é média (UCS, $\sigma_c = 20-55$ MPa, S_3). No Quadro 41 e no Quadro 42 apresentam-se os parâmetros geológico-geotécnicos característicos.

Quadro 41. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG3B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



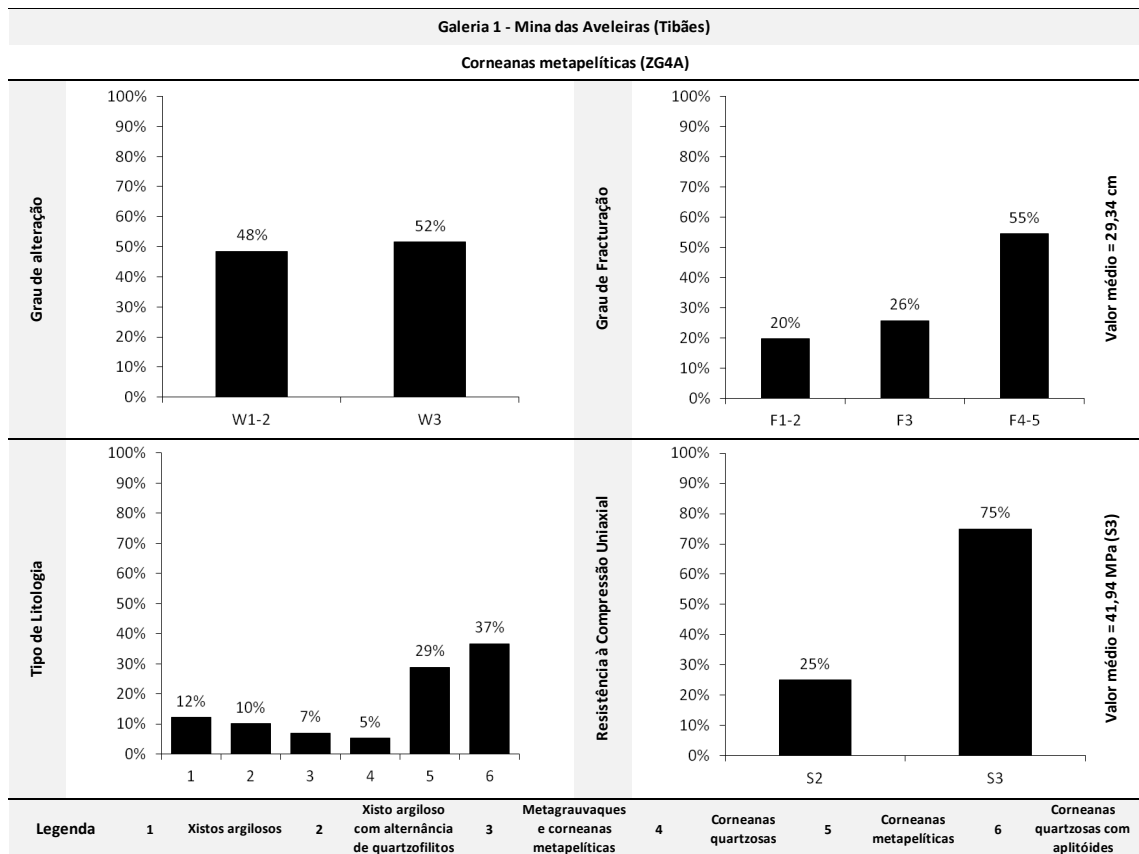
Quadro 42. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG3B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



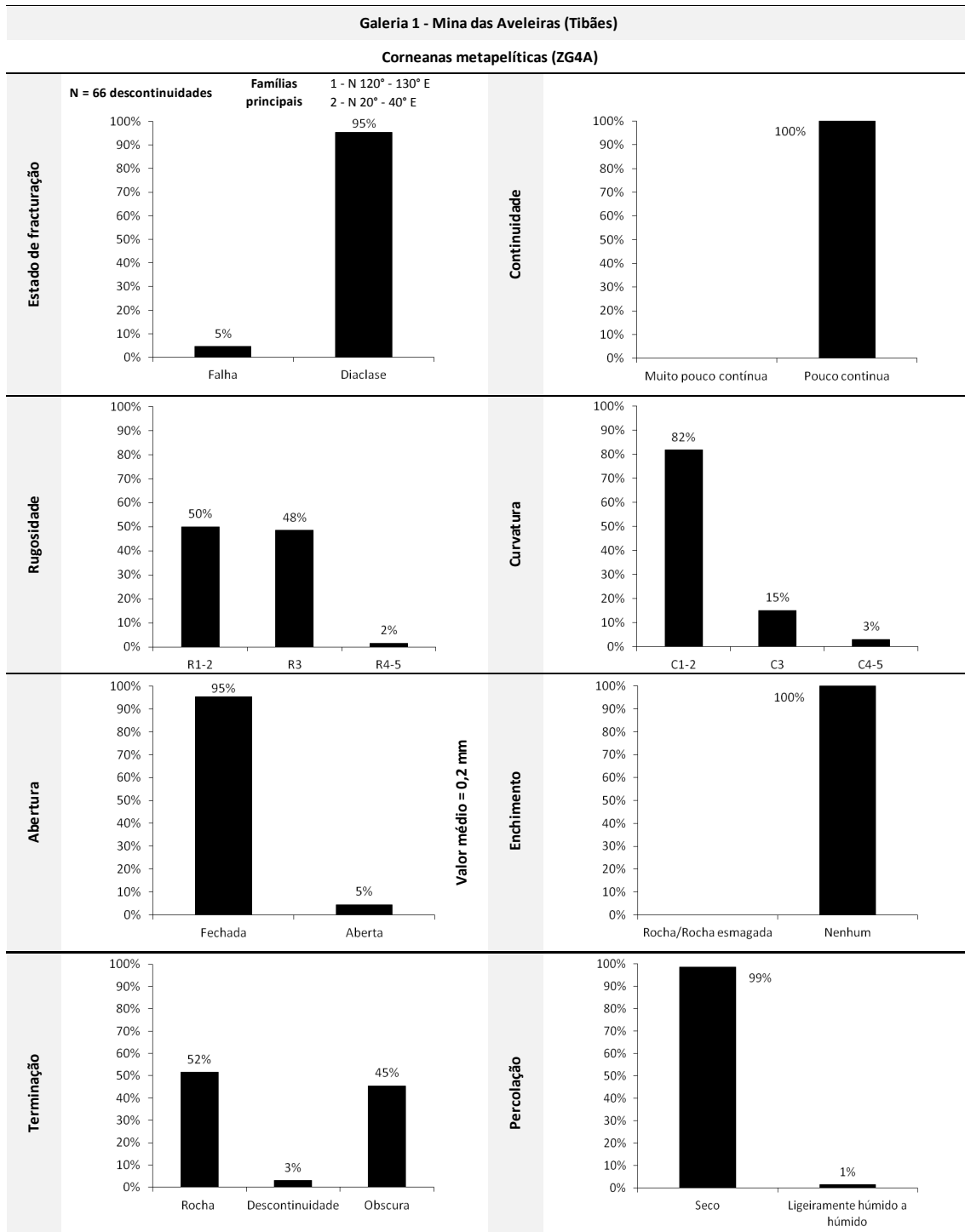
ZG4A.(G1)

Esta zona tem uma extensão de cerca de 10 m (40 – 60 m), na qual se registaram 66 descontinuidades e foram realizadas 4 estações geomecânicas. É caracterizada, predominantemente, por corneanas metapelíticas, pouco a medianamente alteradas (W_2 a W_3). As famílias de descontinuidades definidas são as mesmas que nas zonas ZG3A.(G1) e ZG3B.(G1). As descontinuidades apresentam espaçamentos próximos a medianamente afastados (F_{4-5} a F_3); [15-30 cm]. A resistência à compressão uniaxial nas superfícies de descontinuidades, é média (UCS, $\sigma_c = 25-55$ MPa, S_3). No Quadro 43 e no Quadro 44 apresentam-se os parâmetros geológico-geotécnicos característicos.

