



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos): implicações para o modelo geomecânico comportamental

Patrícia Francisca de Sousa Moreira

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

 **POLITÉCNICO
DO PORTO**

Julho 2009



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos): implicações para o modelo geomecânico comportamental

Patrícia Francisca de Sousa Moreira

Nº 1030453

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

Júri

Presidente

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

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

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques
Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

*Dedico esta tese aos meus Pais por toda a compreensão,
a dedicação e o apoio na minha graduação
em Engenharia Geotécnica. Muito obrigado por tudo...*

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento especial a todos quantos, ao longo deste período, de uma ou de outra forma, me incentivaram e apoiaram na elaboração do presente trabalho. Porém, gostaria de destacar, em particular:

➤ Ao Prof. Doutor Helder I. Chaminé (ISEP), orientador científico deste projecto, expresso o meu sincero reconhecimento pela forma dedicada e prestável como sempre me orientou cientificamente e me acompanhou, quer no terreno quer no gabinete, ao longo deste trabalho. Grata pela imensa documentação bibliográfica sobre geomecânica partilhada para desenvolver o presente estudo. Muito agradecida pela leitura minuciosa ao manuscrito original, o meu muito obrigado;

➤ À Dra. Maria José Afonso (ISEP), pela dedicação demonstrada, pela competência e pelo incentivo nas horas difíceis, demonstrados ao longa da orientação do trabalho. Os meus sinceros agradecimentos pela amizade, paciência e apoio em todos os momentos. Por fim, grata pela partilha de resultados inéditos sobre o maciço rochoso de Paranhos que fazem parte da sua investigação de doutoramento;

➤ À Eng^a Maria Eugénia Lopes (ISEP), por todo o apoio prestado na realização dos ensaios laboratoriais e acompanhamento na sua fase de discussão;

➤ Aos colegas Eng^o. Luís Ramos e ao Eng^o. Luís Fonseca pelo apoio na preparação da base de dados geomecânica dos elementos de terreno, bem como a sua adaptação ao ambiente subterrâneo;

➤ Ao Eng. Pedro Guimarães pelo apoio no trabalho de campo, bem como ao Sr. Carlos Ferreira, pelo apoio na realização do ensaio de flexão;

➤ Um agradecimento especial aos directores dos Laboratórios do ISEP, Prof. Doutor H. I. Chaminé do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA) e do Prof. Doutor J. A. Fernandes do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), por todas as facilidades na utilização dos recursos dos laboratórios do ISEP. Este trabalho enquadra-se e recebeu apoio do projecto GROUNDURBAN (POCI/CTE-GEX/59081/2004) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e apoio parcial do projecto HIDROURBAN – *“Hidrogeologia, geomecânica e geoconservação de antigas minas de água: contribuição para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e peri-urbanas”* no quadro do reequipamento do LABCARGA – IPP-ISEP | PADInv'2007;

➤ Ao Eng^o. G. Fontes pelo apoio operacional imprescindível à concretização desta investigação;

➤ A todos os Docentes do ISEP que contribuíram para a minha formação e me fizeram capaz de chegar até aqui...;

➤ Aos meus amigos e colegas geotécnicos e todos os outros, que me acompanharam e apoiaram ao longo da minha vida de estudante, principalmente ao Rui Silva, à Tânia Ramos, à Ana Sofia Coelho, pela entre-ajuda prestada em algumas fases do presente trabalho;

➤ Por fim, aos meus Pais por toda a compreensão, a dedicação e o apoio prestado... *O meu muito obrigado !*

Palavras-chave

Maçiços rochosos, Geomecânica, Técnica de amostragem linear, Hidrogeotecnia.

Resumo

Este trabalho pretende enfatizar a importância da elaboração de uma base de dados extensa e robusta para o melhoramento da cartografia geotécnica subterrânea do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos, Porto). Este estudo envolveu o refinamento das principais características geomecânicas ao longo de um traçado com cerca de 400m, para a caracterização do maciço rochoso subterrâneo de Arca d'Água. Para esta caracterização foram coligidos e uniformizados dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos relativos a cinco campanhas de campo, realizadas entre 2005 e 2009, tendo estado a técnica da amostragem linear aplicada ao grau de compartimentação do maciço rochoso na base de todos os dados. Além disso, procedeu-se a um tratamento estatístico das descontinuidades, bem como dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos a estas associados. O zonamento geotécnico do maciço granítico foi refinado sempre em estreita ligação com o conhecimento das características do maciço *in situ*. Pretende-se que esta metodologia contribua para um melhor conhecimento da compartimentação dos maciços rochosos em geral e, em particular, do modelo geomecânico comportamental do maciço rochoso do Porto.

Keywords

Rock mass, Geomechanics, Scanline sampling technique, Hydrogeotechnics.

Abstract

This work intends to emphasize the importance of an extensive database in order to support the geotechnical mapping of underground Arca d'Água granitic rock masse (Paranhos, Porto) . An improvement of the main geomechanical constraints was done along an underground extension of *ca.* 400m, approximately, for the characterization of Arca d'Água granitic massif. For this characterisation, geological, geotechnical and geomechanical data from five fieldwork campaigns, between 2005 and 2009, were compiled and integrated. On the basis of all these data was the scanline sampling technique of discontinuities applied to the rock block delimitation. In addition, the evaluation methods of field data for discontinuities sets and the statistical characterisation of all their parameters are also presented. The geotechnical zoning of the granitic rock mass was refined in a straight connection with the knowledge of *in situ* rock massif features. This methodology contributed to a better understanding of the rock-mass block delimitation and proved valuable in deepening our knowledge, in particularly, on Porto rock mass compartmental geomechanical modelling.

ÍNDICE

Resumo	xi
Abstract	xiii
1. Enquadramento e objectivos	1
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objectivos e metodologias	3
2. Caracterização geológica-geotécnica de maciços rochosos	7
2.1. Generalidades	9
2.2. Fases do estudo geológico geotécnico	10
2.3. Descontinuidades: noção, tipo e génese	11
2.4. Caracterização e compartimentação do maciço rochoso	13
2.4.1. Metodologia e sistemática	13
2.4.2. Reconhecimento geológico	15
2.4.3. Cartografia das superfícies expostas do maciço	15
2.4.4. Parâmetros dos maciços rochosos	17
2.4.5. Parâmetros geológico – geotécnicos das descontinuidades	21
2.4.5.1. Atitude geológica (direcção/inclinação)	22
2.4.5.2. Grau de fracturação e espaçamento	23
2.4.5.3. Continuidade ou persistência	25
2.4.5.4. Rugosidade	25
2.4.5.5. Resistência da parede das descontinuidades	26
2.4.5.6. Abertura	28
2.4.5.7. Enchimento	29
2.4.5.8. Grau de alteração	30
2.4.5.9. Percolação de água	31
2.4.6. Técnica de amostragem linear aplicada a superfícies de descontinuidades	31
2.4.7. Técnicas “in situ”	33
2.4.7.1. Ensaio esclerométrico	33
2.4.8. Técnicas laboratoriais	39
2.4.8.1. Ensaio de carga pontual (PLT)	46
2.4.8.2. Ensaio de resistência à flexão sob carga centrada	52
2.4.9. Zonamento geotécnico	53
3. Estudo da compartimentação do maciço rochoso granítico subterrâneo de Arca d'Água (Paranhos, Porto)	55
3.1. Enquadramento geotécnico, geomorfológico e hidrogeológico regional	55
3.1.1. Geotectónica regional	55
3.1.2. Geomorfologia regional	57

3.1.3. Hidrogeologia regional	58
3.2. Geologia e geotécnia do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado	58
3.2.1. Generalidades. Materiais e métodos	58
3.2.2. Aspectos históricos sobre o Manancial de Paranhos	61
3.2.3. Geologia de superfície: traços gerais	63
3.2.4. Geologia e geotécnia subterrânea do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”	64
3.2.5. Parâmetros geológico – geotécnicos e geomecânicos: apresentação e caracterização de dados	65
3.3. Proposta de um zonamento geotécnico – geomecânico	82
3.4. Estimativa de custos	109
4. Conclusões	111
5. Referências bibliográficas	115
Anexos	123

Índice de Figuras

Figura 1. Bloco diagrama onde são visíveis diferentes tipos de descontinuidades	12
Figura 2. Tipos de falhas e de dobras	12
Figura 3. Representação do número de famílias mediante bloco-diagramas	18
Figura 4. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades	22
Figura 5. Atitude de uma descontinuidade	22
Figura 6. Diagramas geológico-estruturais produzidos com auxílio do programa <i>Dips</i>	23
Figura 7. Ondulação e rugosidade de uma superfície de descontinuidade	26
Figura 8. Esquema do dispositivo para levantamento de descontinuidades pela técnica de amostragem linear	31
Figura 9. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo, com aplicação da técnica de amostragem linear	33
Figura 10. Esclerómetro portátil tipo L da Proceq®	34
Figura 11. Exemplo de aplicação do martelo de Schmidt num maciço rochoso	35
Figura 12. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo de Schmidt	35
Figura 13. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo, com recurso ao martelo de Schmidt	36
Figura 14. Aspectos de algumas das amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais	38
Figura 15. Aspectos diversos da serra eléctrica (Universal B300) utilizada na serragem das amostras	38
Figura 16. Exemplos de provetes a ensaiar por intermédio do ensaio de carga pontual e do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada	39
Figura 17. Representação esquemática do equipamento para a execução do Ensaio de Carga Pontual	39
Figura 18. Equipamento <i>ELE Point Apparatus (modelo 77-0110)</i> para execução do ensaio de carga pontual (PLT)	40
Figura 19. Execução do Ensaio de Carga Pontual	40
Figura 20. Ensaio diametral	41
Figura 21. Roturas típicas para ensaios diametraes válidos	41
Figura 22. Ensaio axial	42
Figura 23. Roturas típicas para ensaios axiais válidos e inválidos	42
Figura 24. Ensaio em blocos e em fragmentos irregulares	42
Figura 25. Roturas típicas para ensaios em blocos e em fragmentos irregulares válidos	43
Figura 26. Gráfico para o cálculo de $I_s (50)$	44
Figura 27. Gráfico para a correcção do diâmetro	44
Figura 28. Gráfico que estabelece a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão uniaxial	45
Figura 29. Ficha-tipo para o registo dos dados necessários ao cálculo da resistência à carga pontual	46
Figura 30. Método sob momento constante e método sob carga centrada no ensaio de flexão	47
Figura 31. Equipamento <i>FORM+TEST PRÜFSYSTEME DIGIMESS M-10</i> para a execução do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada	47

Figura 32. Esquema de ensaio de um provete com a carga exercida perpendicularmente aos planos de anisotropia	48
Figura 33. Esquema de ensaio de um provete com a carga exercida paralelamente aos planos de anisotropia	48
Figura 34. Esquema de ensaio de um provete com a carga exercida perpendicularmente aos topos dos planos de anisotropia	49
Figura 35. Esquema do dispositivo de ensaio para flexão sob carga concentrada	49
Figura 36. Ficha-tipo para a determinação da resistência à flexão sob carga centrada	51
Figura 37. Mapa geológico regional da área metropolitana do Porto	56
Figura 38. Hipsometria da região do Porto	57
Figura 39. Imagem de satélite da área de estudo	59
Figura 40. Exemplo de compilação e uniformização dos dados geológico-geomecânicos de campo	60
Figura 41. Exemplo de compilação e uniformização dos ensaios “in situ” com o esclerómetro portátil	60
Figura 42. Painel existente à entrada de uma das Arcas, conhecida como “Arca Nova”, do Manancial de Paranhos	61
Figura 43. Aspectos do interior da Arca “Nova”	62
Figura 44. Caleira em granito	62
Figura 45. Unidades geológicas na região envolvente ao traçado do túnel “Arca d’Água – Rua Nova do Regado”	63
Figura 46. Grau de alteração do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).	65
Figura 47. Mapa do grau de alteração do maciço do túnel “Arca d’Água – Rua Nova do Regado”	66
Figura 48. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	67
Figura 49. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=1754) do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	68
Figura 50. Azimute médio das descontinuidades (n=1754) do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	68
Figura 51. Inclinação média das descontinuidades (n=1754) do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	69
Figura 52. Abertura das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	69
Figura 53. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	70
Figura 54. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	71
Figura 55. Continuidade das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	71

Figura 56. Grau de curvatura das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	72
Figura 57. Rugosidade das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	73
Figura 58. Enchimento das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado	73
Figura 59. Presença de água nas descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	74
Figura 60. Resistência à compressão uniaxial do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	75
Figura 61. Exemplos de provetes destruídos na realização do ensaio esclerométrico	75
Figura 62. Resistência à compressão uniaxial laboratorial	76
Figura 63. Exemplo de provete fracturado com veio de quartzo	76
Figura 64. Numeração dos provetes ensaiados no PLT	77
Figura 65. Ensaio de Carga Pontual sobre provetes prismáticos	77
Figura 66. Exemplos de ensaios rejeitados	77
Figura 67. Determinação da resistência à compressão uniaxial a partir do índice de resistência à carga pontual, para os 17 provetes ensaiados.	78
Figura 68. Resistência à compressão uniaxial <i>versus</i> distância à origem da <i>scanline</i>	79
Figura 69. Classes de resistência, segundo o ensaio de carga pontual	80
Figura 70. Exemplo do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada	80
Figura 71. Exemplos de ensaios rejeitados	81
Figura 72. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”	84
Figura 73. Grau de alteração da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	85
Figura 74. Zona geotécnica ZG1 do maciço do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”	86
Figura 75. Tipos de descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	87
Figura 76. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=1292) da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	87
Figura 77. Abertura das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	88
Figura 78. Espaçamento das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	88
Figura 79. Continuidade das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	89
Figura 80. Terminação das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	89

Figura 81. Curvatura das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	90
Figura 82. Rugosidade das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	90
Figura 83. Enchimento das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	91
Figura 84. Presença de água nas descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	91
Figura 85. Resistência à compressão uniaxial da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	92
Figura 86. Resistência à compressão uniaxial realizada em laboratório, correspondente a material-rocha da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	92
Figura 87. Resistência à compressão uniaxial (PLT) das amostras correspondentes à zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	93
Figura 88. Grau de alteração da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	94
Figura 89. Zona geotécnica ZG2 do maciço do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”	95
Figura 90. Tipos de descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	96
Figura 91. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=441) da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	96
Figura 92. Abertura das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	97
Figura 93. Espaçamento das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	97
Figura 94. Continuidade das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	98
Figura 95. Terminação das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	98
Figura 96. Curvatura das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	99
Figura 97. Rugosidade das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	99
Figura 98. Enchimento das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	100
Figura 99. Presença de água nas descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	100

Figura 100. Resistência à compressão uniaxial da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	101
Figura 101. Resistência à compressão uniaxial realizada em laboratório, correspondente a material-rocha da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	101
Figura 102. Resistência à compressão uniaxial (PLT) das amostras correspondentes à zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	102
Figura 103. Zona geotécnica ZG3 do maciço do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”	104
Figura 104. Tipos de descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	105
Figura 105. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=21) da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	105
Figura 106. Abertura das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	106
Figura 107. Espaçamento das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	106
Figura 108. Terminação das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	107
Figura 109. Curvatura das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	107
Figura 110. Enchimento das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto)	108

Índice de Quadros

Quadro 1. Diferentes tipos de descontinuidades	11
Quadro 2. Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades	18
Quadro 3. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico	20
Quadro 4. Classificação do maciço rochoso em função do tamanho e forma dos blocos	20
Quadro 5. Terminologia para caracterizar os maciços rochosos em função do espaçamento das descontinuidades	24
Quadro 6. Descrição da continuidade das descontinuidades	25
Quadro 7. Classificação da rugosidade das descontinuidades	26
Quadro 8. Terminologia para caracterização do estado de resistência para o material-rocha	27
Quadro 9. Descrição do grau de alteração meteórica	28
Quadro 10. Abertura das descontinuidades	29
Quadro 11. Graus de alteração	30
Quadro 12. Classificação da resistência à compressão simples	37
Quadro 13. Grau de qualidade do material-rocha (R) versus a resistência à compressão simples (σ_c) e o índice de carga pontual $I_{S(50)}$	37
Quadro 14. Classificação prática dos resultados dos ensaios para a pedra em geral utilizada na construção	51
Quadro 15. Valores médios do índice de resistência à carga pontual, da resistência à compressão uniaxial e da classe de resistência, para cada um dos pontos de amostragem.	79
Quadro 16. Valores médios da resistência à flexão (R_f) para os dez pontos de amostragem.	81
Quadro 17. Algumas características das zonas geotécnicas definidas no maciço subterrâneo de Paranhos.	82
Quadro 18. Algumas características das unidades geotécnicas de superfície, G2, G9-A e G9-B, definidas para a cidade do Porto	83
Quadro 19. Valor médio R_f (MPa) para a Zona Geotécnica 1.	93
Quadro 20. Valor médio R_f (MPa) para a Zona Geotécnica 2.	102
Quadro 21. As fases constituintes do trabalho e respectivos custos (s/ IVA, €) associados ao Projecto.	110

Índice de Fórmulas

[1] – Índice do tamanho do bloco (I_b)	19
[2] – Número total de descontinuidades que interceptam uma unidade de volume (J_v)	19
[3] – Frequência das descontinuidades (λ)	19
[4] – Índice RQD (Rock Quality Designation)	20
[5] – Valor teórico mínimo do RQD	21
[6] – Resistência à carga pontual (I_s)	43
[7] – Valor corrigido da resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$)	44
[8] – Diâmetro equivalente (D_e)	45
[9] – Resistência mecânica à flexão (R_f)	49

Índice de Anexos

Anexo nº1 – Ficha de levantamento geológico – geomecânico	Ver cd em anexo
Anexo nº2 – Ficha de levantameto geomecânico	Ver cd em anexo
Anexo nº3 – Ficha de levantamento geomecânico laboratorial	Ver cd em anexo
Anexo nº4 – Ficha de Ensaio de Carga Pontual	Ver cd em anexo
Anexo nº5 – Ficha de Ensaio de Resistência à flexão sob carga centrada	Ver cd em anexo
Anexo nº6 – Mapa do grau de alteração	137
Anexo nº7 – Mapa do zonamento geotécnico	139

1. Enquadramento e Objectivos

1. Enquadramento e objectivos

1.1. Enquadramento

Este trabalho insere-se na Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano, 2º semestre, do curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Instituto Politécnico do Porto (IPP).

A presente dissertação enquadra-se no espírito do projecto GROUNDURBAN – “*Urban groundwater and environmental management in the Northwest Portugal*” (POCI/CTE-GEX/59081/2004) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, integrado na linha de investigação de Recursos Hídricos Subterrâneos da área metropolitana do Porto e em desenvolvimento no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA) do ISEP, em parceria, entre outros, com o Centro GeoBioTec (Grupo de Georrecursos, Geotecnia e Geomateriais) da Universidade de Aveiro e do Centro de Petrologia e Geoquímica (CEPGIST) do Instituto Superior Técnico e, ainda, no quadro de apoio de reequipamento científico LABCARGA-IPP-ISEP|PAD'2007/08 através 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*”).

1.2. Objectivos e metodologias

Esta dissertação tem como objectivo principal proceder ao refinamento da caracterização das condicionantes geológico-geotécnicas e geomecânicas do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos), contribuindo desta forma para o conhecimento mais aprofundado dos subterrâneos da cidade do Porto e, numa forma geral, para a caracterização da compartimentação de maciços rochosos graníticos fracturados tendo em vista a avaliação da rede de fracturação, da sua qualidade geotécnica e das suas implicações na circulação da água subterrânea.

Para o efeito, recorreu-se à rede de túneis da cidade do Porto correspondente ao manancial de Paranhos (também conhecido como manancial de Arca d'Água), o qual constituiu, durante mais de seis séculos, uma das principais fontes de abastecimento de água da população da cidade do Porto (Fontes, 1908; Amorim & Pinto, 2001).