Quadro 43. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



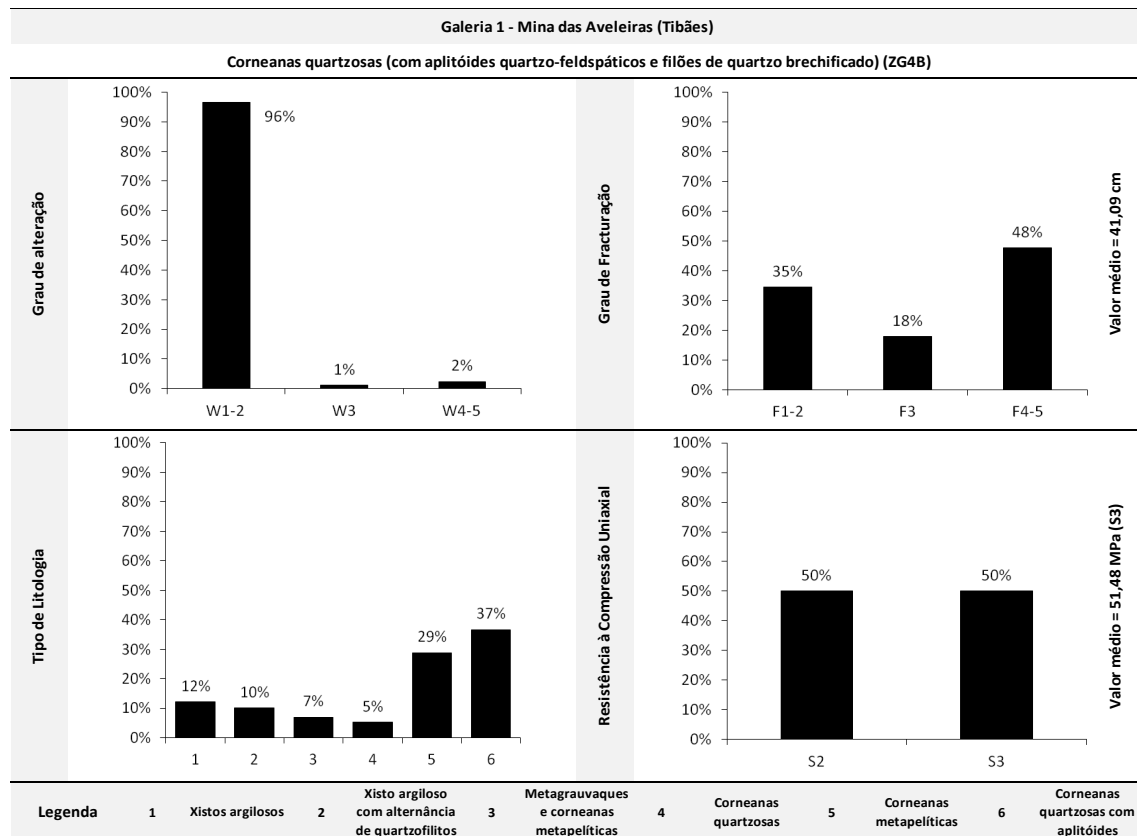
Quadro 44. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4A.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



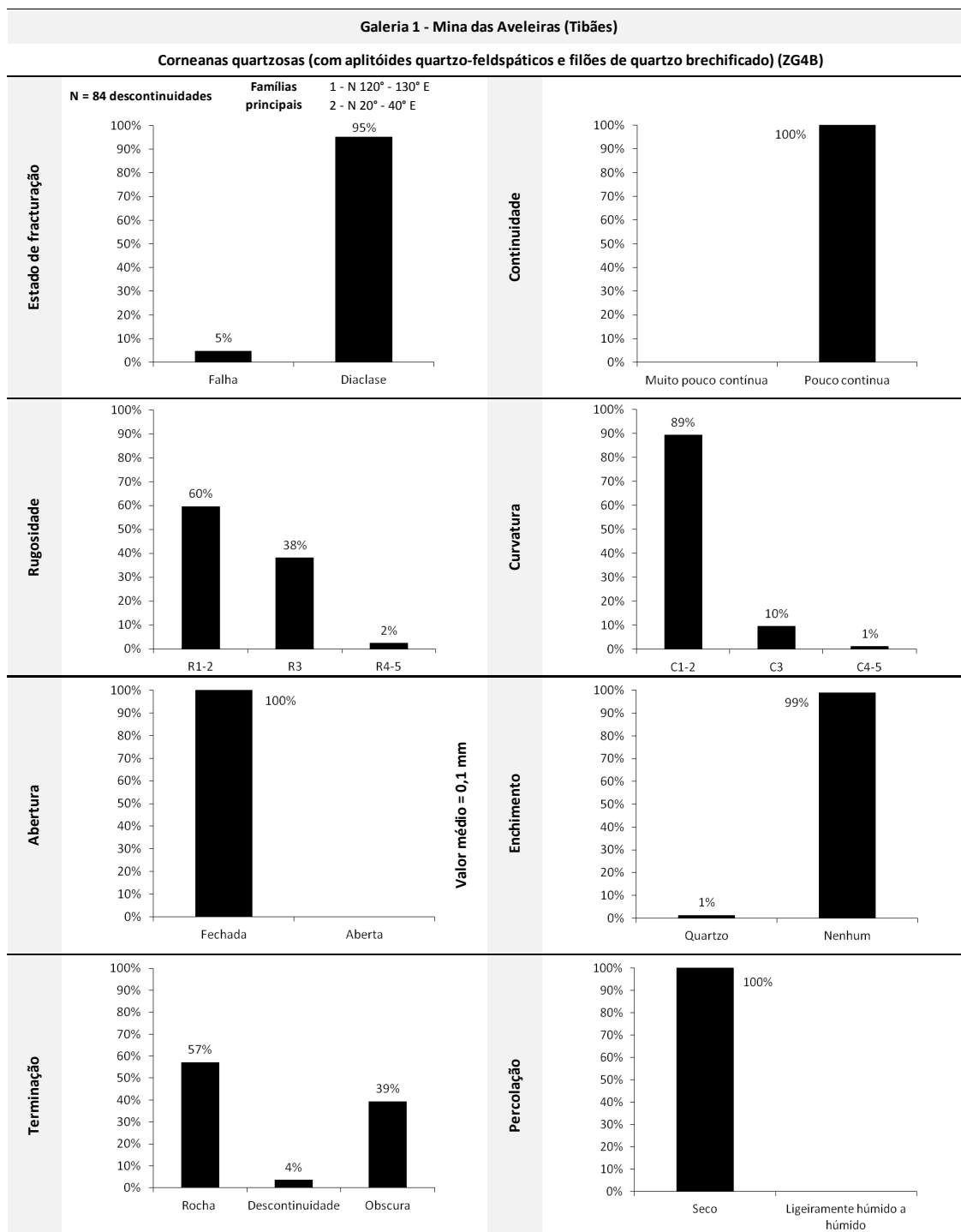
ZG4B.(G1)

Esta zona tem uma extensão de cerca de 15 m (60 – 75 m), na qual se registaram 84 descontinuidades e foram realizadas 4 estações geomecânicas. É caracterizada por corneanas quartzosas (com aplitóides quartzo-feldspáticos e filões de quartzo brechificado) pouco alteradas (W_2). Foram definidas as mesmas famílias de descontinuidades da zona ZG3. Quanto ao espaçamento, as descontinuidades apresentam-se próximas (F_{4-5}), a medianamente afastadas (F_3), [15-45 cm]. A resistência à compressão uniaxial nas superfícies de descontinuidades é elevada a média (UCS, $\sigma_c = 50-70$ MPa, S_3 a S_2). No Quadro 45 e no Quadro 46 apresentam-se os parâmetros geológico-geotécnicos característicos.

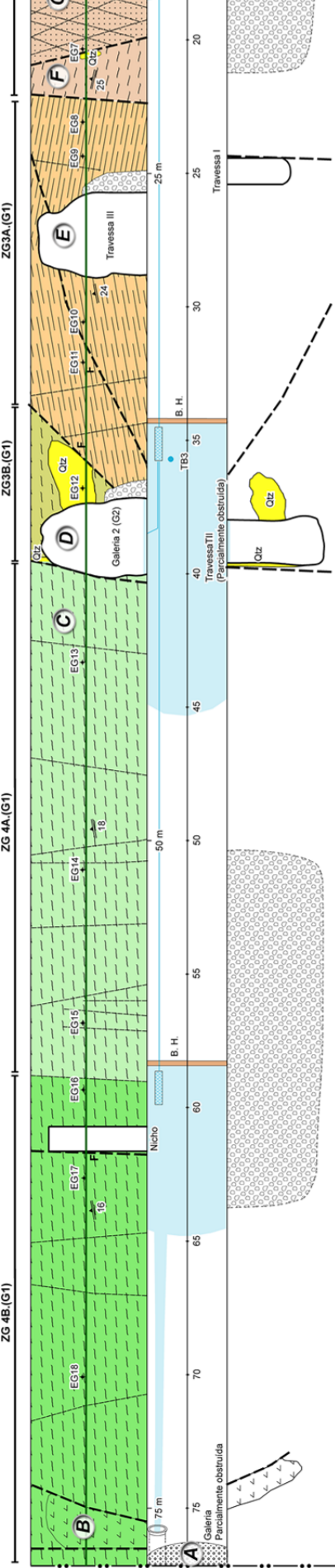
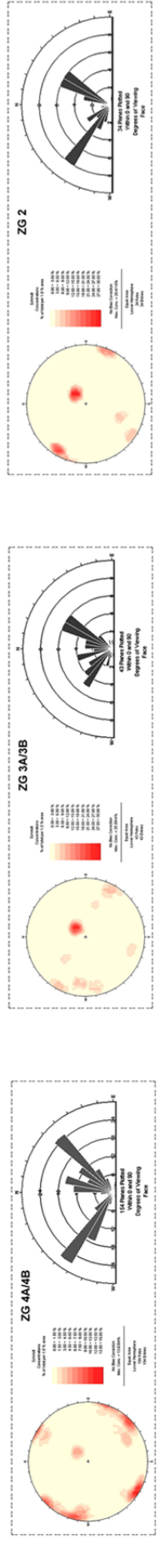
Quadro 45. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



Quadro 46. Síntese dos parâmetros das discontinuidades da zona geotécnica ZG4B.(G1) - Mina das Aveleiras (Tibães).



Na Figura 57 é apresentado o zonamento geotécnico revisitado do maciço subterrâneo do Tramo 1 da Galeria 1 da Mina das Aveleiras.



Rochas metassedimentares (Silúrico):

- Comaenas metapelíticas e quartzosas
- Metagrauques
- Quartzofílios
- Xistos argiloses com alternâncias de quartzofílios
- Xistos argilosos

Filões e Massas:

- Quartzito
- Aplídiões: apítes e/ou pegmatitos

Estrutura:

- F: Falha
- D: Diaclase
- 18: Xistocidade regional
- EG 16: Estação geomecânica (UCS, P.L.T)
- TB3: Amostra análise físico-química e radiológica
- B.H.: Barreira Hidráulica

Zonas Geotécnicas:

- ZG1 (G1): Xisto argiloso alterado a muito alterado (M4-F); espessamento afastado (F1-2); [60-70 cm]; resistência à compressão uniaxial baixa (UCS; $\sigma_{cc} < 10$ MPa, S4)
- ZG2 (G1): Xisto argiloso com alternância de quartzofílios, pouco alterado (W2); espessamento afastado (F1-2) a medianamente afastado (F3); [55-65 cm]; resistência à compressão uniaxial baixa a média (UCS; σ_{cc} : 15-30 MPa, S4 a S3)
- ZG3A (G1): Metagrauques e comaenas metapelíticas, medianamente alteradas (W3); espessamento afastado (F1-2) a medianamente afastado (F3); [50-70 cm]; resistência à compressão uniaxial baixa a média (UCS; σ_{cc} : 15-38 MPa, S4 a S3)
- ZG3B (G1): Comaenas metapelíticas, pouco alteradas (W2); espessamento medianamente afastado (F3); [40-55 cm]; resistência à compressão uniaxial elevada (UCS; σ_{cc} : 65-140 MPa, S2)

Legenda das Fotografias:

- A - Alívio parcial da galeria principal (material argiloso e detrito, provavelmente dum inclinado da mina, junto a uma estrutura filoniana quartzosa)
- B - Filão de quartzo (mineralizado com volfrâmio)
- C - Comaenas metapelíticas
- D - Bifurcação das Travessas III e II (parcialmente obstruída)
- E - Travessa IV (obstruída) em grauques
- F - Comaenas quartzosas
- G - Quartzofílios

Dados geológico-estruturais:

- 34 Pontos Pivotal (Vértice Local 00) - Diagrama de Wulff
- 302 Pontos Pivotal (Vértice Local 00) - Diagrama de Wulff

Descontinuidades (diaclases, falhas, xistocidade, n...)

2007/2008; Neto, 2007).

3.4.3. Zonamento geotécnico: Galeria 1 – Tramo 2

De forma a complementar os trabalhos precedentes explanados no tópico anterior, foi efetuado o reconhecimento geológico e o estudo geotécnico e geomecânico no tramo imediatamente a seguir a um colapso localizada aos 80 m da boca de entrada da galeria 1 (G1 - tramo 2). Desta forma, à semelhança do que feito para a galeria 2, procedeu-se ao levantamento geotécnico das superfícies das descontinuidades, aplicando a técnica da amostragem linear, bem como à execução de ensaios geomecânicos “in situ” (ensaio esclerométrico) sobre as superfícies estruturais do maciço rochoso. Esta zona face às suas características é equivalente à zona geotécnica ZG4A.(G1), previamente definida no Tramo 1 da Galeria 1, apresentando-se seguidamente uma caracterização sumária desta unidade geotécnica no tramo 2.

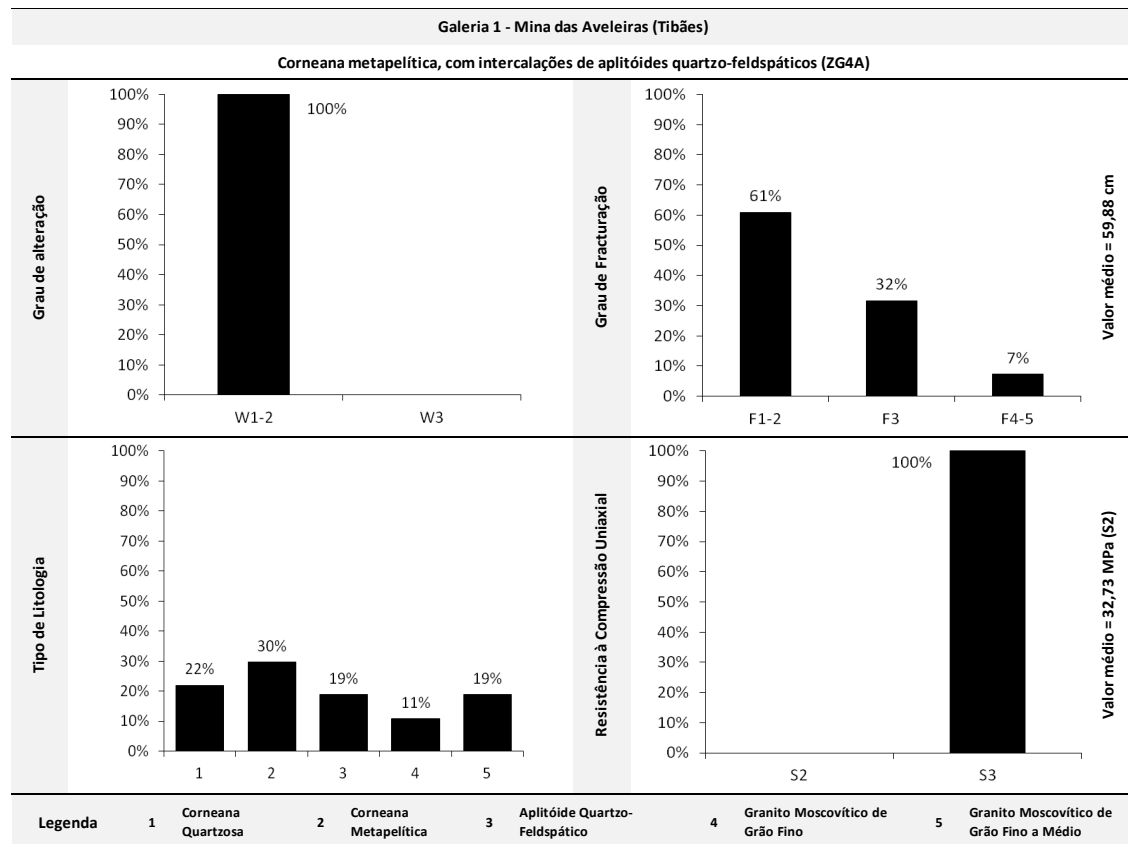
ZG4A.(G1)

A Zona Geotécnica 4A – ZG4A.(G1) – apresenta uma extensão total de 45 m, na qual se registaram 41 descontinuidades e foram realizadas 11 estações geomecânicas (Quadro 47 e Quadro 48). Na Figura 58 é apresentada a proposta de zonamento geotécnico do maciço subterrâneo do Tramo 2 da Galeria 1 da Mina das Azeleiras. Esta zona é caracterizada pela presença de corneanas metapelíticas, pouco a medianamente alteradas (W_{1-2}). Foram definidas três famílias principais de descontinuidades, a saber:

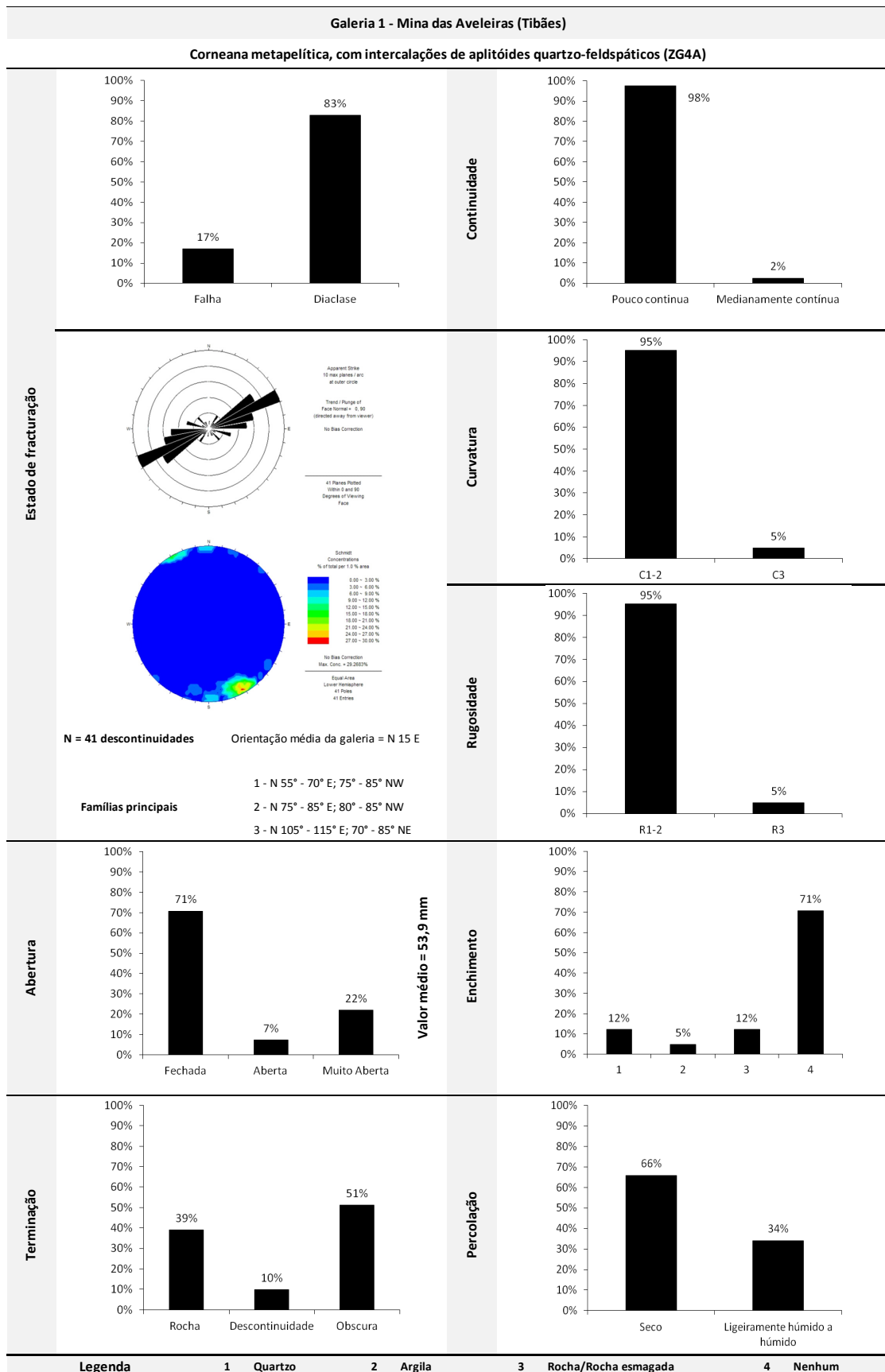
- N55°-70°E; 75°-85°NW
- N75°-85°E; 80°-85°NW
- N105°-115°E; 70°-85°NE