Esta dissertação resultou de um exaustivo trabalho de gabinete, o qual integrou a compilação, uniformização e tratamento de dados geológico-geotécnicos e geomecânicos realizados em cinco campanhas de terreno no período entre 2005 e 2009, tendo estado a signatária envolvida numa destas campanhas, a de 2007. Além disso, em Abril de 2009, foi realizada uma campanha de amostragem de material-rocha, na qual a signatária participou, para os ensaios geomecânicos laboratoriais, em particular, o ensaio esclerométrico, o ensaio de carga pontual e o ensaio de flexão. Na campanha de Abril de 2009, a Eng^a Maria Eugénia Lopes (DEG-ISEP), participou na selecção e colheita do material rochoso. Todas as campanhas foram realizadas sob a coordenação do Prof. Doutor Helder I. Chaminé (DEG-ISEP) e algumas delas foram coadjuvadas pela Dra. Maria José Afonso (DEG-ISEP). O presente trabalho retoma, actualiza e expande o estudo de P. Moreira (2008), enquadrando-se, igualmente, nos trabalhos de investigação de doutoramento de M. J. Afonso (*in prep.*) e M. E. Lopes (*in prep.*).

Os resultados que se apresentam na descrição do caso de estudo correspondem a uma parte do traçado subterrâneo com maciço rochoso exposto do Manancial de Paranhos, com uma extensão aproximada de 400 metros, que se prolonga desde o Jardim de Arca d'Água até à rua Nova do Regado (cidade do Porto).

No total foram tratados os dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos “*in situ*” referentes a 1754 descontinuidades e a 294 estações para ensaios geomecânicos, os quais resultaram da utilização da técnica de amostragem linear aplicada a maciços rochosos (*e.g.*, Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Peacock et al., 2003) e da aplicação dos critérios propostos pela ISRM (1978, 1981, 2007), da GSE (1995) e da ASTM (2001). Além disso, foram ensaiados em laboratório 234 provetes, recorrendo aos ensaios de carga pontual e de flexão (EN 12372:2006; ISRM, 2007).

Não obstante já existirem fichas de registo tipo para o levantamento geológico-geomecânico (*e.g.*, ISRM, 1978; González de Vallejo et al., 2002) foi necessário proceder, quer à sua uniformização quer à sua actualização, conduzindo à criação de novas fichas-modelo para o registo dos dados geomecânicos.

Todos os dados foram compilados e tratados numa base de dados em *Microsoft®Excel 2007 – ScanGeoData* [criada e desenvolvida por Luís Ramos, Luís Fonseca, Helder I. Chaminé e Carlos Galiza] (Ramos, 2008; Fonseca, 2008; Ramos et al., 2009). O tratamento estatístico das descontinuidades, que conduziu à definição das principais famílias de descontinuidades, foi feito recorrendo à elaboração de diagramas de contorno estrutural e de rosetas, com recurso ao programa geo-informático *Dips v. 5.1* da *Rocscience®*, cuja licença está salvaguardada pelo LABCARGA-ISEP.

O zonamento geotécnico do maciço granítico foi realizado de acordo com os princípios definidos na bibliografia da especialidade (e.g., Terzaghi, 1965; Brady & Brown, 2004; ISRM, 2007), pelo que foi definido em estreita ligação com o conhecimento das características do maciço rochoso *in situ* e com os resultados laboratoriais obtidos.

2. Caracterização Geológico – Geotécnica de Maciços Rochosos

2. Caracterização geológico – geotécnica de maciços rochosos

2.1. Generalidades

Os maciços rochosos podem ser definidos como *“massas rochosas constituídas por um ou mais tipos litológicos, localizados num determinado contexto espacial e estando afectadas por descontinuidades que conferem ao conjunto uma anisotropia”* (Hoek, 2007). A esta definição poder-se-á acrescentar a possível presença de água, como factor de grande incidência geotécnica. Deste modo, é impossível conhecer em pormenor cada um dos elementos constituintes do maciço: matriz rochosa e descontinuidades, mais ainda, é imprescindível conhecer o comportamento isolado ou combinado destes elementos face a solicitações externas.

O estudo dos maciços não é simples e os custos implicados nesse estudo podem ser muito elevados, daí que a sua planificação deva ser efectuada com muito cuidado, de modo a efectuar apenas os trabalhos necessários aproveitando-os ao máximo. É claro que, quando a investigação geotécnica é realizada sem recorrer a um plano prévio e como complemento de um levantamento geológico, para cumprir apenas formalidades e constrangimentos contratuais que obrigam à sua execução, o seu valor é escasso ou nulo. Daí que muitas vezes estes estudos sejam vistos como duvidosos, especialmente por aqueles que não os usam de forma adequada. Por outro lado, a ausência destes estudos, que conduz por vezes a desastres ou derrapagens financeiras enormes, mostra como estes são imprescindíveis nas grandes obras. Assim, quanto maior for o profissionalismo do projectista e do construtor maior consideração merecerão os trabalhos de investigação dos maciços. Felizmente, com o decorrer do tempo a análise dos terrenos em Engenharia tem vindo a adquirir importância, de modo que hoje é inconcebível abordar um projecto de uma obra de grande envergadura sem incluir estudos detalhados das características dos maciços.

Os trabalhos de investigação dos maciços rochosos têm como objectivo geral conhecer as suas características, que em maior ou menor grau podem afectar ou ser afectadas pela realização de uma obra. Para além deste objectivo geral podem-se definir os seguintes objectivos específicos (González de Vallejo et al., 2002): definição das litologias, da estrutura geológica, da compartimentação do maciço, das propriedades geotécnicas dos materiais que constituem o maciço; definição do nível hidrostático e das suas variações no decorrer das estações do ano ou introduzidas pela construção da obra; condicionantes perigosas tais como taludes instáveis, falhas activas ou potencialmente activas, sismicidade regional, assentamentos, colapsos, soerguimentos do terreno; resposta do terreno face às variações das condições naturais, provocadas pela construção ou utilização da obra e adequação dos materiais no seu uso em obra.

Pode-se então concluir que o objectivo de uma investigação num dado local no âmbito da Engenharia de maciços rochosos é criar e estabelecer parâmetros operacionais num quadro amplo a diversas escalas dos aspectos geométricos, mecânicos e construtivos e dos aspectos da segurança operacional de uma estrutura no maciço (Hoek, 2007). Actualmente, os métodos disponíveis para estabelecer, do ponto de vista geotécnico, a investigação de um dado local deverão incluir uma análise relativa à segurança, prazos de execução e custos envolvidos (Mazzocola et al., 1997).

É fundamental o acompanhamento técnico e sistemático de uma dada obra de Engenharia para auxiliar a tomada de decisão, quer nos aspectos mais amplos do projecto quer na resolução de problemas pontuais. Assim, em estudos de caracterização geotécnica e geomecânica de maciços fracturados e contribuição da geologia e da geomorfologia é de extrema importância nas várias fases de qualquer projecto de Engenharia de maciços rochosos (e.g., Terzaghi, 1965; Rocha, 1981; Vidal Romani & Twidale, 1999).

2.2. Fases do estudo geológico e geotécnico

Os meios que actualmente existem para efectuar estudos geotécnicos de qualidade são muitos e variados. Convém fazer a advertência de que a acumulação de métodos e meios não é garantia de uma boa investigação; um bom estudo será aquele em que os métodos escolhidos e o número de provas e ensaios são adequados ao caso concreto a analisar. Muitas vezes o descrédito de certas metodologias não está nelas mas sim no mau uso que delas se faz. Para conseguir esse objectivo os estudos devem começar com uma análise dos materiais prévios que se obtém, seguindo-se um reconhecimento *in situ* que permita fazer um relatório geológico prévio, com base no qual se deve estabelecer o programa de estudo geotécnico.

Estes estudos geotécnicos não têm todos o mesmo nível ou grau de aprofundamento, o qual varia consoante a importância da obra, da dificuldade apresentada pelo maciço, etc. Em qualquer estudo podem definir-se diferentes graus de aprofundamento ou actuações que implicam diferentes tipos de actividades/trabalhos.

O estudo do maciço tem diferentes etapas, que vão desde a concepção de uma obra até ao início do seu funcionamento. O trabalho do técnico de geoengenharia, nos casos de um dado estudo completo, desenvolve-se em cinco etapas principais: viabilidade, ante-projecto, projecto, construção e manutenção.

2.3. Descontinuidades: noção, tipo e génese

O estudo das descontinuidades de um maciço rochoso é de extrema importância, pois estas estruturas condicionam, de maneira muito forte, o comportamento dos maciços rochosos, especialmente em relação à deformabilidade, podendo controlar toda a estabilidade do maciço rochoso. Na designação de descontinuidade engloba-se qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso (*e.g.*, diaclases, falhas, superfícies de estratificação e de xistosidade, superfícies de contacto entre limites geológicos, etc.). Em termos práticos pode-se designar por descontinuidade qualquer superfície natural em que a resistência à tracção é nula ou muito baixa (ISRM, 1978, 1981). Algumas descontinuidades, tais como as falhas e as diaclases de grande extensão lateral, merecem um estudo individualizado, devido às suas dimensões expressivas em relação ao volume do maciço rochoso considerado, e por possuírem, em geral propriedades muito distintas das demais estruturas presentes no maciço rochoso. As descontinuidades de menor resistência que, isoladamente ou associadamente, respondem pela estruturação do meio rochoso e, em geral, ocorrem em grande número, merecem estudo conjunto revestido de carácter estatístico.

No quadro 1 apresentam-se os diferentes tipos de descontinuidades, agrupando-se estas em sistemáticas, quando aparecem em famílias, e em singulares, quando aparecem num único plano que atravessa o maciço rochoso.

Quadro 1. Diferentes tipos de descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	<ul style="list-style-type: none"> - Planos de estratificação - Planos de laminação e clivagem de fractura - Planos de xistosidade - Diaclases e fissuras 	<ul style="list-style-type: none"> - Falhas - Filões - Discordância
Lineares	<ul style="list-style-type: none"> - Intersecção de descontinuidades planares - Lineações 	<ul style="list-style-type: none"> - Eixos de dobras

Todos os maciços rochosos, para além de serem normalmente estruturas descontínuas e heterogéneas, apresentam, em regra, uma evidente anisotropia. Esta é devida, por um lado à anisotropia do material rochoso e, por outro lado, às famílias de descontinuidades (figura 1) que compartimentam os maciços. Esta última contribuição é, em geral, a mais relevante, não só no que diz respeito à deformabilidade mas também à resistência dos maciços rochosos.

Diaclases (ou juntas) são superfícies de rotura de uma rocha, ao longo das quais não se regista um apreciável movimento relativo dos blocos que separam. Distinguem-se, portanto, das falhas por não darem lugar a qualquer rejeito.

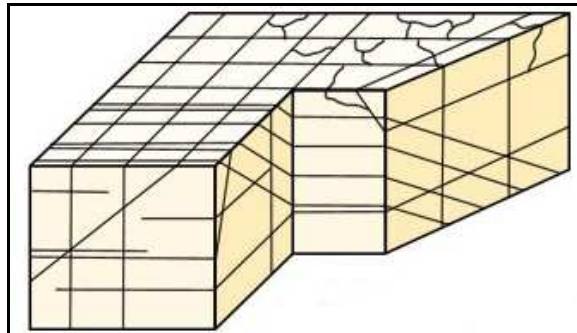


Figura 1. Bloco diagrama onde são visíveis diferentes tipos de descontinuidades (Loczy & Ladeira, 1980).

As diaclases constituem estruturas planares não penetrativas, características de um comportamento frágil ou semifrágil das rochas. Estes planos de rotura ocorrem, portanto, em rochas competentes e são típicos de uma resposta das rochas sujeitas a um estado de tensão quando localizadas a níveis estruturais superiores. As verdadeiras diaclases são estruturas secundárias que se podem formar em todos os estados da deformação de uma rocha, desde a fase de consolidação dos sedimentos às fases terminais de um depósito tectónico ou, mesmo, após este. No entanto, estruturas análogas, mas primárias, são também descritas como sendo diaclases. É o caso da maioria das “diaclases” observadas num maciço granítico. Se, por vezes, se observam diaclases em rochas que não patenteiam qualquer deformação, mais frequentemente associam-se a outras estruturas, quer típicas de um comportamento dúctil-frágil (falhas), quer típicas de um comportamento dúctil (dobras) (figura 2).

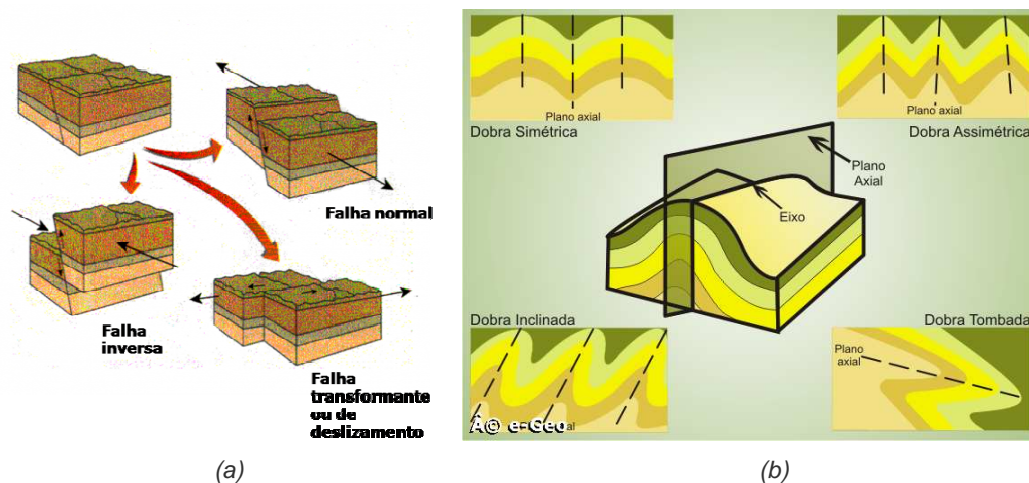


Figura 2. Tipos de falhas (a) e de dobras (b) [www.biogetec.wordpress.com (a); www.e-geo.ineti.pt (b)].

Diversos mecanismos têm sido avançados para explicar a formação das diaclases: i) actuação de esforços de torção; ii) mecanismos de fadiga das rochas. Prevalece, contudo a convicção de que as diaclases se repartem por dois tipos principais, quanto à sua origem (*e.g.*, Palmström, 1995; Davis & Reynolds, 1996; Sodré Borges, 2002). Na discussão sobre a possibilidade de ocorrência dos dois tipos de diaclases, um dos argumentos fulcrais tem-se centrado   volta das estruturas plumosas observadas nos planos de diaclasamento.

Durante o soerguimento tect nico do maciço, possíveis varia es da pressão intersticial presente nas rochas desempenharão um papel fundamental na g nese da fractura o. Consoante o valor daquela pressão assim a fractura o poderá ser por corte ou por trac o, podendo em situa es limite, oscilar, num mesmo local, entre os dois modos. Então poder-se-  observar uma t pica estrutura (*e.g.*, veio ou filonete) de trac o prolongar-se sob a forma de *tension gashes* dispostas em degrau, como   t pico das zonas de cisalhamento frágil – dúctil (Sodré Borges, 2002).

2.4. Caracteriza o e compartimenta o do maciço rochoso

2.4.1. Metodologia e sistemática

A descri o e caracteriza o dos maciços rochosos são vitais em todos os estudos de Engenharia Geotécnica, cujo objectivo   o conhecimento das propriedades e características dos materiais rochosos. Estes trabalhos são realizados durante as primeiras etapas de investiga o *in situ*. Os trabalhos de campo permitem obter a informa o necessária para avaliar o comportamento geotécnico do maciço rochoso, planificar as fases de investiga o mais avançadas e interpretar os resultados que se obtenham das mesmas. Devido   grande variedade de condicionantes e propriedades, a caracteriza o dos maciços pode ser uma tarefa complexa, sobretudo se os materiais rochosos e terrosos estiverem muito fracturados e/ou meteorizados. Em todas as descri es devem-se incluir todos os aspectos e parâmetros que possam ser observados, deduzidos e medidos no afloramento.

As descri es dos maciços rochosos com fins geotécnicos necessitam de aten es e medidas adicionais às geológicas; assim se justifica a necessidade de estabelecer uma sistemática que uniformize critérios e facilite a comunica o entre todos os profissionais que tenham de realizar trabalhos semelhantes. Estas descri es podem implicar um certo grau de subjectividade que se deve evitar, na medida do possível, realizando observa es sistemáticas e utilizando uma terminologia padronizada (ISRM, 1978, 1981), tendo em conta os seguintes aspectos:

- todos os factores devem ser examinados sistematicamente e com uma sequência lógica;
- não se deve omitir nenhuma informação mais relevante;
- as descrições devem caracterizar de uma forma precisa o maciço e permitir a dedução da informação mais relevante;
- o número de dados deve ser, se possível, estatisticamente representativo.

A caracterização de cada zona geotécnica deve realizar-se de uma forma objectiva e individualizada, e incluir o estudo da matriz rochosa, das discontinuidades e do conjunto do maciço, descrevendo tanto as suas propriedades intrínsecas como os factores externos que condicionam o seu comportamento.

A sistemática para a descrição dos maciços rochosos pode-se resumir nas seguintes etapas (ISRM, 1978, 1981):

- descrição das características gerais do afloramento — geologia estrutural, tipo de discontinuidades, composição mineralógica, textura do material-rocha e grau de alteração;
- divisão em zonas geotécnicas e descrição geral de cada zona — a divisão em zonas mais ou menos homogéneas realiza-se a partir de critérios fundamentalmente litológicos e geológico-estruturais. O número de zonas que se estabelece e a extensão das mesmas dependerá do grau de heterogeneidade dos materiais e estruturas que formam o maciço rochoso;
- descrição pormenorizada de cada zona geotécnica — esta descrição é levada a cabo em separado e detalhadamente, o mais objectiva e clara possível, recorrendo-se, normalmente, a uma terminologia recomendada (*e.g.*, ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCFF, 1996);
- descrição dos parâmetros do maciço rochoso — a partir de dados recolhidos em cada estação geológico-geotécnica. Além disso, estabelecem-se parâmetros referentes ao número de famílias de discontinuidades, orientação e características representativas a cada uma delas, determinando a sua importância relativa, tamanho, forma dos blocos, grau de alteração, etc;
- caracterização global e classificação geomecânica do maciço rochoso — tem como objectivo definir a qualidade e resistência do maciço, através da quantificação de parâmetros geológico-geotécnicos e modelação físico-matemática.

2.4.2. Reconhecimento geológico

Um estudo geológico e geotécnico de qualquer maciço interessado por obras de Engenharia, não deve ser iniciado sem se proceder ao seu reconhecimento. Este reconhecimento deve-se iniciar sempre pela análise da informação existente relativamente à região em estudo, nomeadamente no que se refere a elementos de natureza topográfica, geológica, sísmológica e geotécnica com recolha sistemática da informação possível que contemple a área em estudo recorrendo ao estudo selectivo da bibliografia regional, à análise de mapas topográficos e fotografias aéreas e/ou imagens de satélite e, por fim, ao estudo, caso existam, dos relatórios geológicos e geotécnicos preliminares.

Em regiões com razoável índice de desenvolvimento existe, em regra, informação de muito valor em relação aos aspectos mencionados. O estudo dessa informação permite com frequência fazer a análise da história geológica da zona e a previsão da sua evolução geomorfológica, em consequência das obras que se pretende construir. Em certos casos, a análise dos elementos disponíveis poderá permitir informar correctamente o projecto das obras, levando à dispensa de trabalhos complementares.

Após a recolha e análise dos elementos existentes, há que proceder ao reconhecimento de campo abrangendo sempre maior área do que a directamente interessada pela obra, de modo a permitir fazer uma ideia correcta das características geológicas regionais. A finalidade do reconhecimento é, em grande parte dos casos, a elaboração da cartografia geológica a escala adequada ao tipo e dimensão das obras.

Mas o reconhecimento não comporta apenas a definição dos aspectos geomorfológicos, litológicos e estruturais. É igualmente importante definir, se possível, as características hidrogeológicas dos maciços e da actividade sísmica da região.

Com este estudo prioritário, consegue-se estabelecer o desenvolvimento das várias unidades geológicas ocorrentes, bem como de acidentes geotectónicos (à escala regional e local) que se considerem de importância para o projecto e para a obra.

2.4.3. Cartografia das superfícies expostas do maciço

Num maciço rochoso dever-se-á estabelecer distintas áreas com diferentes aspectos e tipos de materiais rochosos, por exemplo, heterogeneidade litológica, elementos geológico-estruturais, grau de fracturação, grau de alteração, etc., o que permitirá uma divisão inicial por zonas ou, até mesmo, em sub-zonas (Zuquette & Gandolfi, 2004). Esta abordagem facilitará as

posteriores descrições geológico-geotécnicas e a aplicação sistemática dos procedimentos técnicos julgados adequados. No caso de existirem poucos afloramentos ou estes apresentarem pouca extensão, recomenda-se o seguinte (Ferrer & González de Vallejo, 1999; Carvalho & Chaminé, 2004):

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

Os mapas geotécnicos constituem um método em Engenharia Geotécnica e Geologia Aplicada para representar, cartograficamente, informação geológica e geotécnica para fins de planeamento e de ordenamento do território e, bem assim, para o projecto, a construção e a manutenção de obras de Engenharia. Estes mapas incluem dados sobre as características e propriedades de superfície e de sub-superfície de uma dada região e permitem avaliar o seu comportamento dos problemas geológico-geotécnicos (IAEG, 1981a,b, 2005).