Quanto ao espaçamento, as descontinuidades encontram-se afastadas (F_{1-2}) a medianamente afastadas (F_3), com um valor médio de 59,8 cm. A resistência à compressão uniaxial apresenta um valor médio de 32,7 MPa, classificando-se na classe de resistência média (S_3).

Quadro 47. Síntese dos principais parâmetros geológicos e geomecânicos da zona geotécnica ZG4A. (G1) da Mina das Aveleiras (Tibães).



Quadro 48. Síntese dos parâmetros das descontinuidades da zona geotécnica ZG4A. (G1) da Mina das Aveleiras (Tibães).

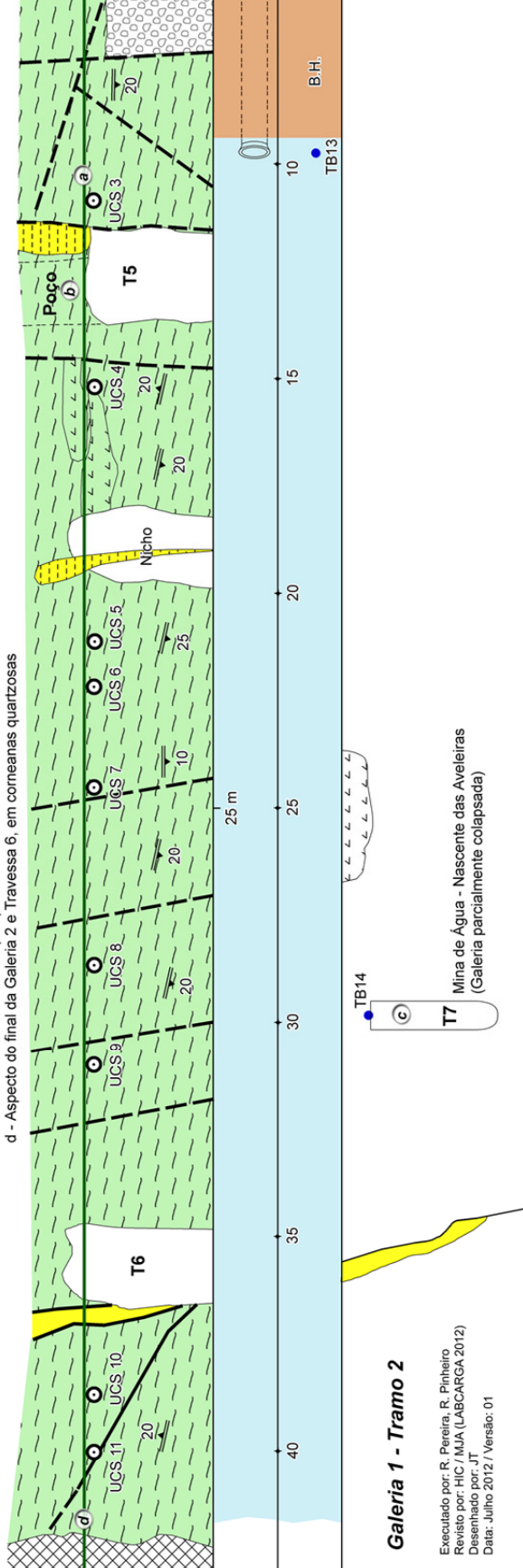




Legenda das fotografias:

- a - Aspecto do levantamento geológico-geomecânico pela técnica da amostragem linear no hastead direito no início do segundo tramo da Galeria 1
- b - Poço em corneanas e apfilitides, com altura estimada de 6m
- c - Galeria estreita da nascente da Mina das Aveleiras (extensão estimada em 10 - 12m), aos 5 m observa-se o colapso parcial do hastead direito
- d - Aspecto do final da Galeria 2 e Travessa 6, em corneanas quartzosas

Fim da Galeria



Galeria 1 - Tramo 2

Executado por: R. Pereira, R. Pinheiro
 Revisito por: HIC / MJA (LABCARGA 2012)
 Desenhado por: JT
 Data: Julho 2012 / Versão: 01

Rochas metassedimentares (Silúrico):

Corneanas metapelíticas e quartzosas

Estrutura:

Escal.

Pontos de amostragem:












Amostra: Ensaio de resistência à

Dados geológico-estruturais

3.4.4. Zonamento geotécnico: breve síntese

Toda a informação recolhida foi uniformizada, processada e analisada de forma exaustiva e sistemática, com o intuito de ensaiar um possível quadro de correlação geológico-geotécnico entre os maciços rochosos da rede de galerias estudada. Assim, elaborou-se o quadro síntese (Quadro 49) e a Figura 59, em que se constata que na sua globalidade as características geotécnicas e geomecânicas das galerias estudadas são coerentes. De realçar, que ambas as galerias apresentam zonas geotécnicas com um padrão litológico semelhante, predominantemente, as corneanas quartzosas e metapelíticas. Por outro lado, na galeria 2 identificaram-se duas litologias, com expressiva representatividade cartográfica, os aplitóides quartzo-feldspáticos e os granitos moscovíticos.

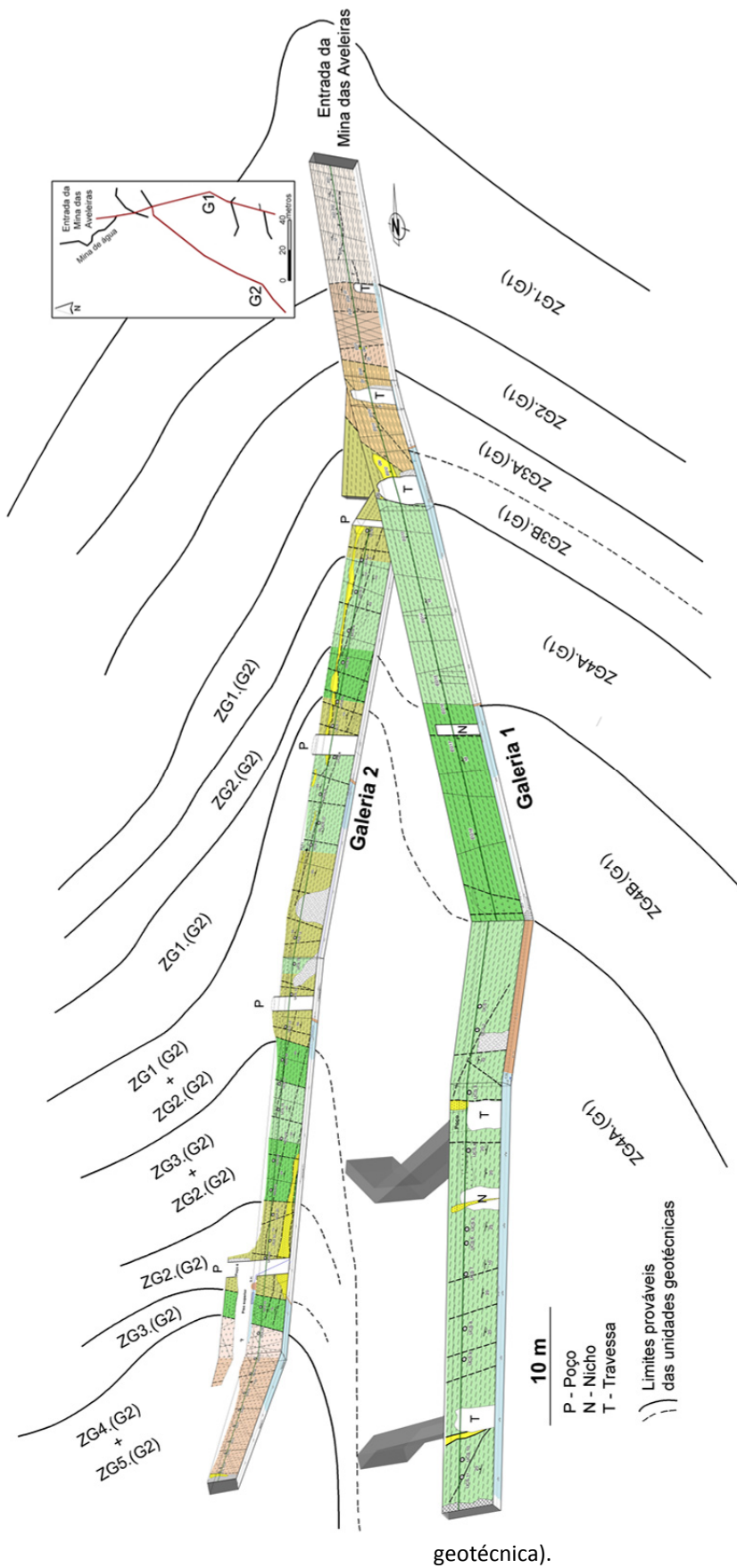
Quadro 49. Síntese das características geotécnicas da Mina das Aveleiras (Tibães), cf. Figura 59.