Os mapas geotécnicos devem considerar os seguintes aspectos gerais de interesse na Engenharia Geotécnica (González de Vallejo et al., 2002):

- descrição e classificação geotécnica dos materiais terrosos e rochosos;
- propriedades físicas e mecânicas dos materiais;
- condições hidrogeológicas;
- processos geomorfológicos e geodinâmicos.

Os mapas geotécnicos são de extrema importância para os seguintes campos (UNESCO, 1976; IAEG, 1981a,b, 2005; González de Vallejo et al., 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004): planeamento do território (regional, local e urbano) e obras de engenharia (e.g., estradas, caminhos de ferro, túneis e barragens).

A cartografia geotécnica é constituída, normalmente, por uma série de cartas: cartas de factores e cartas de síntese (cartas de zonamento geotécnico, cartas de aptidão). Independentemente do tipo de mapa, estes devem incluir uma série de informação básica (IAEG, 1981 a, b, 2005):

- topografia e toponímia;
- distribuição e descrição litológica das unidades geológicas;
- espessuras dos solos, formações superficiais e rochas alteradas;
- descontinuidades e dados geológico-estruturais;
- classificação geotécnica de solos e rochas;
- condições hidrogeológicas;
- condições geomorfológicas;
- processos dinâmicos;
- investigações prévias existentes;
- riscos geológicos.

2.4.4. Parâmetros dos maciços rochosos

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

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

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. A orientação média de uma família avalia-se mediante técnicas de projecção estereográfica ou de diagramas de rosetas, a partir de dados das medições de campo para cada descontinuidade.

O maciço pode classificar-se pelo número de famílias, variando entre maciços rochosos com apenas uma família de descontinuidades e maciços com três ou mais famílias de descontinuidades, como se pode ver no quadro 2.

Quadro 2. Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).

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

As famílias de descontinuidades podem ser representadas graficamente mediante a construção de blocos-diagrama (figura 3), permitindo assim a visualização espacial da sua orientação relativa e do tamanho e forma dos blocos da matriz rochosa.

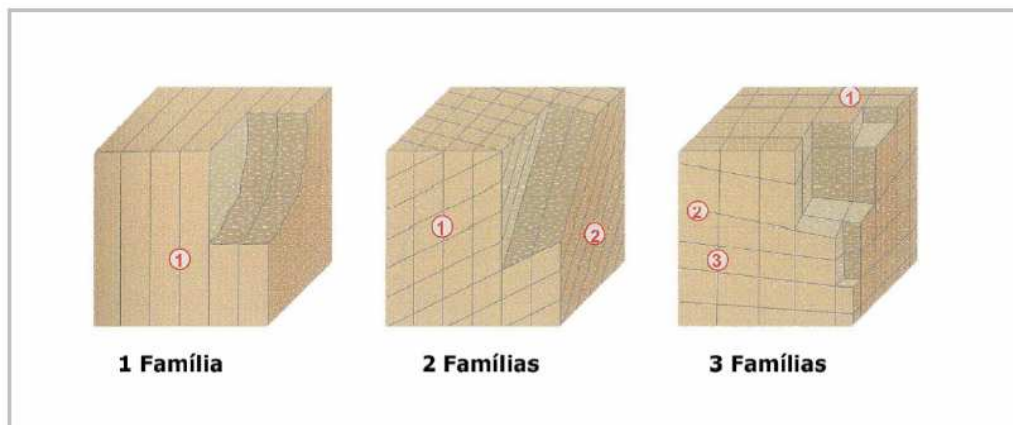


Figura 3. Representação do número de famílias mediante bloco-diagramas (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

O tamanho dos blocos que constituem o maciço rochoso condiciona de forma definitiva o seu comportamento em termos de resistência e deformação. A forma e a dimensão dos blocos estão definidas pelo número de famílias de descontinuidades, pela sua orientação, espaçamento e continuidade. Desta forma, a forma do bloco unitário é determinada a partir da orientação das descontinuidades e do número de famílias, enquanto que a dimensão do bloco é determinada pelo espaçamento, continuidade e número de famílias das descontinuidades.

A determinação do tamanho do bloco realiza-se, normalmente, das seguintes formas (ISRM, 1978; González de Vallejo et al., 2002):

➤ mediante o índice do tamanho do bloco I_b ("Block Size Index"), que representa as dimensões médias dos blocos-tipo medidas no afloramento, definido por:

$$I_b = (e_1 + e_2 + e_3)/3 \quad [1]$$

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

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

$$J_v = \Sigma (\text{número de descontinuidades}) / (\text{comprimento medido}) \quad [2]$$

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

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

ou

$$\lambda = 1 / (\text{espaçamento médio de descontinuidades (m)}) \quad [3]$$

O valor de J_v relaciona-se com o tamanho dos blocos de acordo com o quadro 3.

Quadro 3. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico (ISRM, 1981).

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

O maciço rochoso pode classificar-se em função do tamanho e forma dos blocos (quadro 4).

Quadro 4. Classificação do maciço rochoso em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1981).

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

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

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

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

[4]

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

$$\text{RQD} \approx 100 \exp^{(-0,1 \times \lambda)} \times (0,1 \times \lambda + 1) \quad [5]$$

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

A evolução do grau de alteração do maciço rochoso realiza-se por observação directa do afloramento e por comparação com índices padrão.

2.4.5. Parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades

As descontinuidades condicionam de uma forma definitiva as propriedades e a compartimentação dos maciços rochosos em termos de resistência, deformabilidade e coeficiente hidráulico. A resistência ao corte nas descontinuidades é o aspecto mais importante na determinação da resistência dos maciços rochosos fracturados e para a sua correcta avaliação é necessário definir as características e as propriedades dos planos de descontinuidades.

A descrição das diferentes famílias de descontinuidades num maciço rochoso deverá incluir os seguintes parâmetros geológico-geotécnicos (figura 4):

- atitude geológica (direcção/inclinação);
- grau de fracturação e espaçamento;
- continuidade ou persistência;
- rugosidade;
- resistência da parede das descontinuidades;
- abertura;
- enchimento;
- grau de alteração;
- percolação.

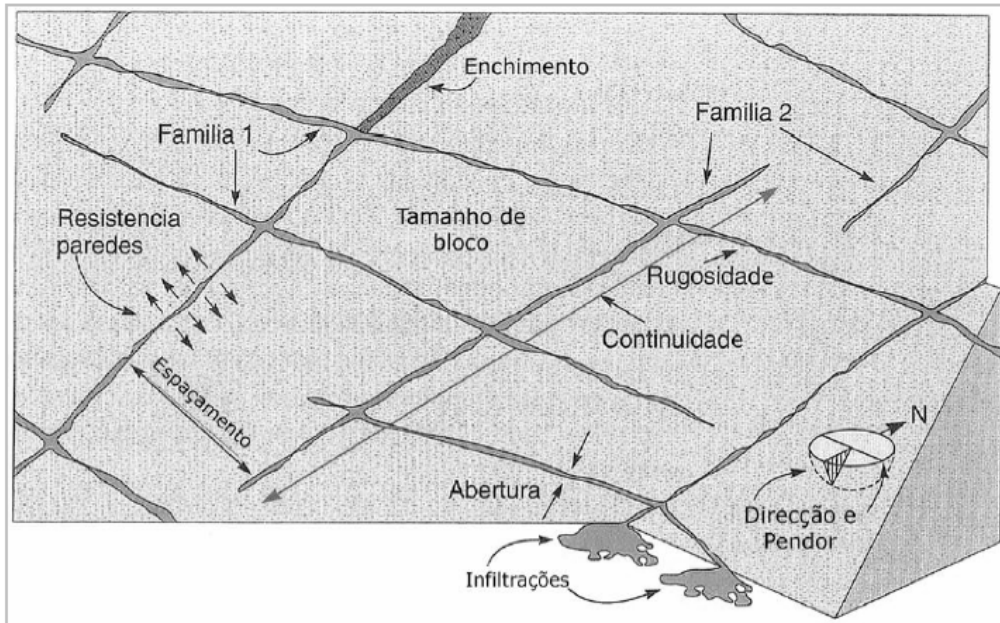


Figura 4. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

2.4.5.1. Atitude geológica (direcção/inclinação)

A atitude de uma descontinuidade é dada pela sua direcção — ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético — e inclinação — ângulo que a recta de maior declive da descontinuidade define com o plano horizontal (figura 5). A medição da atitude das descontinuidades é determinada através de uma bússola com clinómetro (ou “bússola de geólogo”).

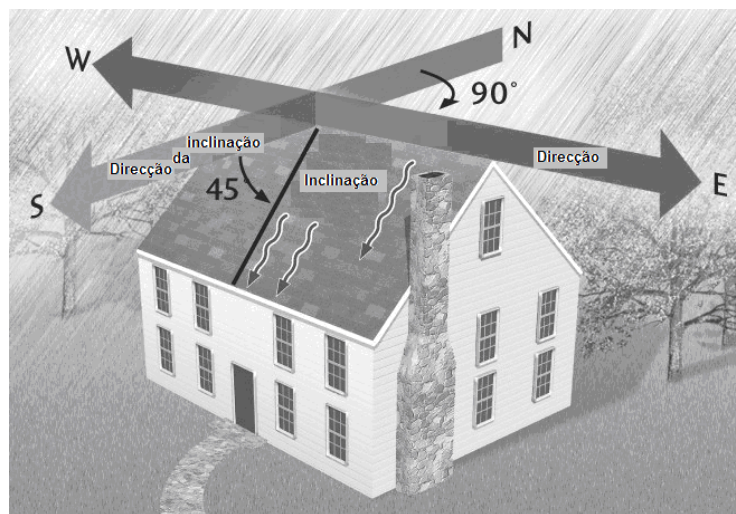


Figura 5. Atitude de uma descontinuidade (adaptado de Press & Siever, 1998).

No estudo de um maciço rochoso é aconselhável medir um número suficiente de descontinuidades para definir cada família. O número de medições dependerá da dimensão da zona estudada, da aleatoriedade das orientações dos planos e dos detalhes em análise adequados ao caso em estudo. Se as orientações são relativamente constantes poder-se-á reduzir o número de medidas. Assim, considera-se família de descontinuidades como o conjunto de todas as descontinuidades que apresentam idêntica orientação (Rocha, 1981).

Sendo estruturas geralmente muito numerosas, recorre-se, habitualmente, a formas gráficas do registo da atitude das descontinuidades de uma dada área. São, essencialmente, de dois tipos os diagramas adoptados (figura 6):

- projecções estereográficas polares, completadas, quando se justifique, pelo traçado de linhas de igual densidade de pólos;
- diagramas de rosetas, isto é, histogramas circulares.

Nos diagramas de rosetas, as descontinuidades são repartidas em classes definidas pelas suas direcções, enquanto que as correspondentes inclinações poderão ser assinaladas à margem. Neste histograma, além das descontinuidades, poderão incluir-se outros elementos direccionais, em particular, outros planos estruturais (falhas, xistosidade e outras foliações).

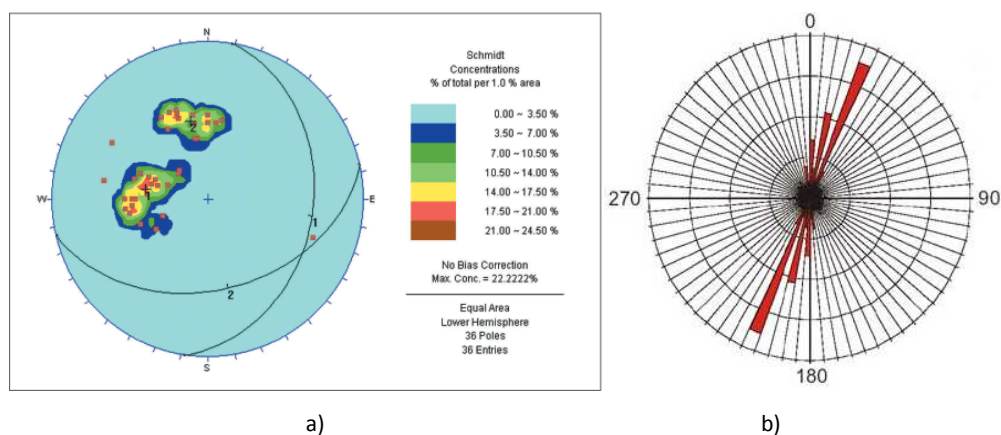


Figura 6. Diagramas geológico-estruturais produzidos com auxílio do programa *Dips* (Rocscience®): a) diagrama de contorno estrutural com a distribuição dos pólos das descontinuidades; b) diagrama de rosetas que reflecte as direcções principais das descontinuidades.

2.4.5.2. Grau de fracturação e espaçamento

Segundo a ISRM (1981), o grau de fracturação (*fracture intercept*), é a distância média entre descontinuidades sucessivas medida segundo a intersecção com a linha de amostragem

(*scanline*). Este conceito não pressupõe, tal como refere a ISRM (1981), uma estimativa do espaçamento entre descontinuidades da mesma família, mas em relação ao espaçamento entre todas descontinuidades cartografadas no maciço. Sempre que possível dever-se-á estimar o grau de fracturação global (independentemente das famílias consideradas) e, se possível, o espaçamento entre cada família (ISRM, 1981, 2007).

Denomina-se espaçamento ao afastamento médio entre descontinuidades, medido segundo a normal aos seus planos (ISRM, 1978, 1981). Para cada família, o espaçamento entre as descontinuidades será calculado por subtracção das distâncias à origem da fita graduada.

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

Esta característica interfere significativamente no comportamento do meio rochoso, em relação à deformabilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade. É comum verificar-se uma diminuição do espaçamento das descontinuidades, em especial fracturas, à medida que se aproxima da superfície do terreno, resultado da descompressão causada pela erosão e acção do intemperismo.

A medição deste parâmetro é geralmente realizada com o auxílio de uma fita graduada (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.

A ISRM (1978, 1981) propõe que seja utilizada uma terminologia para caracterizar os maciços em função do espaçamento das descontinuidades, como se pode verificar pelo quadro 5.

Quadro 5. Terminologia para caracterizar os maciços rochosos em função do espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1978, 1981).

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

2.4.5.3. Continuidade ou persistência

A extensão em área de uma descontinuidade corresponde à sua persistência ou continuidade. Como o acesso aos meios rochosos, geralmente se limita a poucas superfícies, a sua determinação é feita medindo-se a extensão do traço do plano. Deve-se sempre observar a extremidade da superfície (se termina em rocha ou noutra descontinuidade).

A persistência tem especial influência na resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos. Como uma descontinuidade possui, em geral, baixa resistência, a sua dimensão em relação à dimensão do problema em estudo é um factor extremamente importante. Considera-se uma descontinuidade com grande continuidade quando a sua extensão é superior à dezena de metros, e pequena quando a sua extensão não excede 3m. Contudo, esta definição depende do caso em estudo.

A medição da continuidade realiza-se mediante a utilização de uma fita graduada. É importante destacar as famílias mais contínuas, uma vez que, geralmente, serão estas que condicionam os planos de rotura do maciço rochoso. A ISRM (1978, 1981) definiu o conceito de persistência, traduzido pelo comprimento das interacções (L) da família de descontinuidades em estudo, numa superfície exposta e estabeleceu cinco termos, como se pode verificar no quadro 6.

Quadro 6. Descrição da continuidade das descontinuidades (ISRM, 1981).

Continuidade	Distância (m)
Muito pouco contínuas	<1
Baixa continuidade	1 – 3
Continuidade média	3 – 10
Continuidade alta	10 – 20
Continuidade muito alta	>20

2.4.5.4. Rugosidade

A rugosidade corresponde à ondulação nas superfícies de descontinuidades (figura 7) e influencia especialmente a resistência ao corte, sobretudo quando se trata de descontinuidades não preenchidas conferindo um incremento ao ângulo de atrito, até um nível de tensões a partir do qual se verifica a sua ruptura.

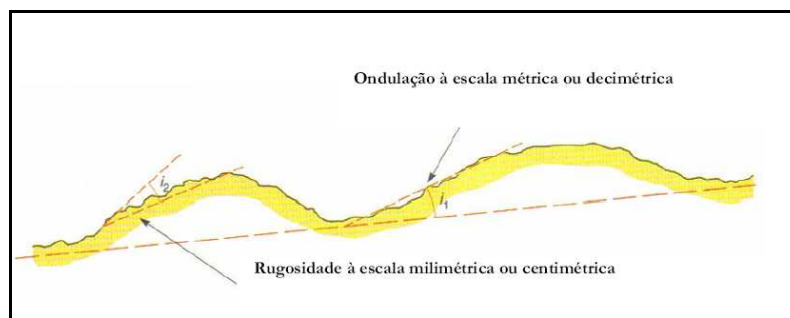


Figura 7. Ondulação e rugosidade de uma superfície de descontinuidade (adaptado de ISRM, 1978).

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

O método mais expedito é o da comparação visual das descontinuidades com os perfis padrão de rugosidade. A ISRM (1978, 1981) considera que cada um dos três tipos de superfície de descontinuidade (denteada, ondulada ou plana) pode ser ainda subdividido em três subclasses: rugosa, lisa e estriada (quadro 7).

Quadro 7. Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).

Classe	Descrição	Designação	Forma de perfil
I	Rugosa	R_{1-2} Pouco rugosa	Denteada
II	Lisa		
III	Estriada		
IV	Rugosa	R_3 Medianamente rugosa	Ondulada
V	Lisa		
VI	Estriada		
VII	Rugosa	R_{4-5} Muito rugosa	Plana
VIII	Lisa		
IX	Estriada		

2.4.5.5. Resistência da parede das descontinuidades

A resistência à compressão do material-rocha que constitui as paredes das descontinuidades é uma componente muito importante da resistência ao corte e deformabilidade. Especialmente no caso em que as paredes estão em contacto directo, o que acontece, regra geral, no diaclasamento fechado. Por isso, recorre-se a uma definição da

resistência obtida por meio de correlações com outras propriedades. Assim, é habitual analisar o estado de alteração, a dureza determinada com esclerómetro portátil (ou martelo de Schmidt), ou simplesmente por resposta ao toque com o martelo de geólogo. No quadro 8, apresenta-se a terminologia proposta pela ISRM (1978) para caracterizar as paredes do material-rocha que limitam a descontinuidade.

Quadro 8. Terminologia para caracterização do estado de resistência para o material-rocha (ISRM, 1978).

Grau (R – Rocha)	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R0	Rocha muito branda	Marcada pela unha do polegar.	0,25 – 10
R1	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
R2	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
R3	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
R4	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo.	50 – 100
R5	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias muitas pancadas com o martelo de geólogo.	100 – 250
R6	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de geólogo.	>250

As rochas apresentam-se à superfície, normalmente, meteorizadas, e por vezes alteradas por processos hidrotermais. A meteorização (ou alteração meteórica; Aires-Barros, 1991) geralmente afecta as paredes das descontinuidades 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. Uma metodologia qualitativa que permite descrever o grau de alteração meteórica do material rochoso e das descontinuidades, está apresentada no quadro 9.

Quadro 9. Descrição do grau de alteração meteórica (ISRM, 1981).

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

A reduzida espessura da parede rocha da descontinuidade que afecta a resistência ao corte e deformabilidade pode ser ensaiada por intermédio de ensaios-índice de referência. A resistência à compressão uniaxial pode ser estimada de modo expedito por intermédio do esclerómetro portátil, do ensaio de carga pontual (*Point Load Test*), ou de outras metodologias qualitativas normalmente utilizadas nos levantamentos geológicos.

2.4.5.6. Abertura

Por abertura de uma descontinuidade entende-se a separação entre os blocos divididos pela fractura, medida perpendicularmente ao plano da descontinuidade.

Em rochas pouco meteorizadas, a abertura das descontinuidades é praticamente nula. Assim, num maciço rochoso, a abertura tende a diminuir com a profundidade, acabando por a descontinuidade se tornar perfeitamente fechada. Quando abertas, as descontinuidades podem ser preenchidas por ar, água, por material lítico (silte, argila) ou por minerais (quartzo, carbonatos, etc.). Do ponto de vista geotécnico, importa determinar a amplitude da abertura da descontinuidade e a sua variação ao longo do plano. Quando a descontinuidade se encontrar preenchida, a natureza do preenchimento tem de ser especificada, em particular, as suas características mecânicas.

A ISRM (1978, 1981) propôs que em termos de abertura de descontinuidades, os maciços sejam descritos como se apresenta no quadro 10, sendo cada família estudada individualmente pela média de aberturas após tratamento estatístico.

Quadro 10. Abertura das descontinuidades (ISRM, 1978, 1981).

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

2.4.5.7. Enchimento

O enchimento (ou preenchimento) de uma descontinuidade pode definir-se como sendo uma camada de baixa resistência de material existente entre as paredes da descontinuidade.

O tipo de enchimento tem influência notável nos parâmetros geotécnicos de uma descontinuidade, nomeadamente na sua resistência ao corte e à deformabilidade. Nas falhas, o material de enchimento corresponde, em geral, ao material rochoso esmagado pelo processo tectónico que as originou, podendo-se encontrar em fases mais ou menos avançadas de alteração.

A caracterização do enchimento deve conter, além da espessura, a descrição da natureza dos seus constituintes, mineralogia, textura, cor e outras informações que se mostrem relevantes. A necessidade de caracterização de propriedades dos enchimentos através de ensaios é avaliada em fases mais adiantadas de estudo, quando se dispõe de um maior número de informações.

A ISRM (1978, 1981) propôs que em termos de enchimento a caracterização deve seguir a seguinte metodologia:

- a espessura do enchimento deve ser medida directamente com uma régua graduada;
- a descrição do enchimento deve incluir a identificação do material, descrição mineralógica e tamanho do grão;

- a resistência pode ser estimada mediante os índices de campo (estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão simples dos solos e rochas a partir de índices de campo – ISRM, 1981);
- deve indicar-se o grau de humidade, e estimar-se qualitativamente a permeabilidade do material de enchimento.

2.4.5.8. Grau de alteração

A alteração de uma rocha consiste na sua desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente (Aires-Barros, 1991).

O estado de alteração é vulgarmente indicado à custa da sua descrição baseada em métodos expeditos de observação.

A ISRM (1978, 1981) propôs que o estado de alteração fosse avaliado em graus de alteração, considerando 5 termos – W_1 , W_2 , W_3 , W_4 e W_5 , enquanto que a GSE (1995) considera, além destes 5 graus, mais um, W_6 (solo). No entanto, considera-se, frequentemente, a utilização de uma versão simplificada com 3 termos, como se pode ver no quadro 11.

Quadro 11. Graus de alteração propostos pela ISRM (1981) e GSE (1995).

Grau de alteração	Simbologia		Descrição	
Sã ou não alterada	W_1	W_{1-2}	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa.	<ul style="list-style-type: none"> - Maciço são e compacto - Descontinuidades fechadas - Permeabilidade praticamente nula
Ligeiramente alterada	W_2		Mudanças na cor original de matriz rochosa (descoloração).	
Moderadamente alterada	W_3	W_3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou degradado num solo, mantendo-se a petrofábrica original.	<ul style="list-style-type: none"> - Maciço mais ou menos são - Intersectado por descontinuidades abertas
Muito alterada	W_4	W_{4-5}	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou degradado num solo; a rocha é muito friável.	<ul style="list-style-type: none"> - Zona alterada ou muito alterada ou mesmo decomposta - Permeabilidade do tipo intersticial - Pode coexistir uma circulação fissural
Completamente alterada	W_5		Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou degradado num solo residual.	

2.4.5.9. Percolação de água

A percolação de água através dos maciços rochosos resulta sobretudo do fluxo de água pela rede de descontinuidades (permeabilidade secundária). No caso de certos maciços de natureza sedimentar a permeabilidade primária do material-rocha pode ser significativa, dado que uma parte da percolação ocorre pelos vazios da rocha.

A previsão da posição dos níveis freáticos, assim como dos caminhos de percolação e a pressão da água nos poros, dão-nos muitas vezes indicações da existência de potenciais problemas de estabilidade e de dificuldades construtivas.

2.4.6. Técnica de amostragem linear aplicada a superfícies de descontinuidades

Descreve-se, seguidamente, de uma forma sucinta a técnica de amostragem linear (designada pelos autores anglo-saxónicos por *Scanline Sampling Technique*) de planos de descontinuidades ocorrentes numa superfície exposta do maciço (figura 8). 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) e Peacock (2006).

Com esta técnica não se pretende efectuar o levantamento exhaustivo de todas as descontinuidades ocorrentes numa dada superfície exposta de rocha, mas sim obter dados a partir dos quais se poderão extrapolar as características de compartimentação da zona em estudo.

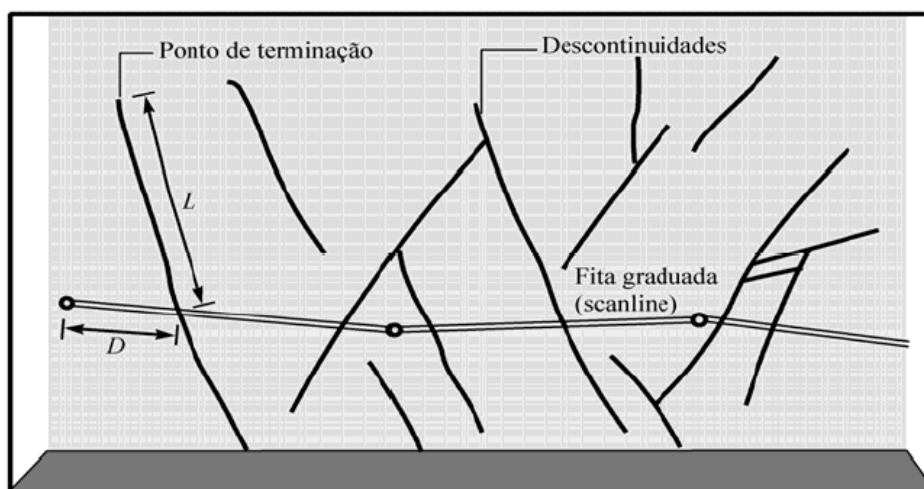


Figura 8. Esquema do dispositivo para levantamento de descontinuidades pela técnica de amostragem linear (adaptado de Brady & Brown, 2004). D – distância à origem da fita; L – semi-comprimento exposto.

A técnica de amostragem linear consiste, basicamente, na colocação de uma fita graduada em superfícies expostas do maciço rochoso e o registo de algumas características (geométricas e mecânicas) de todas as descontinuidades por ela intersectadas. Para cada descontinuidade que a linha de amostragem intersecte registam-se as seguintes grandezas (ISRM, 1978, 1981; Brady & Brown, 2004):

- distância à origem da fita graduada;
- semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face exposta da rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
- tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R – na rocha; D – noutra descontinuidade; O – obscura);
- a atitude da descontinuidade (direcção e inclinação) medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem com a descontinuidade;
- curvatura (C), numa escala de C_1 a C_5 , em que C_1 representa superfícies planas e C_5 superfícies muito curvas;
- rugosidade (R), numa escala de R_1 a R_5 , representando R_1 uma superfície lisa e R_5 uma superfície muito rugosa.

Além destas características podem ser ainda, eventualmente, registadas outras características das descontinuidades, tais como abertura, tipo de preenchimento, presença de água e qualquer outra característica que se entenda relevante. Todos os dados obtidos no trabalho de campo são registados numa ficha de levantamento (figura 9) de descontinuidades da qual constam para além das grandezas já mencionadas as seguintes:

- número da linha de amostragem linear;
- localização da linha de amostragem linear;
- atitude da linha de amostragem linear;
- direcção do hasteal/galeria estudada;
- litologia(s);
- data do levantamento;
- rubrica do responsável pelo levantamento.

geralmente, adoptados para a determinação das propriedades dos materiais rochosos são os modelos L e N. O tipo L, tem uma energia de impacto de 0.735Nm, sendo o martelo mais utilizado em estudos de maciços rochosos; enquanto que o martelo do tipo N (2.207Nm) é o mais utilizado em estudo de betões.



Figura 10. Esclerómetro portátil tipo L da Proceq® (cortesia do LABCARGA-ISEP).

O ensaio esclerométrico foi desenvolvido em 1948 como ensaio de natureza não-destrutiva de dureza do betão (Schmidt, 1951), e foi usado, mais tarde, para calcular a resistência das rochas (Cargill & Shakoor, 1990). O martelo de Schmidt foi amplamente usado durante mais de 30 anos como um índice de dureza das rochas. É mundialmente conhecido devido à sua simplicidade, rapidez, não destrutibilidade e portabilidade. Assim, este aparelho tem sido usado em vários contextos no domínio das geociências aplicadas (e.g., geologia aplicada, geomorfologia; e.g., Day & Goudie, 1977; Kolaiti & Papadopoulos, 1993; Goudie, 2006) e da geotecnia de maciços rochosos (e.g., Cargill & Shakoor, 1990; Katz et al., 2000; Kahraman, 2001; Yassar & Erdogan, 2004; Aydin & Basu, 2005; Aydin, 2008).

Na execução do ensaio, o aparelho deverá ser colocado perpendicularmente à superfície estrutural a ser ensaiada (figura 11). Em função da dureza (ou resistência) da rocha, a massa de aço sofre maior ou menor ressalto, seguidamente, o valor do ressalto é registado numa escala do aparelho (10 – 100). A medição do ressalto correlaciona-se, geralmente, com a resistência do maciço, mediante o designado ábaco de Miller (figura 12), 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 direcções sub-horizontal, 45º e sub-vertical).



Figura 11. Exemplo de aplicação do martelo de Schmidt num maciço rochoso.

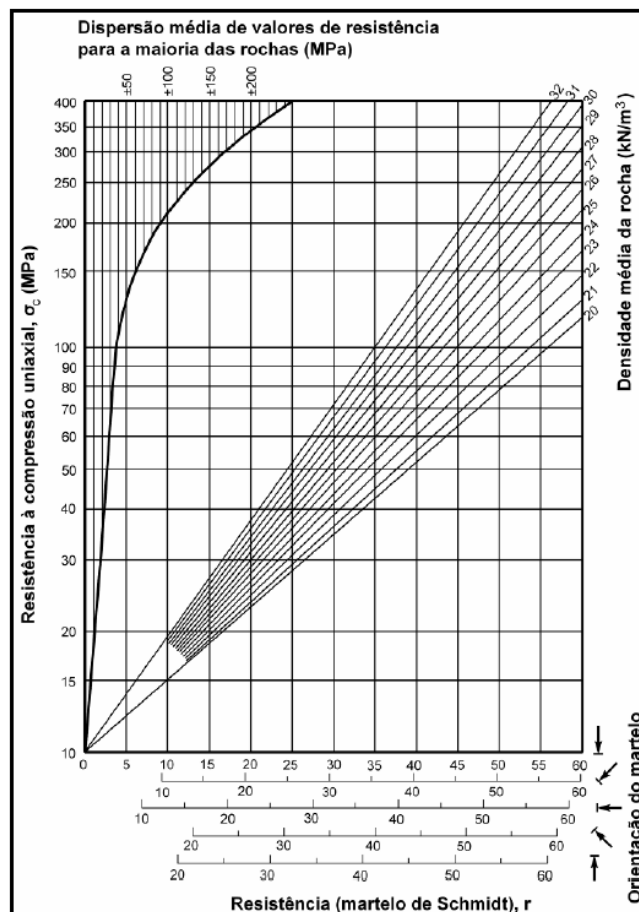


Figura 12. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo de Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Quadro 12. Classificação da resistência à compressão simples (adaptado de ISRM, 1978, 1981).

Simbologia	Resistência à Compressão Simples (σ_c , MPa)	Designação	
S ₁	>200	Muito elevada	S ₁₋₂
S ₂	60 a 200	Elevada	Elevada
S ₃	20 a 60	Média	S ₃ Média
S ₄	6 a 20	Baixa	S ₄₋₅
S ₅	<6	Muito baixa	Baixa

A resistência à compressão uniaxial pode ainda ser estimada através de análises expeditas, recorrendo a uma faca ou ao martelo de geólogo ISRM (1978, 1981). Esta metodologia permite avaliar o grau de qualidade do material-rocha (R) e correlaciona-o com a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual, $Is_{(50)}$, (quadro 13).

Quadro 13. Grau de qualidade do material-rocha (R) versus a resistência à compressão simples (σ_c) e o índice de carga pontual $Is_{(50)}$ (adaptado de ISRM, 1978, 1981).

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

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

2.4.8. Técnicas Laboratoriais

A determinação da resistência à compressão simples da rocha recorrendo a ensaios de compressão uniaxial é uma tarefa que requer cuidados especiais na preparação das amostras e na condução dos ensaios. Um dos métodos alternativos de aferir a resistência à compressão simples das rochas consiste na determinação do índice de resistência ou índice de carga pontual, através do designado Ensaio de Carga Pontual (*Point Load Test*).

Por outro lado, o ensaio de resistência à flexão tem relevância particular no caso da utilização de pedra natural para revestimentos exteriores. Os resultados obtidos vão determinar qual o maior tamanho e/ou a menor espessura que uma dada placa de rocha ornamental pode ter para suportar as condições estruturais e atmosféricas locais.

A realização destes dois ensaios requiere que o material-rocha amostrado (figura 14) seja cortado (figura 15) e talhado em provetes com dimensões convenientes (figura 16), como mais adiante se explanará.



Figura 14. Aspectos de algumas das amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais.



Figura 15. Aspectos diversos da serra eléctrica (Universal B300) utilizada na serragem das amostras (cortesia do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção, LGMC-ISEP).



Figura 16. Exemplos de provetes a ensaiar por intermédio do ensaio de carga pontual e do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada.

2.4.8.1. Ensaio de Carga Pontual (PLT)

Em 1972 foi desenvolvido um equipamento cujo objectivo era 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). Um método de aferir a resistência à compressão simples das rochas consiste na determinação do índice de resistência ou índice de carga pontual, através do Ensaio de Carga Pontual (“Point Load Test”) também conhecido por ensaio Franklin. O índice de carga pontual é estreitamente correlacionável com a resistência à compressão uniaxial e com outros índices de resistência.

Este método consiste em levar à rotura uma rocha pela aplicação de uma carga concentrada entre duas ponteiros cónicas (figura 17), conduzindo assim, à determinação de dois índices, o índice de carga pontual, $I_s(50)$, e o índice de anisotropia, $I_a(50)$, muito válidos para a avaliação da resistência das rochas e de apreciação simples, expedita e económica.

Os provetes a utilizar podem ser cilíndricos, prismáticos (blocos) ou de forma irregular, e a direcção de aplicação da carga poderá ser axial ou diametral (ISRM, 1985).

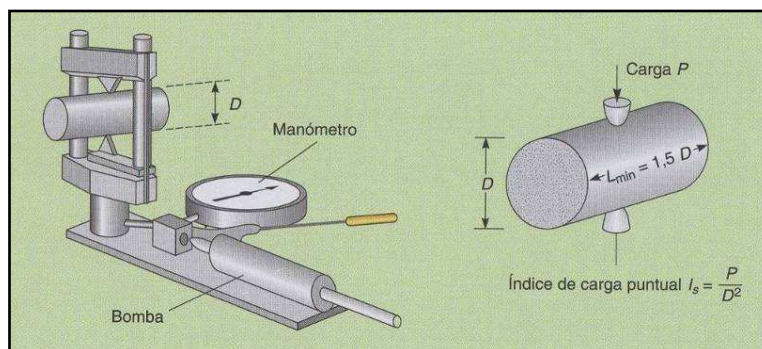


Figura 17. Representação esquemática do equipamento para a execução do Ensaio de Carga Pontual (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

O ensaio de carga pontual (PLT) é extremamente simples e pode ser aplicado no campo, durante o reconhecimento ou a execução de sondagens ou, ainda, em laboratório. O equipamento deve ser constituído por (figura 18):

- Sistema de aplicação de carga;
- Sistema de medição da força;
- Sistema de medição da distância entre as ponteiros (onde é aplicada a carga).

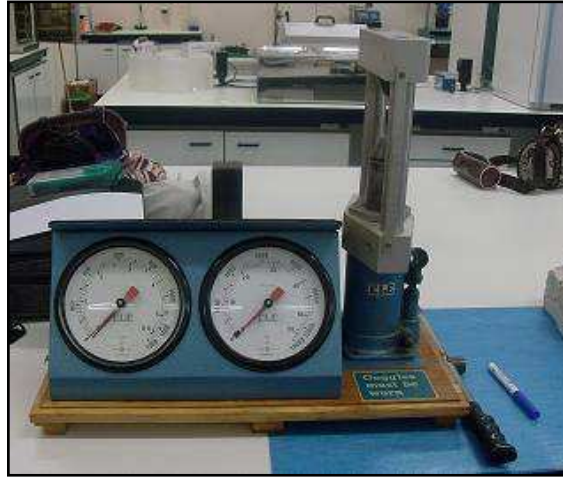


Figura 18. Equipamento *ELE Point Apparatus* (modelo 77-0110) para execução do ensaio de carga pontual (PLT) (cortesia do LGMC-ISEP).

A carga a aplicar deve ser tal que permita romper os provetes com uma resistência semelhante a 50KN e permite o ensaio em provetes de tamanho desde os 15 mm até aos 100 mm (figura 19). Esta máquina deve ser rígida, para que as ponteiros cónicas se mantenham devidamente alinhadas durante o ensaio. Estas ponteiros transmitem a carga aos provetes e devem ser indeformáveis. Deverá existir uma precisão de mais ou menos 2% quer no sistema de medição da carga quer no sistema de medição da distância entre ponteiros.



Figura 19. Execução do Ensaio de Carga Pontual (cortesia do LGMC-ISEP).

Consoante as características dos provetes, o eixo escolhido para a aplicação da força, o tipo de rocha a ensaiar e a maior ou menor anisotropia evidenciada pela rocha, define-se o tipo de ensaio a efectuar. De um modo sucinto, existem três tipos de ensaios (ISRM, 1985, 2007):

- Ensaio diametral;
- Ensaio axial;
- Ensaio em blocos e em fragmentos irregulares.

O ensaio diametral é realizado em provetes cilíndricos, em que a relação comprimento/diâmetro é superior a 1. O operador ao colocar o provete na máquina deve ter em consideração que a distância entre os pontos de contacto e a extremidade livre mais próxima deve ser pelo menos 0.5 vezes o diâmetro do provete (figura 20).

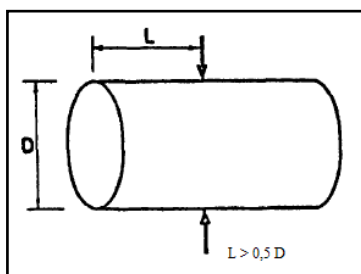


Figura 20. Ensaio diametral (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

Regista-se o valor da distância entre ponteiras, D , e o valor da carga de rotura, P . São considerados válidos sómente os resultados dos ensaios cuja superfície de rotura contenha os pontos de aplicação da carga (figura 21). Se a superfície de rotura passa apenas por um ponto de carga, o ensaio deve ser rejeitado.

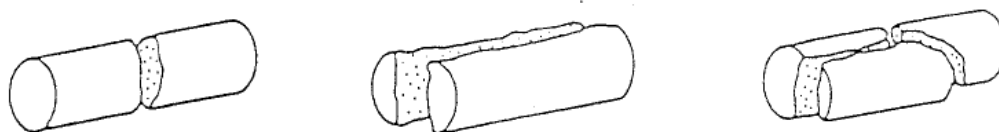


Figura 21. Roturas típicas para ensaios diametraes válidos (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

O ensaio axial, tal como o anterior, é igualmente realizado em provetes cilíndricos, no entanto a relação comprimento/diâmetro varia entre 0.3 e 1.0. Os provetes compridos podem ser ensaiados diametralmente de forma a produzirem novos provetes com as dimensões ideais para serem testados axialmente. O provete deve ser colocado na máquina de ensaio, de forma a que o eixo do ensaio coincida com o eixo perpendicular às faces planas da amostra. Em amostras

isotrópicas o eixo de ensaio coincide com o eixo do cilindro e em amostras anisotrópicas é perpendicular aos planos de descontinuidade.

Regista-se o valor da distância entre ponteiras, D , a largura do provete, W , perpendicular à direcção de carga (com uma precisão de mais ou menos 5%) e o valor da carga P (figura 22). À semelhança do ensaio diametral, há ensaios válidos e inválidos (figura 23).