Zona Geotécnica (ZG)	Ilustrações	Litologia	Grau de alteração Alteração	Grau de fracturação Espaçamento	Grau de resistência UCS (MPa) PLT (MPa)	
Galeria 1 (125 m)		Xisto argiloso	W _{4,5}	F _{3,2} [60-70 cm]	< 18	n.d.
		Xisto argiloso com alternâncias de quartzofilitos	W ₂	F _{3,2} [55-65 cm]	15-30	1-2*
		Metagrauvaques com alternâncias de corneanas metapelíticas	W ₃	F _{3,2} a F ₃ [50-70 cm]	15-38	0,5-1*
		Corneanas quartzosas	W ₂	F ₃ [40-55 cm]	65-140	3-5*
		Corneanas metapelíticas	W ₂ a W ₃	F ₂ a F ₃ [25-65 cm]	25-55	n.d.
		Corneanas quartzosas (com aplitóides quartzo-feldspáticos e fiões de quartzo brechificado)	W ₂	F ₃ a F ₄ [30-15 cm]	64-80	n.d.
Galeria 2 (115 m)		Corneanas quartzosas (com níveis filonianos de quartzo e aplitóides quartzo-feldspáticos)	W _{3,2}	F ₂ a F ₃ [90-40 cm]	65-90	4 - 6
		Corneanas metapelíticas (com intercalações de aplitóides quartzo-feldspáticos)	W _{3,2}	F ₃ a F ₄ [35-75 cm]	30 - 55	n.d.
		Aplitóides quartzo-feldspáticos (com intercalações de corneanas quartzosas e fiões de quartzo brechificado)	W _{3,2}	F ₃ a F ₄ [40-15 cm]	95-125	n.d.
		Granito moscovítico de grão fino (por vezes, com passagens de corneanas quartzosas)	W ₁	F ₄ a F ₃ [10-30 cm]	40 - 50	n.d.
		Granito moscovítico de grão fino a médio	W ₁	F ₃ a F ₂ [40-65 cm]	75 - 110	8 - 10

n.d. - não determinado; * valores retirados de Lopes (2012)

G1 - Galeria 1; G2 - Galeria 2

UCS - Resistência à compressão uniaxial; PLT - Resistência à carga pontual



geotécnica).

Figura 59. Síntese cartográfica da rede de galerias estudadas da Mina das Aveléiras, com a representação do zonamento geotécnico e uma tentativa de correlação (cf. Quadro 49, para processo de legenda

3.4.5. Avaliação geomecânica exploratória

Apresenta-se de seguida a aplicação das classificações geomecânicas – RMR (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989) e *Q-system* (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006) – e dos índices geológico-geomecânicos – GSI (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005) e índice hidrogeomecânico *HP-value* (Gates, 1995, 1997, 2003) – a todas as zonas geotécnicas definidas.

A globalidade dos parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos que esteve na base desta avaliação foi obtida e descrita segundo as recomendações e procedimentos propostos pela CFCFF (1996) e ISRM (2007). Para apoiar a aplicação das classificações geomecânicas foi consultado um conjunto vasto de bibliografia especializada, que se poderá encontrar no capítulo das referências, entre as quais se destacam, entre outras: Terzaghi (1946), Deere & Deere (1988), Brady & Brown (1985, 2004), Bieniawski (1989), Barton (2000, 2006), Hoek (2007), Scesi & Gattinoni (2009), Palmström & Stille (2010), Singh & Goel (2011).

Para a aplicação destas classificações recorreu-se aos principais parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos do zonamento geotécnico da Galeria 2 e da Galeria 1 – Tramo 2 da Mina das Aveleiras (Tibães) sintetizados no Quadro 49.

No desenvolvimento de todas as classificações, foram equacionados dois cenários para cada zona geotécnica, tendo em consideração o conhecimento do maciço rochoso “in situ”, um para as condições geológico-geotécnicas dominantes e outro para as condições complementares (i.e., todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos não-dominantes). Contudo, apresenta-se apenas o cenário que reúne as condições prevalecentes ou dominantes.

Por fim, serão confrontados os resultados obtidos através das diferentes classificações com a avaliação geomecânica proposta por LABCARGA (2007/2008) e Neto (2007) para a Galeria 1 – Tramo 1.

No Quadro 50 apresenta-se uma síntese dos resultados globais das classificações dos maciços rochosos (RMR, *Q-system*) e dos índices geomecânicos (GSI e *HP-value*) aplicados.

Quadro 50 Síntese das características do maciço rochoso da Galeria 2 e da Galeria 1 – Tramo 2 da Mina das Aveleiras, de acordo com as classificações geomecânicas e os índices geomecânicos aplicados.

Zonas Geotécnicas (ZG's)		Classificações geomecânicas e Índices geomecânicos																												
		RMR (Bieniawski, 1989)						Q-System (Barton et al., 1974, 1980)						GSI (Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001)		HP-Value (Gates, 1997, 2003)														
P1	P2	P3	P4	P5	P6	Valor final	Classe	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Valor final	Classe	Intervalo	Classe	RQD	Jn	Jr	Jk	Jaf	Jw	Valor final	Classe	Caudal expectável Q (L/min)	Caudal expectável Q (L/s)			
Galeria 2		ZG1. (G2)	8	7	10	19	7	-5	46	III Razoável	30	9	1,5	3	0,66	0,5	2,20	Fraca	30-40	Fraca a Razoável	30	9	1,5	1	1,2	0,86	3,58	Fraca	0,9	0,01
		ZG2. (G2)	8	4	10	16	10	-5	43	III Razoável	30	9	1,5	4	1	0,5	2,50	Fraca	30-40	Fraca a Razoável	30	9	1,5	1	1,4	0,94	3,36	Fraca	1,5	0,02
		ZG3. (G2)	3	12	10	22	4	-12	39	IV Fraca	20	9	1,5	3	0,5	0,5	1,11	Fraca	40-50	Razoável	20	9	1,5	2	1	0,86	1,43	Fraca	126,3	2,10
		ZG4. (G2)	3	4	10	25	7	0	49	III Razoável	15	9	1,5	1	0,66	1,5	1,10	Fraca	65-70	Boa	15	9	1,5	1	1	0,86	2,15	Fraca	24,0	0,40
Galeria 1 - Tramo 2		ZG5. (G2)	8	12	10	23	10	-2	61	II Boa	35	15	1,5	1	1	1,5	2,33	Fraca	60-65	Boa	35	15	1,5	1	1	0,94	3,29	Fraca	1,7	0,03
		ZG4A. (G1)	8	4	10	22	10	-5	49	III Razoável	45	9	1,5	3	0,66	0,5	3,30	Fraca	40-50	Razoável	45	9	1,5	1	1,2	0,86	5,38	Razoável	0,0	0,00

Legenda

- P1 RQD ("Rock quality designation")
- P2 Resistência à compressão, UC (MPa)
- P3 Espacamento (m)
- P4 Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades
- P5 Água subterrânea
- P6 Correção da orientação das descontinuidades (Túneis e minas)

- RQD "Rock quality designation"
- Jn "Joint set number"
- Jr "Joint roughness number"
- Jk "Joint conductivity factor"
- Jaf "Joint aperture factor"
- Ja "Joint alteration number"

- Jw "Joint water reduction"
- SRF "Stress Reduction Factor"

Rock Mass Rating (RMR)

Como se pode constatar a qualidade global do maciço é razoável (Classe III). Contudo a zona ZG3.(G2) classifica-se de qualidade fraca (IV) e a zona ZG5.(G2) de qualidade boa (II).

Se atentarmos aos valores finais obtidos para estas duas zonas geotécnicas verificamos que estes se encontram na fronteira entre as classes fraca (IV) e razoável (III), e boa (II) e razoável (III), respectivamente. O valor mais baixo da zona ZG3 (G2) e mais elevado da zona ZG5 (G2) devem-se, fundamentalmente, à orientação das principais descontinuidades face à direcção média da galeria.

Q – System

Relativamente a esta classificação, o maciço é caracterizado na sua globalidade como de qualidade fraca. No entanto, para as zonas ZG3.(G2) e ZG4.(G2) os valores finais encontram-se no limite entre as classes fraca e muito fraca. Além disso, a zona ZG4A.(G1) apresenta o valor mais elevado dentro da classe fraca. Os valores mais baixos, atribuídos às zonas ZG3.(G2) e ZG4.(G2), bem como o valor mais alto relativo à zona ZG4A.(G1) devem-se, fundamentalmente, ao valores de RQD.

Geological Strength Index (GSI)

Para a avaliação deste índice geológico-geomecânico foram inferidos os intervalos dos valores de GSI através dos ábacos de Hoek & Marinos (2000) e Marinos & Hoek (2001), (Figura 30 e Figura 31). No que diz respeito às unidades metassedimentares (Figura 60), a geoestrutura do maciço é globalmente compartimentada a muito compartimentada, com algum grau de deformação e o estado das descontinuidades varia de razoável, nas zonas ZG3.(G2) e ZG4A.(G1), a bom nas zonas ZG1.(G2) e ZG2.(G2). Desta forma, as zonas ZG1.(2) e ZG2.(2) classificam-se de qualidade fraca a razoável e as zonas ZG3.(G2) e ZG4A.(G1) de qualidade razoável.

Quanto ao maciço granítico (Figura 61), a geoestrutura deste é muito compartimentada, na zona geotécnica ZG4.(G2), e compartimentada na zona ZG5.(G2). Relativamente ao estado das descontinuidades, este varia entre muito bom, na ZG4.(G2), e bom, na ZG5.(G2). Assim, ambas as zonas classificam-se de qualidade boa.

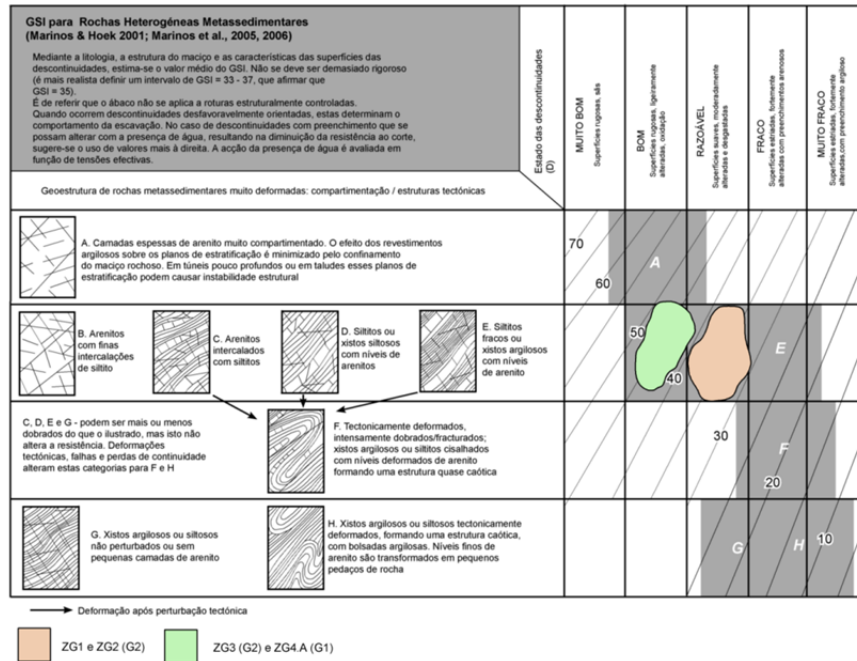


Figura 60. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG3 da Galeria 2 e ZG4A da Galeria 1 no ábaco de Marinos & Hoek (2001).

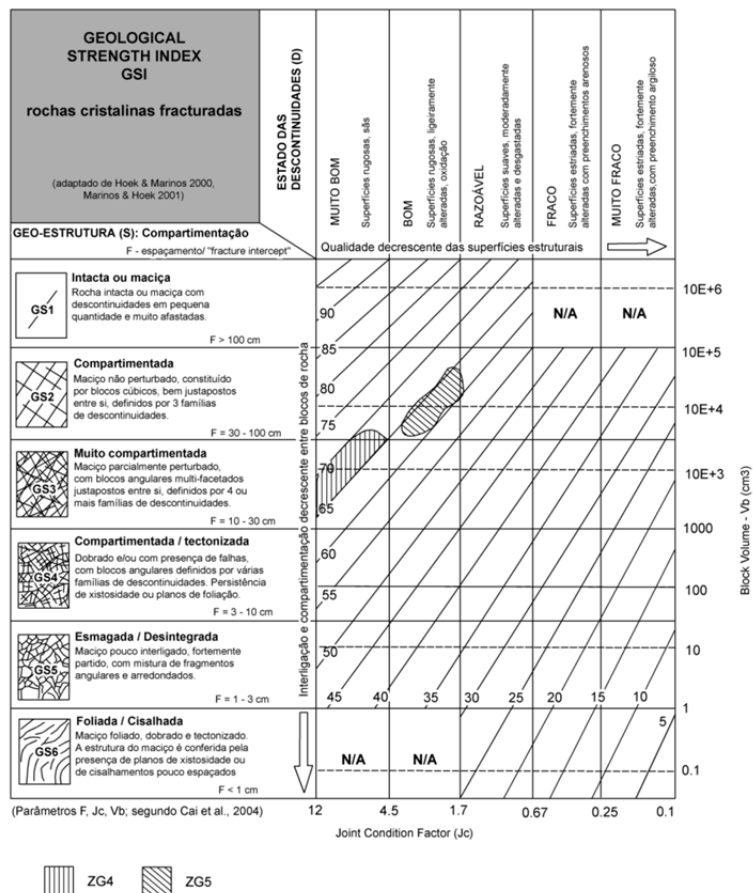


Figura 61. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG4 e ZG5 da Galeria 2 no ábaco de Hoek & Marinos (2000), com actualizações de Cai et al. (2004).

Hydro-Potential Value (HP)

Gates (1995, 1997, 2003) refere que os valores do índice hidrogeomecânico HP-value variam entre 1.33×10^{-3} , para maciços de muito fraca qualidade, e 800, para maciços de qualidade excelente. Desta forma, uma vez que este índice segue de perto a classificação Q-system, classificar-se-á a qualidade do maciço em função dos valores de HP obtidos. Assim, no Quadro 50 encontram-se sintetizados, para além dos parâmetros selecionados e os valores resultantes da aplicação deste índice, uma estimativa do potencial dos caudais de água subterrânea nas zonas geotécnicas estudadas.

Podemos verificar que todas as zonas geotécnicas se classificam, com exceção da ZG4A.(G1) que se categoriza de qualidade razoável, na classe de qualidade fraca, sendo a zona ZG3.(G2) a que apresenta o valor mais baixo. Por outro lado, os caudais expectáveis na maior parte do maciço são extremamente baixos, inferiores a 25 L/min, exceptuando a zona ZG3.(G2), que apresenta valores na ordem dos 130 L/min, isto é, cerca 2 L/s.

Estes caudais muito baixos a baixos enquadram-se nos valores típicos para captações de água subterrânea em rochas metassedimentares fracturadas, i.e., < 2 L/s (e.g., Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2007). Além disso, o caudal de água avaliado na Mina das Aveleiras, por Personda (1994), ronda os 0,7 L/s, o que está de acordo com os valores obtidos.

Correlação geomecânica das galerias estudadas com a galeria 1 (tramo 1)

Confrontando os resultados obtidos, através das diferentes classificações, com a avaliação geomecânica proposta por LABCARGA (2007/2008) e Neto (2007) para a Galeria 1 – Tramo 1 (Quadro 51), verifica-se que os valores das zonas ZG1.(G2) e ZG2.(G2), grosso modo equivalentes às zonas ZG3.(G1) e ZG4.(G1), respectivamente, são coerentes entre si.

Quadro 51. Síntese das características do maciço rochoso da Galeria 1 – Tramo 1 da Mina das Aveleiras, de acordo com as classificações e os índices geológico-geomecânicos aplicados (adaptado de LABCARGA, 2007/2008; Neto, 2007).

Unidades Geotécnicas (ZG) (revisão de Labcarga, 2007/2008; Neto, 2007)	Litologia	RMR (Bieniawski, 1989)	Q-system (Barton et al., 1974, 1980)	GSI (Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001)
ZG1	Xistos argilosos muito alterados	38 - 44 fraca a razoável	3,0 - 3,2 fraca	35-40 fraca a razoável
ZG2	Quartzofilitos com alternância de Xistos argilosos	41 - 53 fraca a razoável	2,3 - 2,5 fraca	45-50 fraca a razoável
ZG3	Metagrauwaques e corneanas metapelíticas/ quartzosas	39 - 45 fraca a razoável	2,7 - 2,9 fraca	40-45 fraca a razoável
ZG4	Corneanas metapelíticas/ quartzosas	48 - 55 razoável	3,2 - 3, 4 fraca	50-55 fraca a razoável

Capítulo 4 – Conclusões e perspectivas futuras

Capítulo 4 - Conclusões e perspectivas futuras

Neste trabalho, apresentam-se e discutem-se os principais resultados da caracterização geológico – geotécnica e geomecânica do maciço rochoso da Mina das Aveleiras (Tibães, Braga).