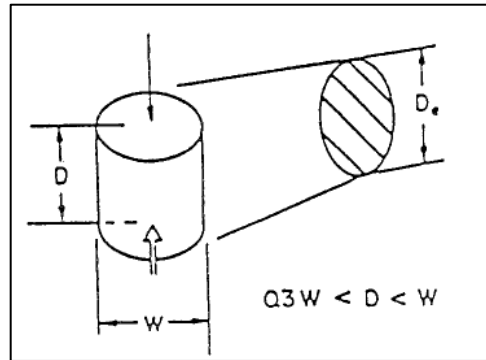


Figura 22. Ensaio axial (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

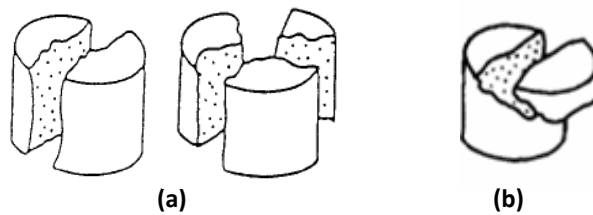


Figura 23. Roturas típicas para ensaios axiais válidos (a) e inválidos (b) (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

Por último, o ensaio em blocos e em fragmentos irregulares é realizado em provetes que tenham as características indicadas na figura 24.

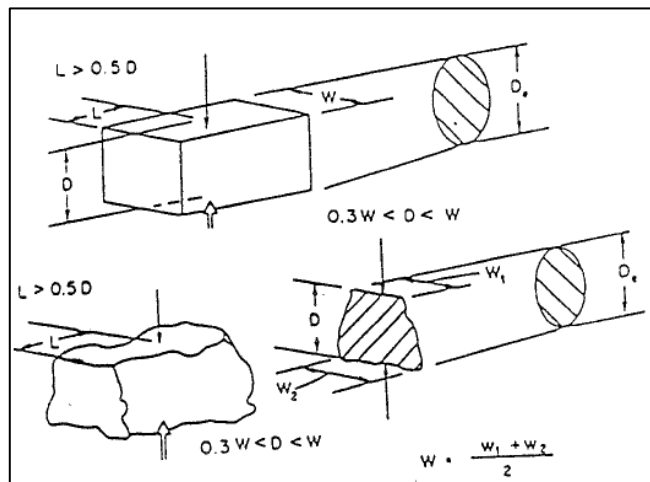


Figura 24. Ensaio em blocos e em fragmentos irregulares (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

A relação entre a distância entre ponteiras/largura do provete deve variar entre 0.3 e 1.0, preferencialmente próximo da unidade. A carga deve ser aplicada a uma distância superior a 0.5 vezes a largura do provete. O provete deve ser colocado na máquina devidamente centrado, registando-se a distância entre ponteiras, D , a menor dimensão do provete, W , perpendicular ao eixo de ensaio e a carga de rotura, P . Se os lados do provete não forem paralelos, a menor dimensão do provete, W , é calculada pela expressão $W = (W1+W2)/2$ (figura 24).

Tal como nos ensaios anteriores, apenas são considerados válidos os resultados dos ensaios cuja superfície de rotura contenha os pontos de aplicação da carga (figura 25).

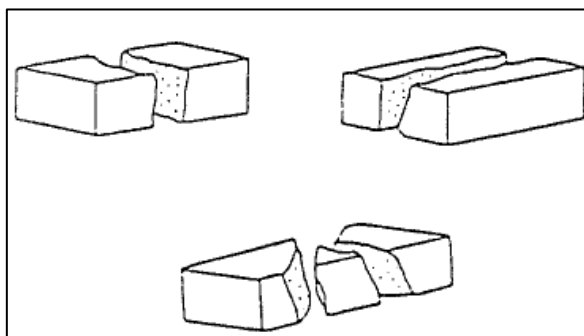


Figura 25. Roturas típicas para ensaios em blocos e em fragmentos irregulares válidos (adaptado de González de Vallejo et al., 2002)

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

Para efectuar o cálculo da resistência à carga pontual, I_s , utiliza-se a seguinte expressão:

$$I_s = P / D^2 \quad [6]$$

Sendo,

P - a carga de rotura

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

Este valor deve ser corrigido para $I_{s(50)}$, ou seja, para o valor correspondente a um D de 50mm, o qual se pode obter através do gráfico representado na figura 26.

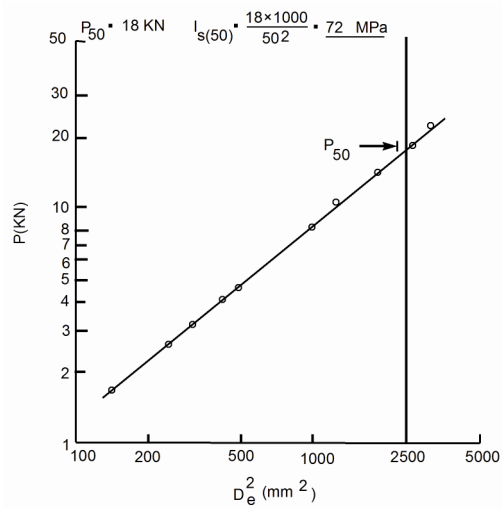


Figura 26. Gráfico para o cálculo de $I_{s(50)}$, segundo a ISRM (1985, 2007).

Projectam-se os valores da carga de rotura, P , e do quadrado da distância entre ponteiras, D_e^2 , obtido num ensaio log-log, obtendo-se uma recta a partir da qual é possível extrapolar o valor da carga de rotura, P , correspondente a $D_e^2 = 2500\text{mm}^2$. A partir dos valores lidos calcula-se o $I_{s(50)} = P(50)/2500$.

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

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

Sendo F o factor de correcção obtido através da expressão: $F = (D_e/50)^{0.45} \approx \sqrt{D_e}/50$, ou ainda por intermédio do gráfico da figura 27.

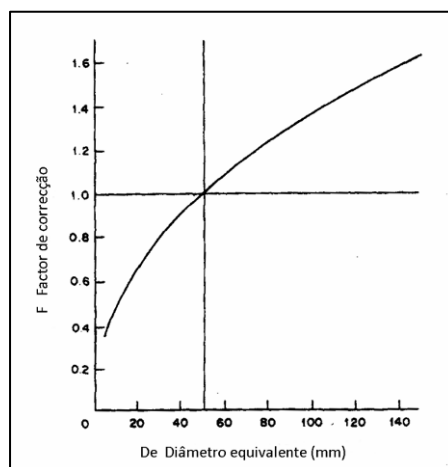


Figura 27. Gráfico para a correcção do diâmetro (adaptado de ISRM, 1985, 2007).

Em ensaios axiais, em blocos ou em fragmentos irregulares, o diâmetro equivalente - D_e - é determinado através da expressão X:

$$D_e = 4 \times (A/\pi) \quad [8]$$

Sendo A o produto da distância entre ponteiras (D) pela menor dimensão do provete (W).

Para os ensaios diametrais, o diâmetro do provete (D) é igual ao diâmetro equivalente (D_e)

Para o cálculo dos valores médios de $I_{S(50)}$ deve-se ter em conta o índice de resistência pontual e a anisotropia. O valor médio de $I_{S(50)}$ deve ser calculado retirando os dois valores mais altos e os dois valores mais baixos, fazendo-se a média dos restantes valores.

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

O valor $I_{S(50)}$ deve ser utilizado directamente na classificação das rochas, enquanto que 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 verificar pela figura 28.

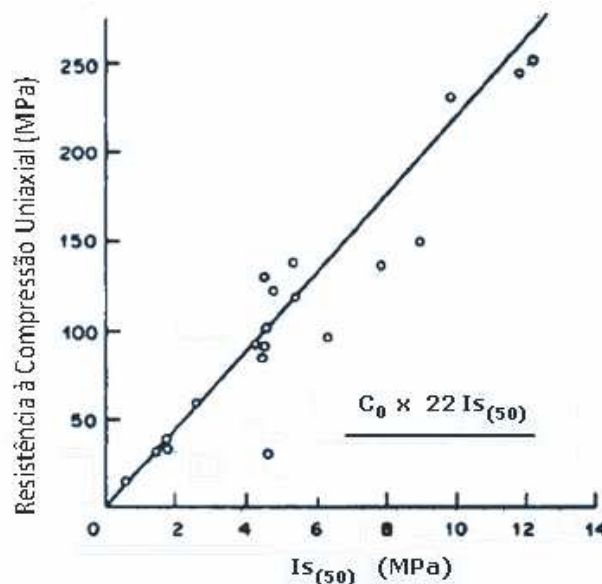


Figura 28. Gráfico que estabelece a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão uniaxial, segundo a ISRM (1985, 2007).

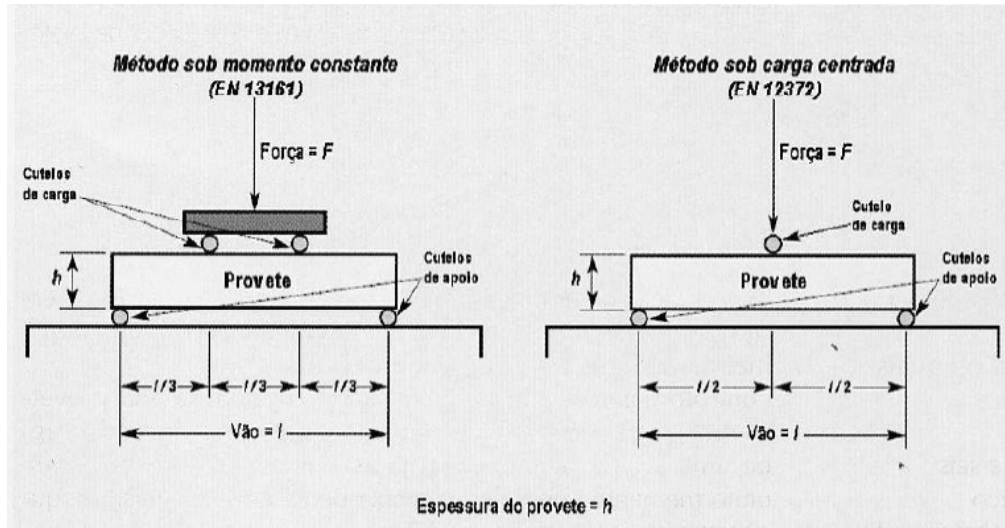


Figura 30. Método sob momento constante e método sob carga centrada no ensaio de flexão (<https://webonc.darq.uc.pt>).

A determinação da resistência à flexão sob carga centrada encontra-se regulamentada pela Norma Europeia EN 12372:2006. Na figura 31 apresenta-se um exemplo de um tensómetro para a realização do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada.



Figura 31. Equipamento *FORM+TEST PRÜFSYSTEME DIGIMESS M-10* para a execução do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada (cortesia do LGMC-ISEP).

Este ensaio deverá ser realizado em pelo menos 10 provetes tão homogéneos quanto possível e representativos de cada amostra, devendo ser registadas as direcções dos principais planos de anisotropia. Estes podem ser cortados paralelamente a qualquer plano de anisotropia, os quais devem ser devidamente assinalados com uma linha dupla.

Os provetes devem ter uma secção rectangular ou serem simplesmente serrados, amaciados ou polidos, cujas restantes dimensões são determinadas pela sua espessura (h) em mm. A espessura deverá situar-se entre 25 mm e 100 mm e deve ser duas vezes superior ao maior grão da rocha. O comprimento total da amostra (L) deve ser igual a seis vezes a espessura, ou seja, $L=6h$, e a largura mínima deve ser igual ou superior a 50 mm e igual ou inferior a três vezes a espessura, isto é, $50 \text{ mm} \leq b \leq 3h$, e em caso algum deve ser inferior à espessura.

O eixo dos provetes deve ser perpendicular ao plano de anisotropia da rocha, se este for perceptível (figura 32). Se for necessário executar um ensaio com a orientação da carga paralela ou perpendicularmente a qualquer desses planos de anisotropia, deve-se preparar outro conjunto de provetes com as mesmas características dimensionais (figuras 33 e 34).

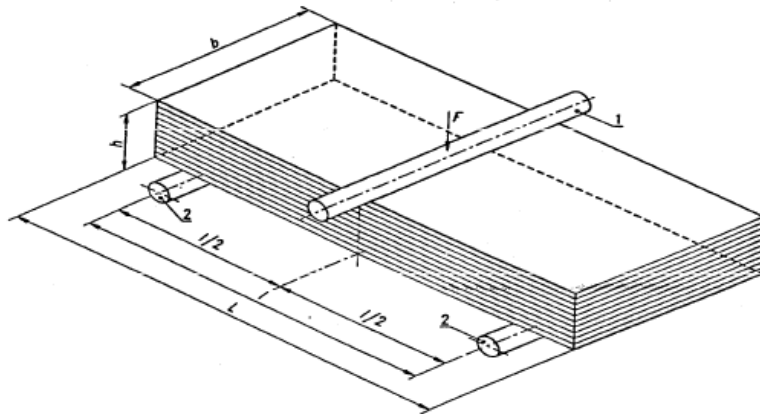


Figura 32. Esquema de ensaio de um provete com a carga exercida perpendicularmente aos planos de anisotropia (EN 12372:2006).

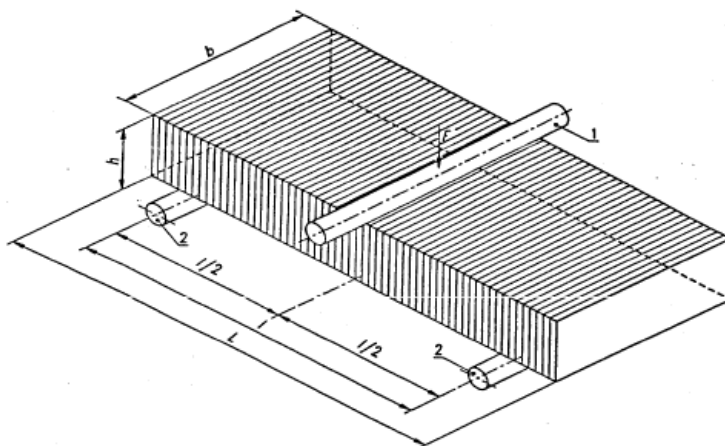


Figura 33. Esquema de ensaio de um provete com a carga exercida paralelamente aos planos de anisotropia (EN 12372:2006).

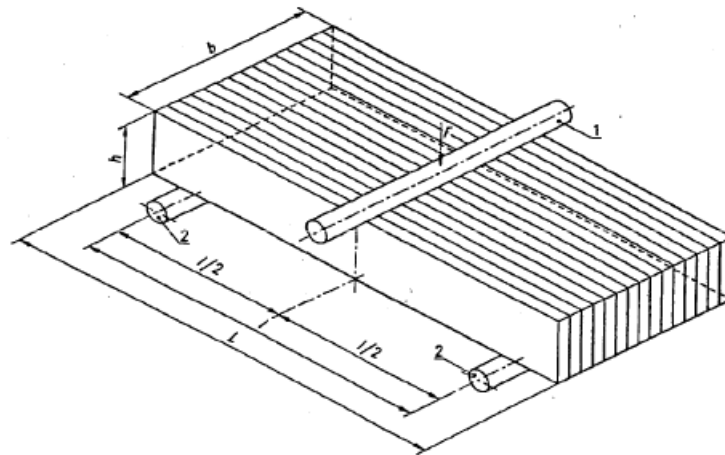


Figura 34. Esquema de ensaio de um provete com a carga exercida perpendicularmente aos topos dos planos de anisotropia (EN 12372:2006).

Para a execução deste ensaio são retiradas as medidas, comprimento, largura e espessura, de todos os provetes a ensaiar. Limpam-se os roletes de apoio da máquina de ensaio e qualquer partícula solta das superfícies de carga dos provetes.

Os provetes são colocados, devidamente centrados, nos roletes de apoio da máquina de ensaio de flexão (figura 35) e procede-se em seguida à sua carga, na face contrária à apoiada, por incrementos de 0.25 ± 0.5 MPa até ocorrer a rotura.

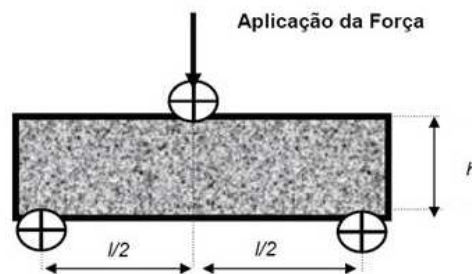


Figura 35. Esquema do dispositivo de ensaio para flexão sob carga concentrada (EN 12372:2006).

Por último regista-se a carga máxima suportada pelo provete (F) em Newton (N) aproximado às dezenas, o local onde ocorreu a fractura e também o tipo de fractura.

Para o cálculo da resistência mecânica à flexão (R_f) sob carga centrada, expressa em MPa, com uma aproximação de 0.1 MPa, é utilizada a seguinte expressão:

$$R_f = (3 \times F \times l) / (2 \times b \times h^2) \quad [9]$$

Onde F é a carga de rotura em N, l o vão ou distância entre os cutelos de apoio em mm, b a largura do provete em mm e h a espessura do provete em mm.

Caso a fractura esteja desviada do centro do provete mais que 15% da distância entre os roletes de suporte, ou caso estejam presentes veios, fissuras, etc., estes aspectos devem ser registados no relatório de ensaio.

No final do ensaio deve ser elaborado um relatório que contenha uma identificação inequívoca, onde deverão constar, entre outras, as seguintes informações:

- número, título e data de publicação da Norma Europeia;
- nome e morada do laboratório de ensaio;
- nome e endereço do requerente;
- informações sobre o material-rocha, tais como tipo de rocha, a proveniência e a direcção de qualquer plano de anisotropia presente;
- nome da pessoa ou entidade que efectuou a amostragem e o acabamento da superfície (se relevante para o ensaio);
- data de entrega da amostra ou provetes;
- data em que os provetes foram preparados e data de realização do ensaio;
- número e dimensões dos provetes;
- incremento da força de rotura em MPa aproximado a 0.05 MPa;
- para cada provete o seu comprimento e espessura, bem como a distância entre os roletes de suporte aproximados a 0.1 mm; a orientação do eixo da carga relativamente aos planos de anisotropia da rocha, se existentes; a carga de rotura em N, sem casas decimais; a resistência à flexão (R_f) em MPa, com aproximação de 0.1 MPa; o valor médio R_f da resistência à flexão, em MPa, aproximado a 0.1 MPa;
- todos os desvios à norma e sua justificação, bem como observações, caso se justifique.

Na figura 36, apresenta-se uma ficha-tipo para o registo dos dados necessários à determinação da resistência à flexão sob carga centrada.

2.4.9. Zonamento Geotécnico

O zonamento geotécnico baseia-se na classificação de unidades geotecnicamente “homogéneas” que podem abarcar diferentes unidades geológicas ou estratigráficas.

As unidades geotécnicas e a sua distribuição espacial estabelecem-se, geralmente, a partir da litologia, da origem e das características geológicas dos materiais, determinadas a partir da informação geológica básica (mapas geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos, fotogeologia e ensaios de prospecção geotécnica) e das principais características geotécnicas dos maciços (grau de alteração, grau de fracturação, grau de resistência, etc.).

O zonamento geotécnico de um maciço requiere:

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

3. Estudo da compartimentação do maciço rochoso granítico subterrâneo de Arca d'Água (Paranhos, Porto)

3. Estudo da compartimentação do maciço rochoso granítico subterrâneo de Arca d'Água (Paranhos, Porto)

3.1. Enquadramento geotécnico, geomorfológico e hidrogeológico regional

3.1.1. Geotectónica regional

A região do Porto (figura 37) localiza-se num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (MI), i.e., entre os terrenos da faixa metamórfica de Porto – Albergaria-a-Velha – Coimbra e o Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (Chaminé, 2000; Pinto de Jesus, 2001; Chaminé et al., 2003). Esta região situa-se, assim, ao longo da sutura, com direcção geral NNW-SSE — faixa de cisalhamento de Porto-Coimbra-Tomar (Zona de Ossa-Morena, ZOM) — que contacta com a Zona Centro-Ibérica (Ribeiro et al., 1990, 2007). O conjunto anterior faz parte do megadomínio de cisalhamento de Porto–Tomar–Ferreira do Alentejo (Chaminé et al., 2003; Ribeiro et al., 2007). No MI a evolução tectónica posterior é imposta pela orogenia Alpina (*e.g.*, Ribeiro et al., 1990; Cabral, 1995) correspondendo à reactivação das falhas tardi-variscas e como consequência estará na origem dos actuais traços morfoestruturais da região. A presença de alguns depósitos plio-quadernários, discordantes sobre o substrato ante-Mesozóico, representa, ou o testemunho do arrasamento do relevo e modelação da superfície do MI ou o entalhe da rede hidrográfica actual (Martín-Serrano, 1994) e o retoque marinho quadernário no litoral da área (Araújo, 1991).

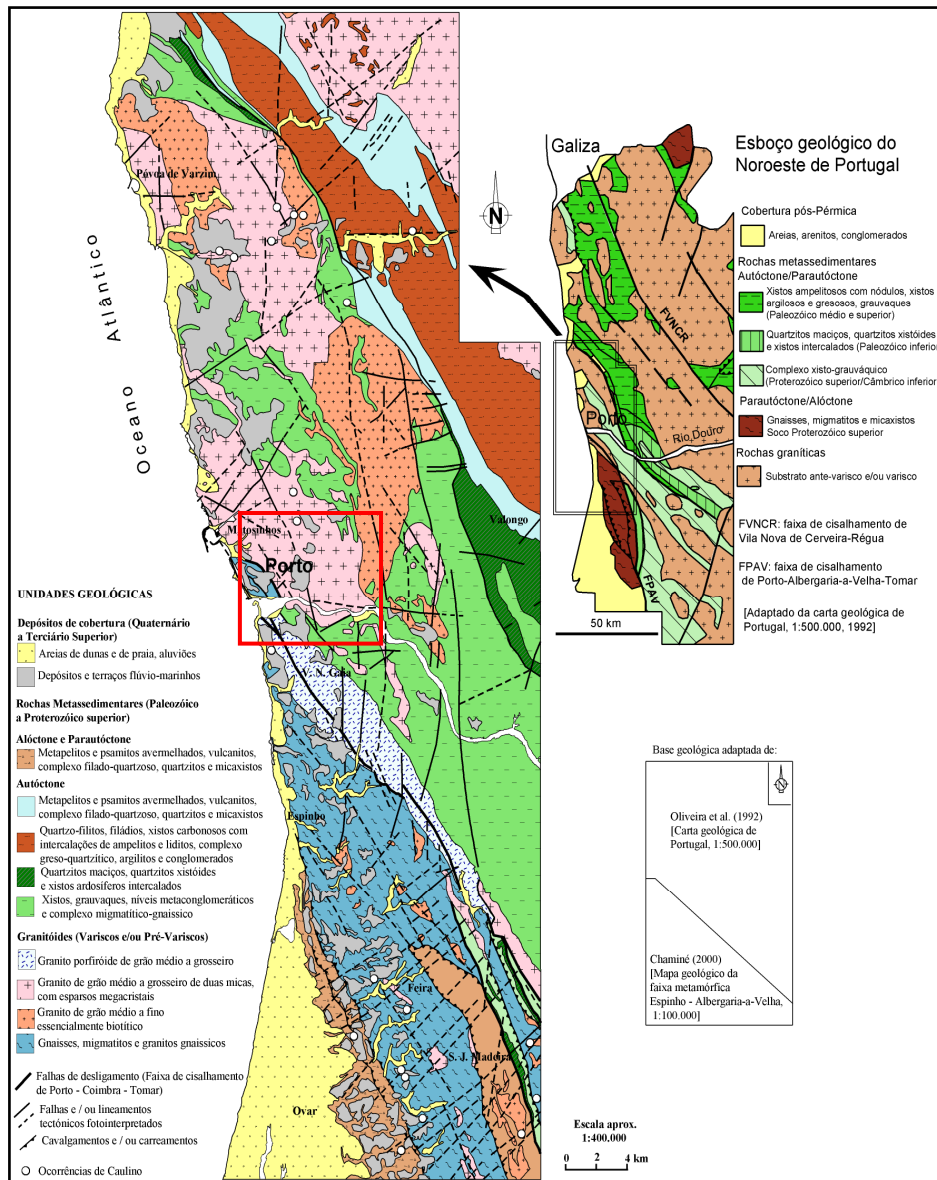


Figura 37. Mapa geológico regional da área metropolitana do Porto (adaptado de Chaminé, 2000; Afonso et al., 2004).

A região do Porto é caracterizada pela dominância de rochas graníticas de idade varisca e/ou pré-varisca (e.g., Serrano Pinto et al., 1987; Chaminé, 2000; Noronha & Leterrier, 2000; Chaminé et al., 2003), sendo estas, maioritariamente, granitóides de duas micas, de grão médio e textura granular (fácies granítica do Porto) ou porfiróide (fácies granítica de Ermesinde).

Em termos de fracturação regional, as orientações dominantes apresentam direcções NW-SE e NE-SW, predominando em termos de quadrante de inclinação as discontinuidades subverticais a verticais. A análise do estado de alteração/alterabilidade permitiu constatar que o resultado da meteorização das rochas graníticas da região é frequentemente patenteada pela

arenização e/ou decomposição do maciço (*cf.* Begonha & Sequeira Braga, 1995, 2002; Begonha, 2001), que pode alcançar profundidades de mais de 30 m.

3.1.2. Geomorfologia regional

Em termos geomorfológicos regionais, a região está enquadrada no MI (Araújo et al., 2003), correspondendo a uma vasta área aplanada — a plataforma litoral, a qual se desenvolve a partir de cotas abaixo dos 125 metros, subindo um pouco para Sul do Porto (figura 38).

Relativamente à organização geral da rede de drenagem, esta reflecte, em grande parte, a tectónica da área, especialmente, dos sistemas de fracturação regional (NW-SE a NNW-SSE, NE-SW a NNE-SSW e W-E; *cf.* Conde, 1983; Araújo, 1991; Cabral, 1995; Pedrosa, 1998; Chaminé, 2000; Araújo et al., 2003), impondo os traços morfoestruturais à região. Assim, estas estruturas maiores produzem uma compartimentação tectónica que, por sua vez, condiciona a distribuição das linhas de água, e consoante a litologia e a estrutura definem-se as redes hidrográficas, em geral, do tipo rectangular e/ou dendrítico. A principal linha de água na região em estudo é o rio Douro (figura 38), bem como uma série de tributários (*e.g.*, rio Tinto) e outros sistemas fluviais (*e.g.*, rio Leça). O rio Douro assume, no seu troço terminal (*ca.* 7km) uma orientação aproximada W-E, rodando para NNW-SSE na zona de confluência deste com o seu afluente da margem direita, o rio Tinto. Este rio apresenta uma orientação geral NNE-SSW, enquanto que o rio Leça exhibe orientações de NE-SW e NW-SE, com um traçado típico em baioneta o que denuncia condicionamento estrutural.

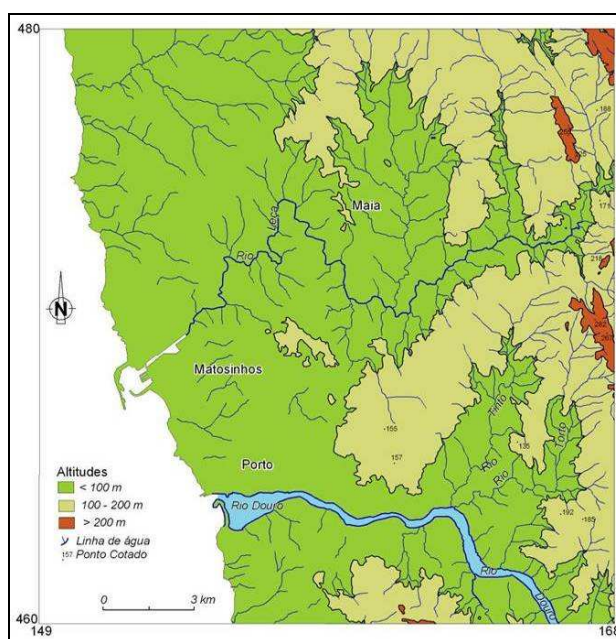


Figura 38. Hipsometria da região do Porto (adaptado de Afonso et al., 2004).

3.1.3. Hidrogeologia regional

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

As principais unidades hidrogeológicas presentes na região correspondem, grosso modo, às unidades geológicas maiores definidas, a saber: i) depósitos de cobertura, onde se incluem, entre outros, as aluviões e os depósitos de praias antigas e de terraços fluviais, ii) rochas metassedimentares, das quais fazem parte os xistos, grauvaques e quartzitos e iii) rochas graníticas, incluindo-se os granitos de duas micas, de grão médio a grosseiro, por vezes porfiróide, os granitos biotíticos porfiróides de grão variável, os gnaisses e os migmatitos.

3.2. Geologia e geotecnia do túnel de “Arca d’Água – Rua Nova do Regado”

3.2.1. Generalidades. Materiais e métodos.

Este estudo apresenta, numa abordagem multidisciplinar, uma caracterização geológica, geotécnica e geomecânica do subsolo granítico da cidade do Porto, ao longo de uma galeria subterrânea, correspondente a uma parte do traçado do antigo manancial de Paranhos (também conhecido como o manancial da Arca d’Água). Esta galeria estende-se desde o jardim de Arca d’Água até à rua Nova do Regado, numa extensão com cerca de 950m (figura 39).

O trabalho envolveu, numa fase inicial, a compilação dos levantamentos geológico-geotécnicos, realizados no período 2005-2008, das superfícies de descontinuidades ao longo de cerca de 400m do traçado referido anteriormente, bem como dos ensaios geomecânicos *in situ* (ensaio esclerométrico) das superfícies estruturais do maciço rochoso realizados no decurso de mesmo trecho. Complementarmente, foi realizada, em Abril de 2009, uma campanha de amostragem de rocha para os ensaios laboratoriais, ensaio de carga pontual (PLT) e ensaio de flexão sob carga centrada. Nesta campanha foram ainda realizados ensaios esclerométricos, em laboratório, em todos os pontos de colheita de material-rocha. No total foram compilados 1754 planos de descontinuidade e 294 estações de ensaios geomecânicos, e foram ensaiados 234 provetes em laboratório. Toda a informação foi uniformizada de uma forma exaustiva e sistemática recorrendo a uma base de dados dinâmica (ver figuras 40 e 41 e anexos 1, 2, 4 e 5).

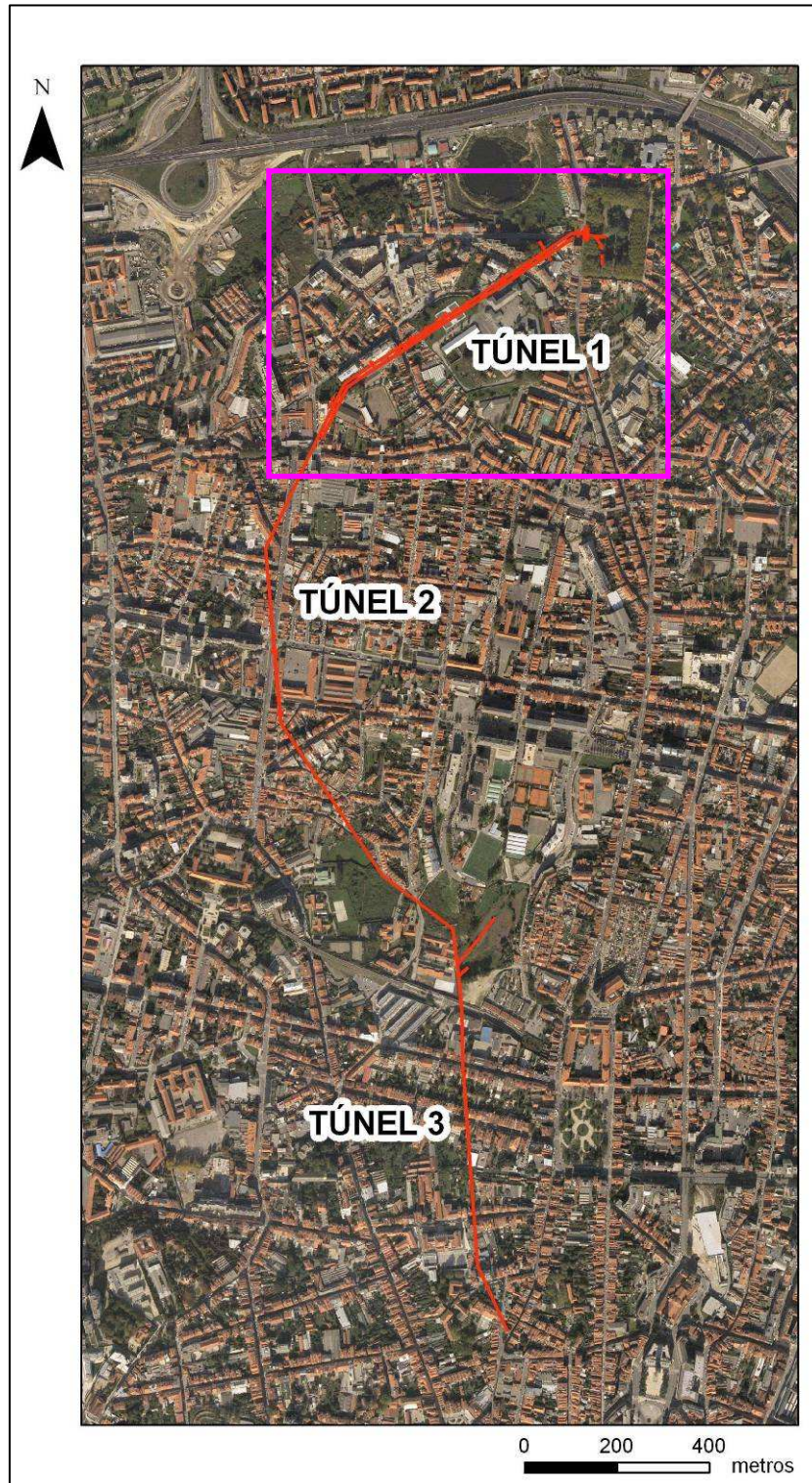


Figura 39. Imagem de satélite da área de estudo (adaptado de www.google-earth.com). Rectângulo rosa corresponde à área de estudo (túnel 1: Jardim de Arca d'Água-Rua Nova do Regado).

Numa fase posterior, foram caracterizados e tratados estatisticamente, de forma exploratória, todos os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos, tendo-se ainda recorrido ao software geo-informático *Dips version 5.1 (RocScience)*, para a definição das principais famílias de descontinuidades.

Por fim, procedeu-se ao refinamento e actualização do zonamento geotécnico e geomecânico (ver anexo 7) definido em Moreira (2008) do maciço rochoso subterrâneo de Arca d'Água.

3.2.2. Aspectos históricos sobre o Manancial de Paranhos

Durante séculos o abastecimento de água à população da cidade do Porto foi efectuado à custa de inúmeros cursos de água — ribeiros, minas, poços ou bolhões — que, devido à constituição granítica dos terrenos e o clima chuvoso, brotavam do subsolo em quantidade (Reis, 2002; Afonso et al., 2006).

Já desde 1570, a população da cidade do Porto solicitava a D. Sebastião que lhe fosse concedida a graça do aproveitamento da água que alimentava as três fontes de Paranhos, dispondo-se a oferecer mil cruzados para ajudar nas despesas da sua canalização até à cidade. Este pedido foi satisfeito em 20 de Novembro de 1579, como testemunha o alvará mandado lavrar pelo Rei D. Filipe I de Portugal (figura 42). No entanto, são já conhecidas referências à localização deste manancial desde 1120 (e.g., Bourbon e Noronha, 1885; Fontes, 1908; Amorim & Pinto, 2001).



Figura 42. Painel existente à entrada de uma das Arcas, conhecida como “Arca Nova”, do Manancial de Paranhos.

O manancial de Paranhos, da Arca d'Água ou das Três Fontes, era o mais importante da cidade, sendo as suas águas consideradas excelentes quanto à qualidade. As três nascentes mais importantes eram reunidas em duas arcas denominadas “Arca Velha” e “Arca Nova” (figura 43), construídas em cantaria em forma de abóbada, ligadas entre si por um aqueduto também em abóbada. As águas eram conduzidas a partir destas arcas em caleiras abertas sobre o granito (figura 44), ou em tubos de ferro ou chumbo, no interior de galerias subterrâneas, e tendo por vezes partes do percurso a descoberto, indo alimentar várias fontes e chafarizes ao longo do percurso.



Figura 43. Aspectos do interior da Arca “Nova”.



Figura 44. Caleira em granito.

Em 1838 as águas do manancial de Paranhos foram adicionadas às do manancial de Salgueiros, provenientes da Quinta de Salgueiros, e ambas conduzidas até à Arca de Sá de Noronha, localizada na actual Praça Gomes Teixeira. Posteriormente estenderam-se até à Arca do Anjo (ao mercado do Anjo). No final do século XIX, as águas passaram a ser misturadas só a partir desta Arca, por razões de salubridade. Durante quarenta anos a *Compagnie Générale des Eaux* foi

responsável pelo abastecimento de água à cidade do Porto. Em 28 de Março de 1927, a concessão da companhia foi registada pela Câmara Municipal do Porto. A 1 de Abril desse ano eram instituídos os Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento — SMAS (actualmente Águas do Porto, EM) — que passariam a ser responsáveis pelo abastecimento de água à cidade.

3.2.3. Geologia de superfície: traços gerais

À escala local, a geologia de superfície, na região circundante ao traçado do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado” consiste, basicamente em (figura 45): i) rochas graníticas, representadas pela fácies conhecida como “Granito do Porto” (Almeida, 2001), grão médio a grosseiro, de duas micas, deformado e ligeiramente orientado, de cor acinzentada, passando a amarelado quando se encontra alterado. O granito é atravessado por filões de quartzo e aplito-pegmatíticos, os quais se apresentam com um grau de alteração inferior ao do granito (Babendererde et al., 2004); ii) depósitos aluvionares, essencialmente constituídos por sedimentos argilosos e arenosos com espessuras inferiores a 6 m (COBA, 2003).

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

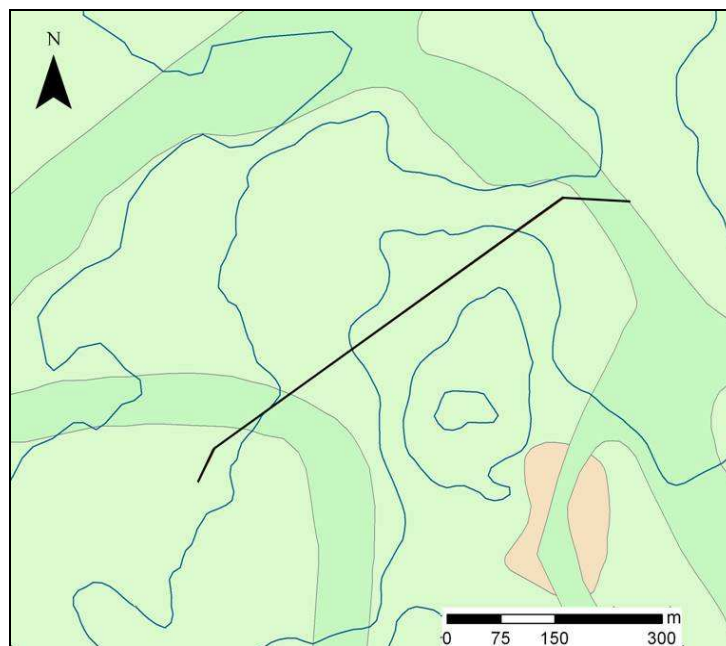


Figura 45. Unidades geológicas na região envolvente ao traçado do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado” (adaptado de COBA, 2003). A mancha verde clara corresponde ao granito do Porto, a mancha verde escura às aluviões, a mancha rosa a granito caulinizado, o traço negro corresponde ao traçado do túnel e as linhas azuis a curvas de nível.

3.2.4. Geologia e geotecnia subterrânea do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”

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

Do ponto de vista geológico-estrutural são reconhecidas duas unidades geológicas ao longo do traçado do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”, a saber:

➤ O granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado. Em alguns locais do traçado subterrâneo o granitóide encontra-se muito a completamente alterado (W_{4-5}) e, mesmo, caulinizado; sendo esta a razão da descoloração do granito em muitas zonas do maciço. Foram registadas zonas de mais intensa feldspatização e caulinização. O granito apresenta, ainda, uma tonalidade esbranquiçada-amarelada. Na proximidade das descontinuidades e em zonas de maior densidade de fracturação ou esmagamento, a alteração caracteriza-se pela ocorrência de pontuações ferruginosas (particularmente a biotite), conferindo globalmente ao material rocha uma tonalidade amarelada-acastanhada. Algumas descontinuidades apresentam frequentemente impregnações de sulfuretos conferindo às superfícies de descontinuidades um aspecto amarelado. A análise dos dados do grau de alteração permite constatar que, nos cerca de 400 metros estudados, predomina um material-rocha são a pouco alterado (W_{1-2});

➤ Os filões e/ou filonetes de quartzo leitoso, com possanças que não ultrapassam os 30 cm e, em regra, se encontram muito tectonizados.