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, ao longo de cerca de 195 m na rede de galerias da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras.

Deste estudo resultam as seguintes conclusões:

- O reconhecimento e burilamento do conhecimento das unidades geológicas locais: i) corneanas quartzosas; ii) corneanas metapelíticas; iii) aplitóides quartzo-feldspáticos; iv) granito moscovítico de grão fino a médio;
- De salientar a presença de estruturas aplitóides, de reduzida expressão cartográfica, e de filões de quartzo, por vezes brechificado;
- Elaboração de um estudo geológico mineiro, recorrendo à técnica de amostragem linear, dos hasteais da galeria 2 (trecho com cerca de 110 m) e do tramo 2 da galeria 1 (extensão de 45 m) da Mina das Aveleiras, que permitiu o reconhecimento de uma rede de fracturação intensa, com uma atitude dominante NW-SE a N-S e NE-SW e inclinação fundamentalmente sub-vertical;
- Elaboração de um esboço de zonamento geotécnico no qual se exibem as principais unidades geotécnicas, resultado do cruzamento de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica que traduz uma tentativa de delinear a qualidade geotécnica do maciço: i) corneanas quartzosas (com níveis filonianos de quartzo e aplitóides quartzo-feldspáticos); ii) corneanas metapelíticas (com intercalações de aplitóides quartzo-feldspáticos); iii) aplitóides quartzo-feldspáticos (com intercalações de corneanas quartzosas e filões de quartzo brechificado); iv) granito moscovítico de grão fino (por vezes, com passagens de corneanas quartzosas); v) granito moscovítico de grão fino a médio;
- A revisão da cartografia geotécnica do maciço rochoso da Mina das Aveleiras (Tibães, Braga) e o refinamento do zonamento geotécnico estabelecido por LABCARGA (2007/2008) e Neto (2007);
- Em termos de avaliação exploratória da qualidade geomecânica global as galerias estudadas apresentam-se de fraca a razoável (RMR: 39 – 61; Q-system: 1,1 – 3,3; GSI:

30 – 70; HP-value: 1,4 – 5,4). Confrontando os resultados obtidos, anteriormente, com a avaliação geomecânica proposta por LABCARGA (2007/2008) e Neto (2007) para a Galeria 1 (tramo 1), verifica-se que os valores das zonas ZG1.(G2) e ZG2.(G2), *grosso modo* equivalentes às zonas ZG3.(G1) e ZG4.(G1), respectivamente, são coerentes entre si.

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

- A continuação e o refinamento da cartografia geotécnica e estudo da compartimentação do maciço rochoso, nomeadamente das restantes travessas da mina das Aveleiras;
- O aumento da rede de amostragem de material-rocha para a realização de ensaios laboratoriais, nomeadamente, o ensaio de carga pontual (PLT);
- Aprofundamento dos estudos de hidrogeologia mineira das Aveleiras e especialmente o estudo de modelos de fluxo da água subterrânea;
- Uma aplicação mais robusta das classificações geomecânicas, incluindo o desenvolvimento da classificação *Mining Rock Mass Rating* (MRMR; Laubscher, 1977, 1990), com o objectivo de re-avaliar a qualidade e competência geomecânica do maciço rochoso das Aveleiras;
- A modelação geomecânica das galerias do maciço da Mina das Aveleiras, com o intuito de verificar a estabilidade estrutural e a segurança, assim como para proceder ao dimensionamento estrutural de elementos de reforço, recorrendo a programas de cálculo de elementos finitos (e.g., Phase², RockSupport e Unwedge da RocScience).

Capítulo 5 - Referências bibliográficas

Referências Bibliográficas

Aires-Barros, L. (1991). Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 384 pp.

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

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

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

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

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

Barton N. (2011). Dr. Nick Barton's interview, Zagreb, 02.06.2011. In: http://www.isrm.net/fotos/editor2/nl14/interview_vrkljan_barton_isrm_2011.pdf (consultado em Maio de 2012).

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

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

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

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

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

Bieniawski, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, pp. 1-11.

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

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

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

Brady B.H.G. & Brown E.T. (1985) Rock mechanics for underground mining. Allen and Unwin, London.

Brady, B. H. G. & Brown, E. T. (2004). Rock mechanics for underground mining. Kulwer Academic Publishers, Dordrecht. 628 pp.

Braga M.A.S., Nunes J.E.L., Paquet H. & Millot G. (1989). Essai sur les arènes de l'Europe Atlantique. Zonalité climatique. Place de l'arénisation parmi les grands systèmes mondiaux d'altération météorique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309 (2): 1955-1962.

Broch E. & Franklin J. A. (1972). The point load strength test. *Journal Rock Mech. Min. Sci*, 9: 669-697.

Brown E.T. (1991). Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, Ano IV (48): 9-29.*

Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y. & Minami M. (2004) Estimation of Rock Mass Deformation Modulus and Strength of Jointed Hard Rock Masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41: 3-19.

Cargill J.S. & Shakoor A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27: 495–503.

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, Rev. Univ. Aveiro*, 16: 13-31.

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. & 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.

Coelho Dias G.J.A. (2010). Tibães: o encanto da Cerca, o silêncio dos monges e os últimos abades gerais dos beneditinos. *Museu de S. Martinho de Tibães / Mosteiro de S. Bento da Vitória*. 116 pp.

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

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

DGMSG – Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. (1962). *Minas concedidas no Continente, desde Agosto de 1836 a Dezembro de 1962*. 2ª edição ampliada da lista e índice publicados em 1946. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Ministério da Economia, Lisboa. 261 pp.

Dias Costa M.J. (2002). A cerca do mosteiro de São Martinho de Tibães. *Património e Estudos*. IPPAR, Lisboa, 2: 86-95.

Dias, G.; Leterrier, J.; Mendes, A.; Simões, P. P. & Bertrand, J. M. (1998). U-Pb zircon and monazite geochronology of post-collisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (Northern Portugal). *Lithos*, 45, 1/4: 349-369.

Dias, G.; Ferreira, N.; Simões, P. & Mendes, A. (2000a). Syn-and late-tectonic plutonism Braga region (Field trip 1). In: Dias, G.; Noronha, F. & Ferreira, N. (eds.), *Variscan plutonism in the*

Central Iberian Zone, Northern Portugal, Eurogranites'2000 Field Meeting Guide Book, UM/FCUP/IGM. pp. 27-65.

Dias, G.; Noronha, F. & Ferreira, N. (2000b). Introduction [Variscan plutonism in the Central Iberian Zone]. In: Dias, G.; Noronha, F. & Ferreira, N. (eds.), Variscan plutonism in the Central Iberian Zone, Northern Portugal, Eurogranites'2000 Field Meeting Guide Book, UM/FCUP/IGM. pp. 7-26.

Dinis da Gama, C. (1995). Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de Canteras. In: López .

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

Feio, M. (1949). Notas geomorfológicas: III. Capturas na bacia do Cavado. *Bol. Soc. Geol. Portg.*, Porto, 8: 73-78.

Ferreira, N.; Iglésias, M.; Noronha, F.; Pereira, E.; Ribeiro, A. & Ribeiro, M. L. (1987). Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea; A. Carnicero; J. C. Gonzalo; M. López Plaza & M. D. Rodríguez Alonso (eds). *Geología de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico (Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola)*. Editorial Rueda. Madrid. pp. 37-51.

Ferreira N., Dias G., Meireles C. & Braga M.A.S. (2000). Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50000. Notícia Explicativa da Folha 5- D (Braga). 2ª edição. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 68 pp.

Ferrer M. & González de Vallejo L. (2007). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos, 124 pp.

Flor Pereira S. (2010). Inventário das minas de água da área do Mosteiro de Tibães: proposta preliminar de hidrogeo-itinerários. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 123 pp. (Tese de Mestrado).

Fonseca A. N. (1943). Adicional ao plano de lavra da mina de volfrâmio Tibais: memória descritiva. Relatório inédito. 3 pp.

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

Fontes L. (2005). São Martinho de Tibães, Um sítio onde se fez um mosteiro: Ensaio em Arqueologia da Paisagem e da Arquitectura. Instituto Português do Património Arquitectónico, 215 pp.

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

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

Galiza A.C., Ramos L., Fonseca L., Teixeira J. & Chaminé H.I. (2011b). O papel da geotecnia mineira na optimização do desmonte de maciços rochosos fraturados. *Boletim de Minas, DGE*, Lisboa, 46(2): 103-120.

Gates W.C.B. (1995). The hydro-potential (HP) value: a proposed rock classification technique for evaluation of the groundwater potential in fractured bedrock. In: Abstracts from the 1st

symposium on the hydrogeology of Washington State: Washington Department of Ecology, pp. 142.

Gates W.C.B. (1997). The hydro-potential value: a rock classification technique for examination of groundwater potential in fractured bedrock. *Environ Eng Geosci* 3: 231-267.

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

González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.