3.2.5. Parâmetros geológico – geotécnicos e geomecânicos: apresentação e caracterização de dados

Apresenta-se seguidamente a caracterização dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos relativa a todo o traçado do túnel de “Arca d’Água – Rua Nova do Regado” (Paranhos, Porto).

❖ *Grau de alteração*

Numa análise global (figuras 46 e 47 e Anexo 6), de acordo com a classificação da ISRM (1978, 1981) e da GSE (1995), o maciço encontra-se, maioritariamente (*ca.* 56%), são a pouco alterado (W_{1-2}), ocorrendo numa percentagem significativa (*ca.* 38%), medianamente alterado (W_3) e, em menor escala (*ca.* 7%), muito a completamente alterado (W_{4-5}).

Na proximidade das descontinuidades e em zonas de maior densidade de fracturação ou de esmagamento, a alteração caracteriza-se pela ocorrência de material ferruginoso e argiloso, conferindo globalmente ao material-rocha uma tonalidade amarela-acastanhada.

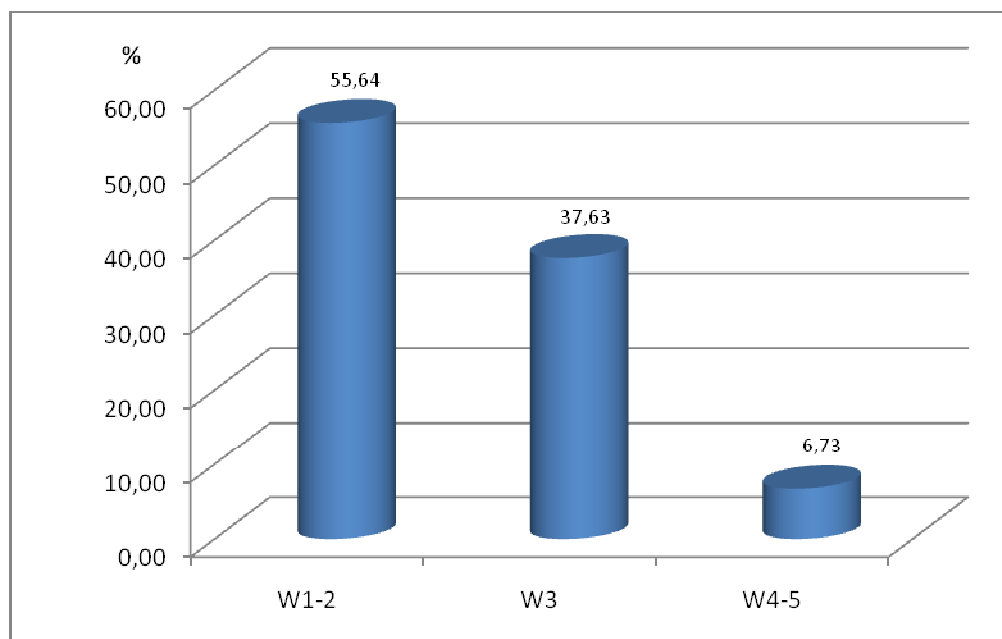


Figura 46. Grau de alteração do maciço do túnel de Arca d’Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

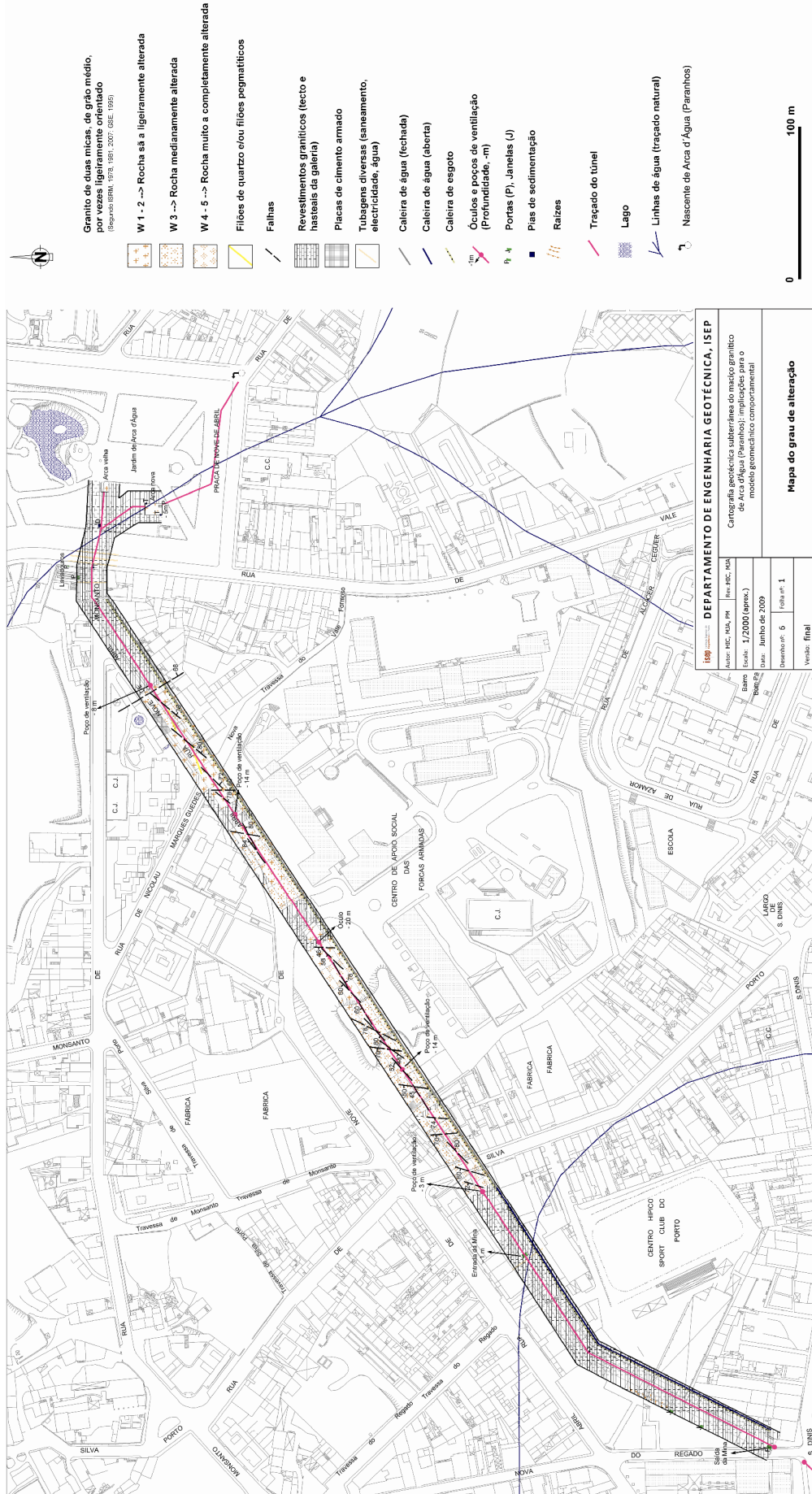


Figura 47. Mapa do grau de alteração do maciço do túnel “Arca d’Água – Rua Nova do Regado” (adaptado de Afonso, *in prep.*)

❖ Estado da fracturação

O tratamento dos dados recolhidos no terreno, referentes à técnica de amostragem linear, foi feito recorrendo a diagramas geológico-estruturais (diagramas de contorno estrutural e diagramas de rosetas), os quais permitiram a definição do número de famílias de descontinuidades e, sobretudo, das famílias dominantes, suas atitudes, seus espaçamentos e persistência.

Como se pode constatar pela observação da figura 48, as 1754 descontinuidades correspondem, na sua maioria (ca. 69%), a diaclases, ocorrendo contudo uma percentagem significativa (ca. 31%) de falhas.

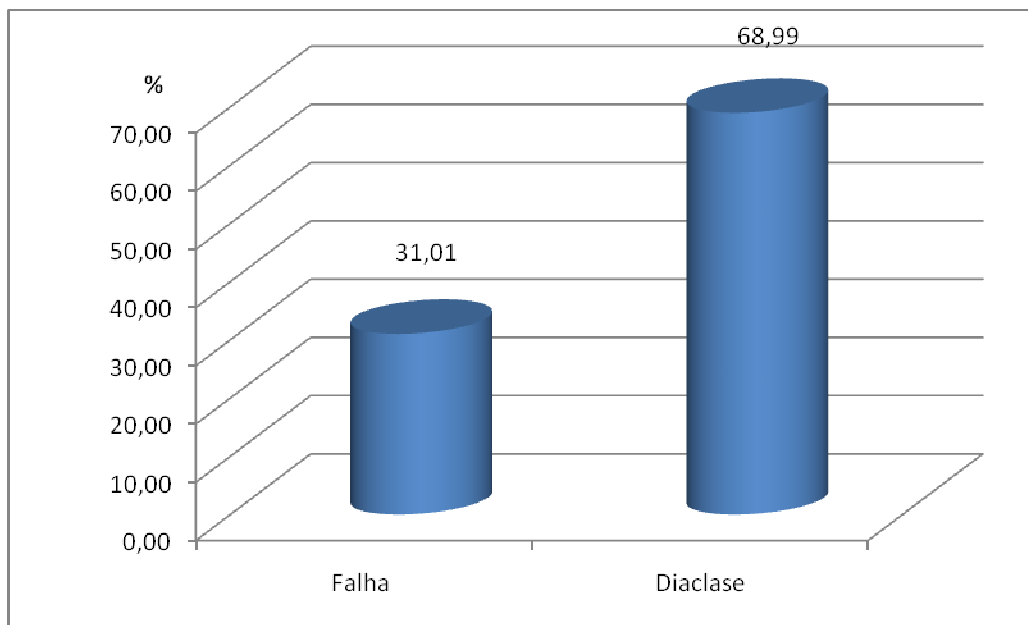


Figura 48. Tipo de descontinuidades presentes no maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

A análise dos diagramas estruturais (figura 49), bem como dos azimutes e inclinações médios apresentados nas figuras 50 e 51, permite constatar que as descontinuidades se concentram em três famílias principais de descontinuidades: a família N20°-40°E, com inclinações que oscilam entre 70°-85° para o quadrante NW; a família N40°-50°E com inclinações que oscilam entre 50°-70° e a família N110°-130°E com inclinações que oscilam entre 5°-25°.

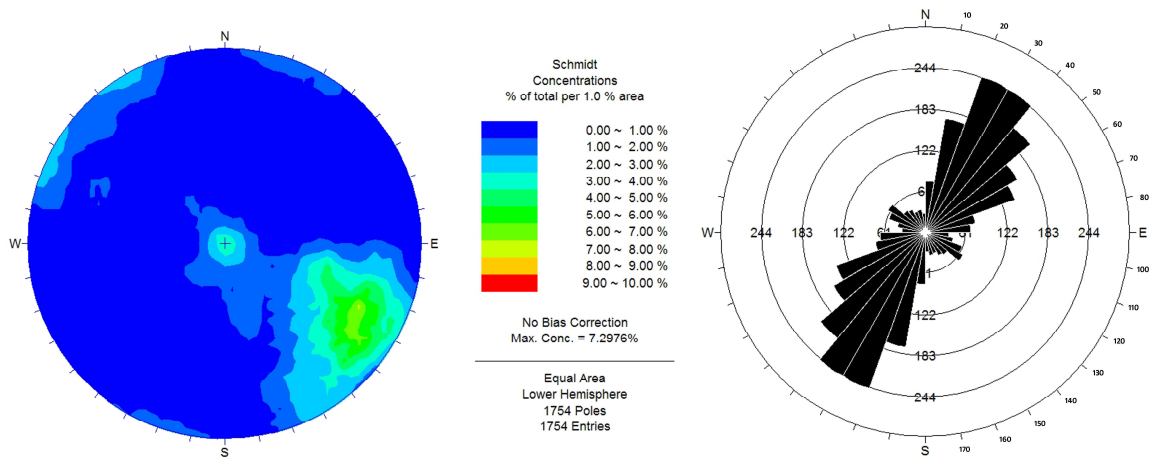


Figura 49. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=1754) do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

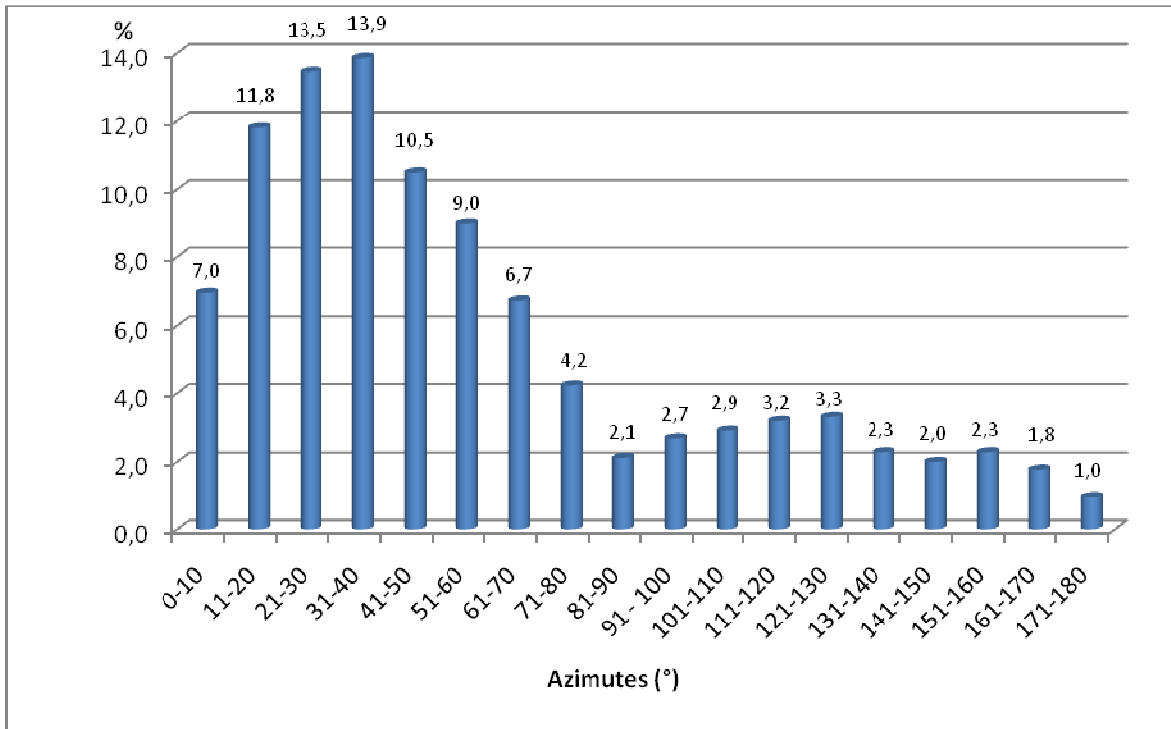


Figura 50. Azimute médio das descontinuidades (n=1754) do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

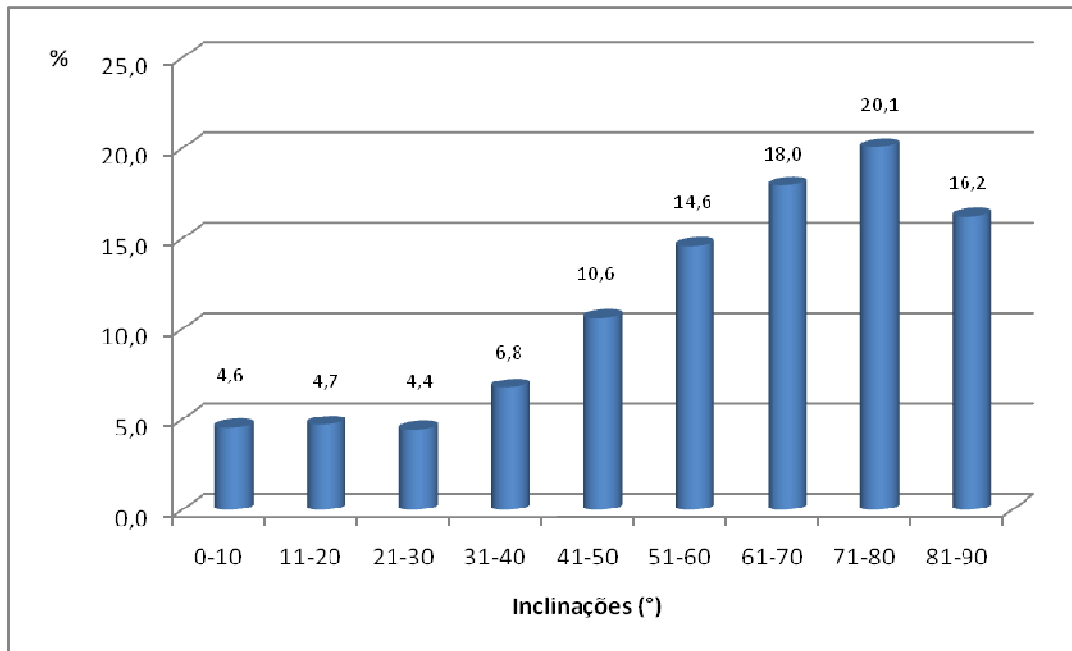


Figura 51. Inclinação média das descontinuidades (n=1754) do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ **Abertura**

No caso em estudo as descontinuidades apresentam, em regra, aberturas inferiores a 0.5mm, designando-se como fechadas (*ca.* 77%). Seguem-se, com cerca de 18%, as descontinuidades abertas (aberturas entre 0.5 e 10mm) e, numa percentagem reduzida (*ca.* 4.5%), descontinuidades muito abertas (aberturas superiores a 10 mm), como se pode ver pela figura 52.

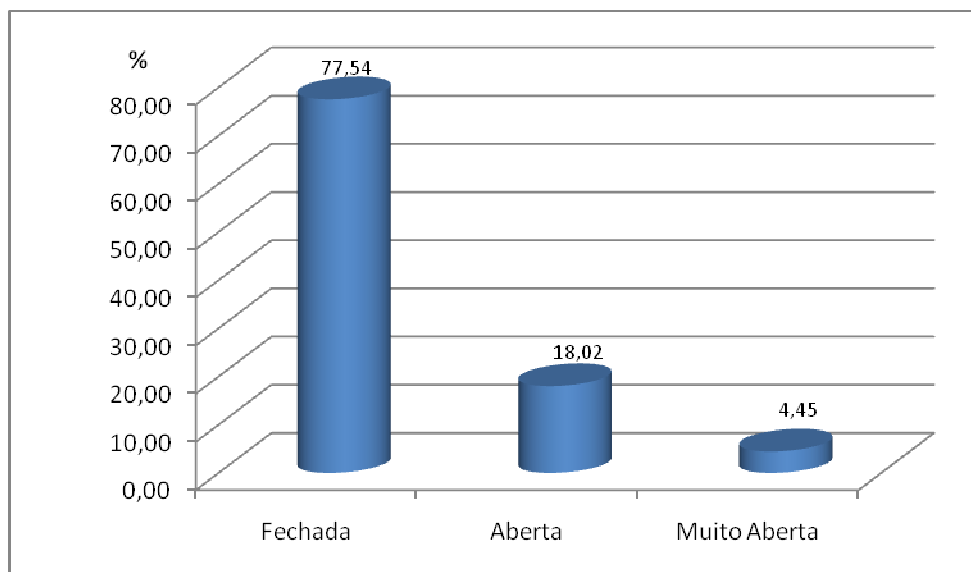


Figura 52. Abertura das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ *Espaçamento*

Verifica-se, pela observação da figura 53, que as descontinuidades apresentam, maioritariamente (ca. 68%), um espaçamento próximo (F_{4-5}), de acordo com os critérios da ISRM (1978, 1981, 2007), ou seja inferior a 20cm. No entanto, a percentagem de descontinuidades medianamente afastadas (F_3) é significativa (ca. 24%), pelo que o valor médio global relativo a todo o maciço é de 35.7cm.