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

Griffiths, J. S. (2002). *Mapping in Engineering Geology. Key Issues in Earth Sciences*. The Geological Society of London, 1, 287 pp.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hoek, E. & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 34 (8): 1165-1186.

Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses.: the case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57(2): 151-160.

-
- Hoek E., Carranza-Torres C. & Corkum B. (2002). Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition. Proceedings of the NARMS-TAC Conference, Toronto, 1: 267-273.
- Hoek E. & Marinos P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000.
- Hoek E. & Marinos P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks: Int. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 30(2): 85-92.
- Hudson, J. A & Priest, S. D. (1983). Discontinuity frequency in rock masses. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 20: 73-89.
- Hudson, J. A. (1989). Rock mechanics principles in engineering practice. Butterworths. Ciria. London.
- Hudson J.A. & Cosgrove J.W. (1997). Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 34(3/4): p136.1-p136.15.
- Hudson J.A. & Harrison J.P., 2000. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. 2nd edition, Pergamon Press. 444 pp.
- 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 Engineering Geology. (1981a). Recommended symbols for engineering geological mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 24: 227-234.
- IAEG – International Association Engineering Geology. (1981b). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 24: 235-274.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 2005. Special purpose mapping for waste disposal sites. Bulletin IAEG, 64.
- ISRM–International Society for Rock Mechanics. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 15, 6: 319-368.
- ISRM–International Society for Rock Mechanics. (1981). Basic geotechnical description of rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 18: 85-110.
- ISRM–International Society for Rock Mechanics. (1985). Suggested method for determining point load strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 22: 51-60.
- ISRM–International Society for Rock Mechanics. (2007). The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.
- Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 38: 981–94.
- 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. & Geom. Abstr., 39: 395-399.
- Katz, O., Rechesa, Z. & Roegiersc J. C. (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 37: 723-728

LABCARGA – Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada. (2007/08). Mina das Aveleiras: estudo geológico-geotécnico e projecto da estrutura de reforço e de protecção. Relatório para o Mosteiro de S. Martinho de Tibães, Instituto Português do Património Arquitectónico. Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, Instituto Superior de Engenharia do Porto. 5 volumes + 4 anexos. (relatório inédito).

Lagoa A.M. (1941). Mina de Wolframite de Tibais, plano de lavra: memória descritiva e justificativa. 4 pp. + 5 mapas/perfis em anexo. (inédito).

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.

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

Lisle, R. J. & Leyshon, P. R. (2004). *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers*. Second Edition, Cambridge University Press. 112 pp.

Lopes, M.E. (2012). *Geoconservação e valorização do património geológico-mineiro de espaços subterrâneos antigos*. Universidade de Coimbra, 329pp. (Tese de doutoramento).

Lopes M.E., Meixedo P., Neto E.P., Gama Pereira L.C., Gomes A., Afonso M.J., Dias Costa M.J., Trigo J.F. & Chaminé H.I. (2008). Metodologias interdisciplinares em estudos de geoconservação de património geológico-mineiro: o caso da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras (Mire de Tibães). In: *Actas do V Seminário de Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*, UTAD, Vila Real, pp. 91-97.

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

Mandl G. (2005). *Rock joints: the mechanical genesis*. Springer-Verlag. 221 pp.

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

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

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

Marinos P., Hoek E. & Marinos V. (2006) Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65/2: 129-142.

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

Mata A.M.R. & Dias Costa M.J. (1998). Natureza, memória, vida nova na Cerca do Mosteiro de Tibães. In: *Prémio Internacional Carlo Scarpa para o Jardim*. Instituto Português do Património Arquitectónico, Mosteiro S. Martinho de Tibães, pp. 8-25.

Mata A.M.R. (2002). *Fragmentos do Mosteiro de São Martinho de Tibães*. Património e Estudos. IPPAR – Instituto Português do Património Arquitectónico, Lisboa, 2: 80-85.

Meixedo J.P., Lopes M.E., Dias Costa M.J., Trigo J.F. & Chaminé H.I. (2011). Geological and mining heritage in NW Portugal (Mire de Tibães): threats and opportunities for a sustainable second life-cycle. In: Claughton P. & Mills C. (eds.), *Mining Perspectives: Proceedings of the 8th International Mining History Congress 2009*. Cornwall and West Devon Mining Landscape World Heritage Site, Cornwall Council, Truro, pp 97-103 (ISBN 978-1-903798-77-5).

Mello Mendes, F., 1967/1968. *Mecânica das Rochas*. A.E. IST, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

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

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

Neto, E.P. (2007). *Estudo geológico e geomecânico em antigas explorações mineiras: o caso da mina das Aveleiras*. Universidade de Aveiro. (Tese de Mestrado).

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

Oliveira A.A. (1974). *A abadia de Tibães e o seu domínio (1630-1680): estudo social e económico*. Publicações da Faculdade de Letras do Porto. Universidade do Porto, 406 pp.

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

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

Palmström, A. (1995). *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes* PhD Thesis, University of Oslo, 400 p. (Tese de doutoramento).

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.

Peacock, D. C. P., 2006. Predicting Variability in joint frequencies from boreholes. *J. Structural Geology*, 28: 353-361.

Personda – Sociedade de Perfurações e Sondagens. (1994). *Estudo hidrogeológico da Cerca do Mosteiro de Tibães, em Braga. Relatório final para o IPPC, Personda – Sociedade de Perfurações e Sondagens, Lda., Lisboa, 27 pp. + anexos (relatório inédito)*.

Pousada R.V. (1947). *Relatório de novo reconhecimento da mina de volfrâmio denominada Tibais, situada na freguesia de Mire Tibais*. 4 pp. (inédito).

Price D.J. (2009). *Engineering geology: principles and practice*. Springer, 450 pp.

Price D.G. & Freitas M.H. (2009). *Engineering geology: principles and practice*. Springer, 450 pp.

Priest, S. D. & Hudson, J. A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 183-197.

Priest S.D. (1993) *Discontinuity analysis for rock engineering*. Kluwer Academic Publishers. 473 pp.

Priest S.D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall. London, 473 pp.

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.

Ramos T.M. (2009). Ensaios geomecânicos em rochas metassedimentares do maciço da mina das Aveleiras (Mosteiro de Tibães): comparação, potencialidades e limitações. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 217 pp. (Tese de Mestrado).

Ribeiro O., Neiva J.M.C. & Teixeira C. (1943). Depósitos detríticos da bacia do Cavado. Bol. Soc. Geol. Portg., Porto, 3 (1/2): 87-94.

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. (doi:10.1029/2006TC002058).

Ritter W. (1879). *Die Statik der Tunnelgewölbe*. Springer, Berlin.

Rocha, M. (1981). *Mecânica das Rochas*. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 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.

Sequeira Braga, M. A. S. (1987). Arenas e depósitos associados da bacia de drenagem do rio Cavado (Portugal). Contribuição para o estudo da arenização. Universidade do Minho, Braga. 325 pp. (Tese de Doutoramento).

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

Signal B.B. & Gupta R.P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer-Verlag GmbH, 408 pp.

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

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

Soares de Carvalho G. (1992). Depósitos quaternários e cenozóico indiferenciado. In: Pereira, E. (Coord.), *Carta Geológica de Portugal na escala 1/200 000. Notícia Explicativa da Folha 1*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 47-50 pp.

Teixeira C., Medeiros A.C. & Macedo J.R. (1973). *Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50000. Notícia Explicativa da Folha 5- D (Braga)*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 57 pp.

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

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

Trigo J.F., Chaminé H.I., Afonso M.J., Almeida H., Lopes M.E., Meixedo J.P., Gomes A., Teixeira J., Teixeira J.F.A. & Dias Costa M.J. *Geoconservação do património hidrogeológico-mineiro: a antiga mina das Aveleiras (Mosteiro de Tibães)*. *Ingenium, revista Ordem Engenheiros*, Lisboa. (Submetido).

Vilar A. (2008). O volfrâmio de Arouca no contexto da segunda guerra mundial. 2ª edição. Câmara Municipal de Arouca, 290 pp.

West G., 1991. The field description of engineering soils and rocks. Geological Society of London, Professional Handbook Series, Open University Press. 129 pp.

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

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

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

Endereços electrónicos

<http://www.esri.com/news/arcuser/1099/webdata7.html> - Consultado em Maio de 2012

<http://www.proceq.com/> - Consultado em Maio de 2012

Anexos

**Anexo I – Fichas de levantamento geológico-
geomecânico
(Galeria 2 e Galeria 1, Tramo 2 - Mina das Azeleiras)**

Ver CD-ROM em anexo

**Anexo II – Fichas de levantamento geomecânico
(Galeria 2 e Galeria 1, Tramo 2 - Mina das Azeleiras)**

Ver CD-ROM em anexo

**Anexo III – Fichas de ensaios esclerométricos
(Blocos graníticos e aplitóides)**

Ver CD-ROM em anexo

**Anexo VI – Fichas do Ensaio de Carga Pontual
(Provetes graníticos e aplitóides)**

Ver CD-ROM em anexo

**Anexo V Fichas de levantamento geológico-geomecânico
(Galeria 1, Tramo 1 – Mina das Azeleiras); Revisto e
actualizado Labcarga 2007/2008**

Ver CD-ROM em anexo