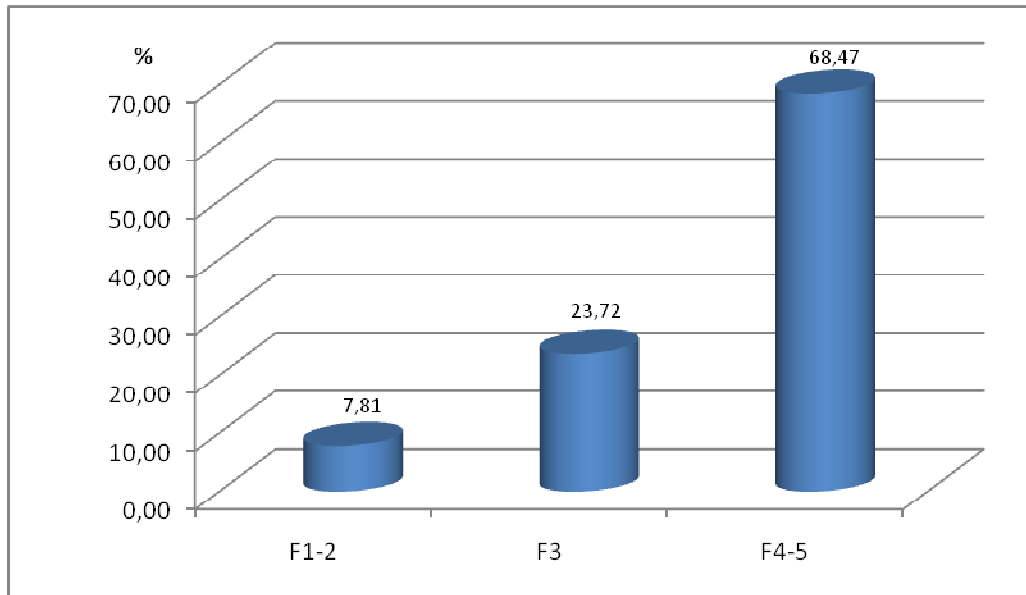


Figura 53. Espaçamento entre as descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ *Terminação*

O tipo de terminação das descontinuidades distribui-se pelos três tipos descritos pela ISRM (1978, 1981), no entanto a terminação em rocha (R) aparece com uma percentagem ligeiramente superior (ca. 36%), como se pode ver pela figura 54.

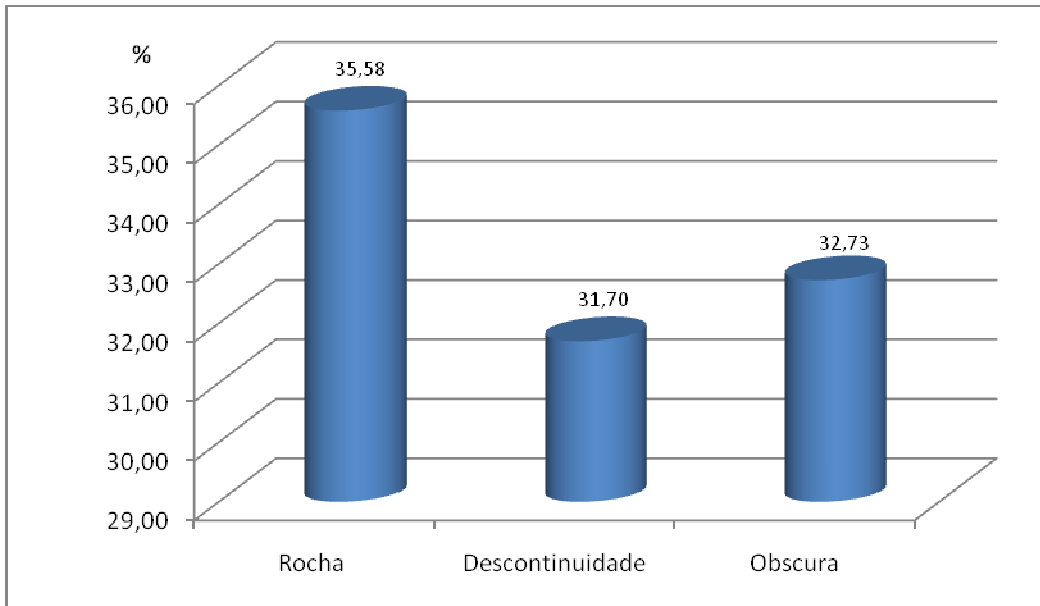


Figura 54. Tipo de terminação das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ *Continuidade*

No que respeita à continuidade das descontinuidades, a qual é reflectida pelo semi-comprimento, estas apresentam-se na sua grande maioria (*ca.* 91%), muito pouco contínuas, *i.e.* com um comprimento inferior a 1m (figura 55).

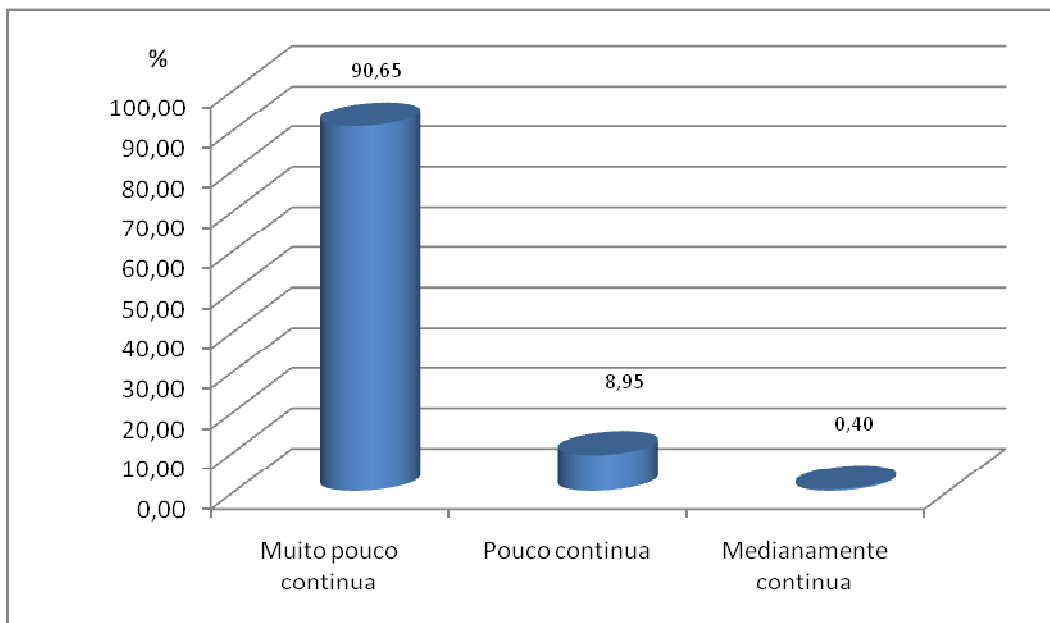


Figura 55. Continuidade das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ *Curvatura*

A análise da figura 56 permite constatar que a curvatura das descontinuidades é, na sua maioria (*ca.* 66%), do tipo C₁₋₂, pelo que estas se classificam como planas. Ocorrem ainda, numa percentagem significativa (*ca.* 31%), descontinuidades algo curvas (C₃).

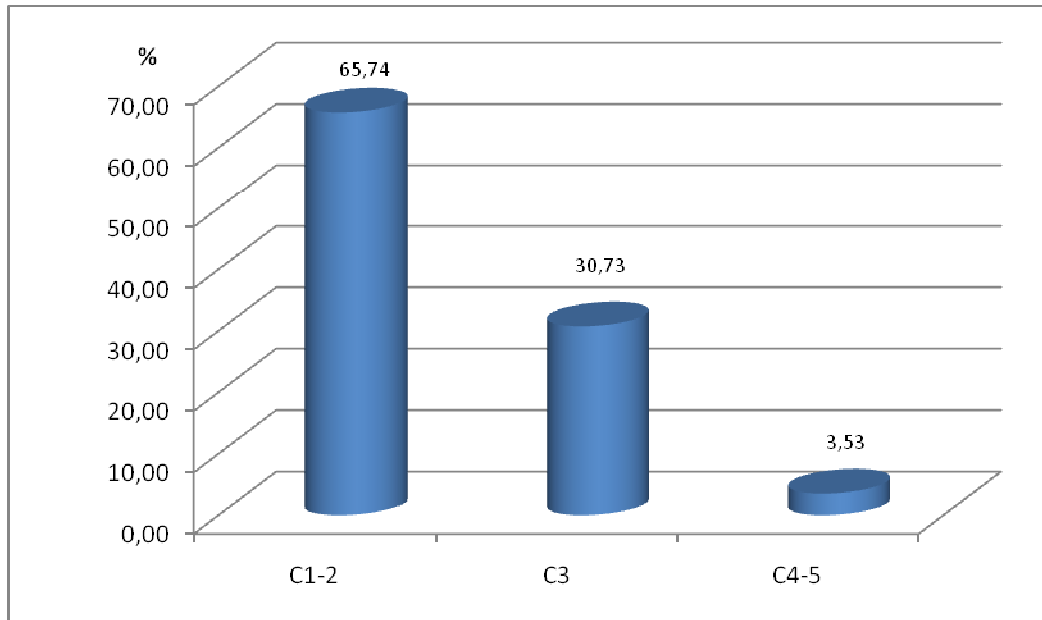


Figura 56. Grau de curvatura das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ *Rugosidade*

A rugosidade dominante (*ca.* 66%) é do tipo R₃ (algo rugosa), correspondendo a uma rugosidade em que as paredes das descontinuidades não são perfeitamente lisas, mas também não são visíveis estruturas fibrosas que possam impedir ou facilitar a movimentação relativa de blocos (figura 57). Ocorrem, ainda, descontinuidades lisas (R₁₋₂) numa percentagem significativa (*ca.* 30%) e, por último, numa baixa percentagem (*ca.* 4%), descontinuidades muito rugosas (R₄₋₅).

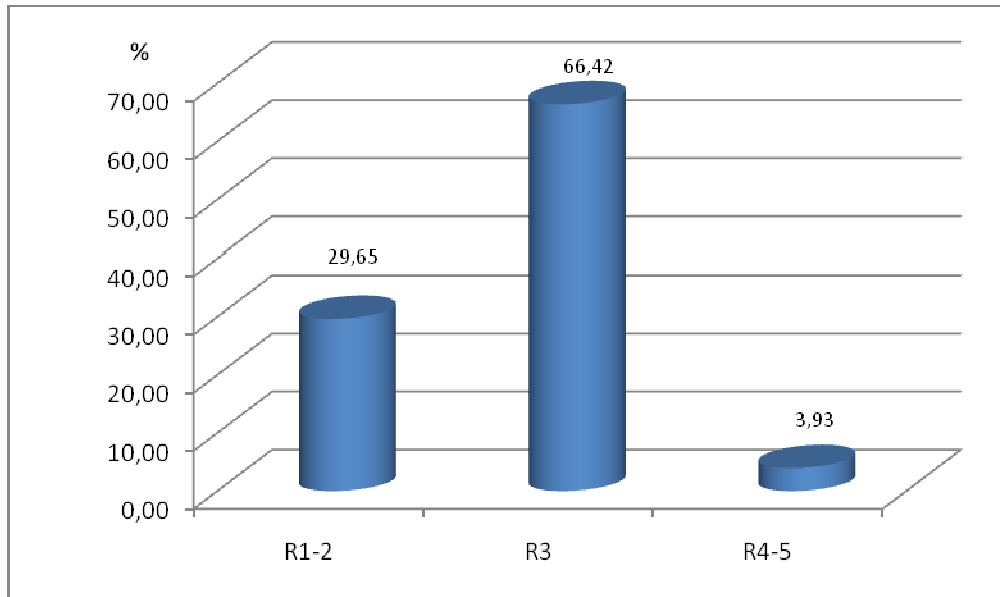


Figura 57. Rugosidade das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ **Enchimento**

A maioria das descontinuidades, por se apresentarem fechadas, não tem qualquer tipo de enchimento. No entanto, quando este existe é essencialmente (*ca.* 20%) do tipo argiloso (figura 58).

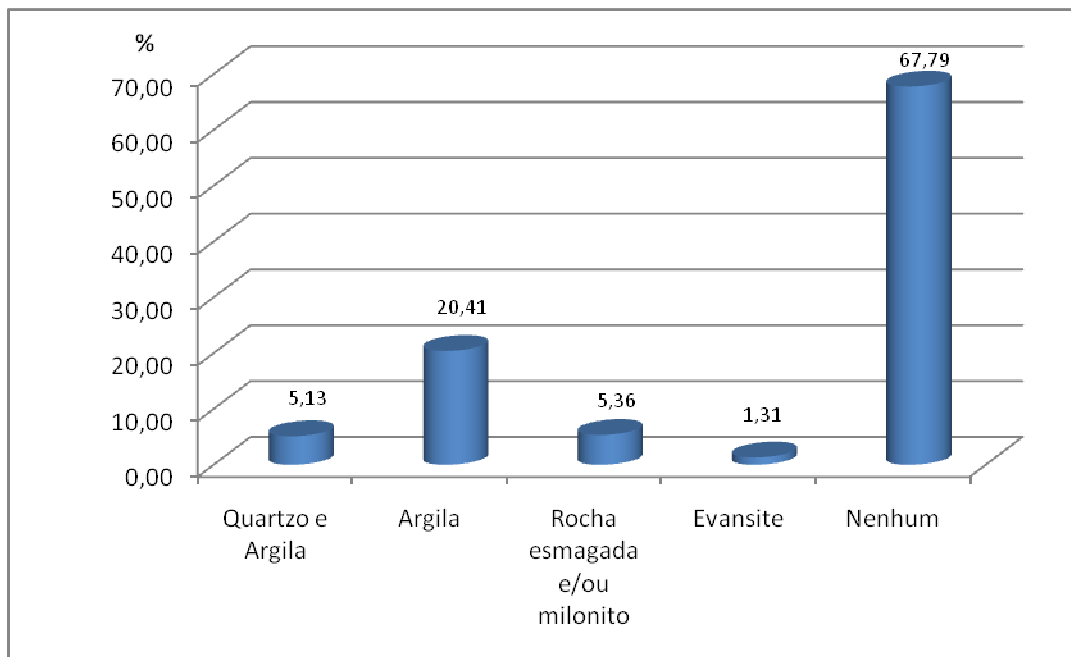


Figura 58. Enchimento das descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ **Presença de água**

Verifica-se que em grande parte (*ca.* 58%) das descontinuidades ocorre a presença de água, não sendo de descurar o facto de uma percentagem significativa, das descontinuidades se apresentarem secas (figura 59).

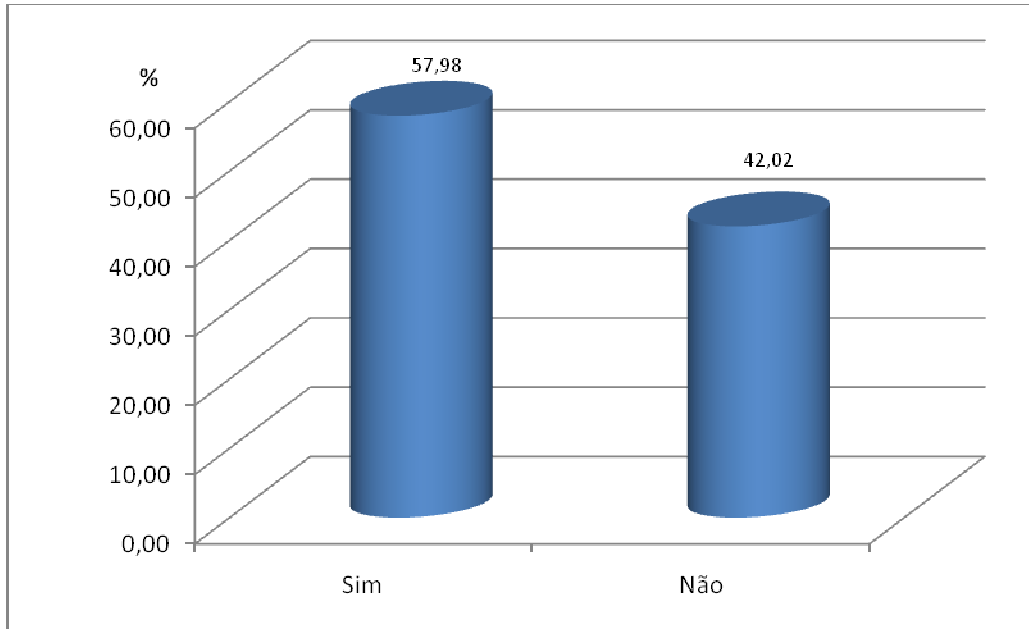


Figura 59. Presença de água nas descontinuidades do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

❖ **Resistência à compressão uniaxial**

A avaliação da resistência à compressão uniaxial do material-rocha foi realizada a partir de dois ensaios: o Ensaio Esclerométrico (campo) e o Ensaio de Carga Pontual (laboratório).

A resistência avaliada por intermédio do ensaio com o esclerómetro portátil (ou martelo de Schmidt), teve origem nos dados obtidos a partir de 294 estações geomecânicas. Constatou-se assim, que a litologia presente, um granito de grão médio, de duas micas, se classifica, na sua maioria (*ca.* 64%), como sendo do tipo S_3 (resistência média), segundo a ISRM (1981, 2007), com um valor médio de 40 MPa. Existe, igualmente, uma percentagem significativa (*ca.* 32%), que classifica o maciço na classe de resistência elevada (S_2), com um valor médio de 85 MPa (figura 60, Anexo 2).

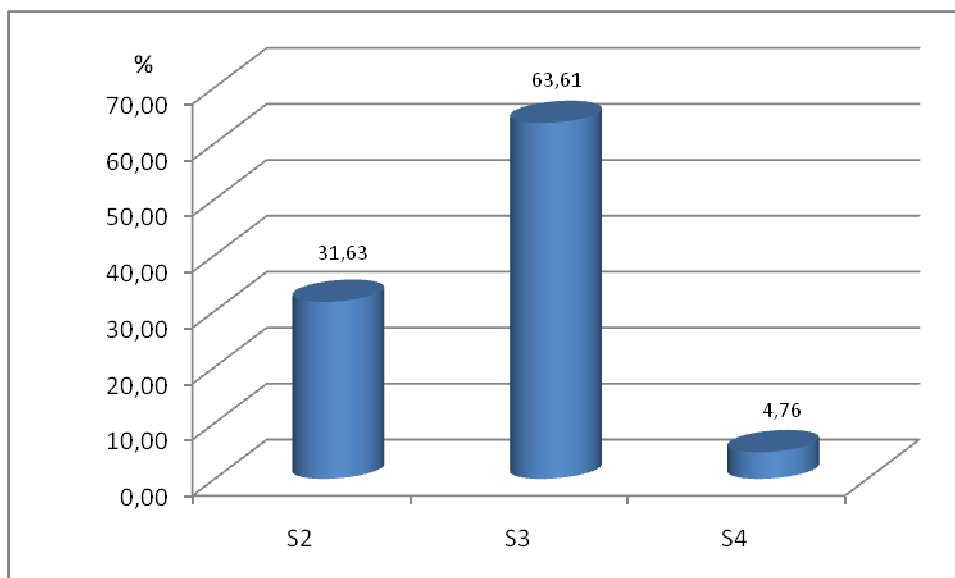


Figura 60. Resistência à compressão uniaxial do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto), obtida a partir do ensaio esclerométrico.

Com o objectivo de testar, numa perspectiva metodológica exploratória, foram realizados em laboratório ensaios esclerométricos sobre os 234 provetes, correspondentes a 15 estações geomecânicas (Anexo 3), utilizados nos ensaios de carga pontual e de flexão explanados mais adiante.

Para cada provete foram realizadas 3 séries de 10 medições com o martelo de Schmidt. De salientar que em cerca de 4% dos provetes não foi possível registar os valores da “*dureza de Schmidt*” (R) por estes se terem partido com a pressão do martelo (figura 61).



Figura 61. Exemplos de provetes destruídos na realização do ensaio esclerométrico.

Os resultados obtidos permitem concluir que o material-rocha se classifica, na sua maioria (ca. 74%), como sendo do tipo S_3 (resistência média), segundo a ISRM (1981). Existe, igualmente, uma percentagem significativa (ca. 19%), na classe de resistência elevada (S_2) (figura 62).

Estes resultados estão em concordância com os obtidos *in situ*, quer para análise global das 294 estações geomecânicas, quer relativamente aos valores das 15 estações, nas quais os provetes tiveram origem.

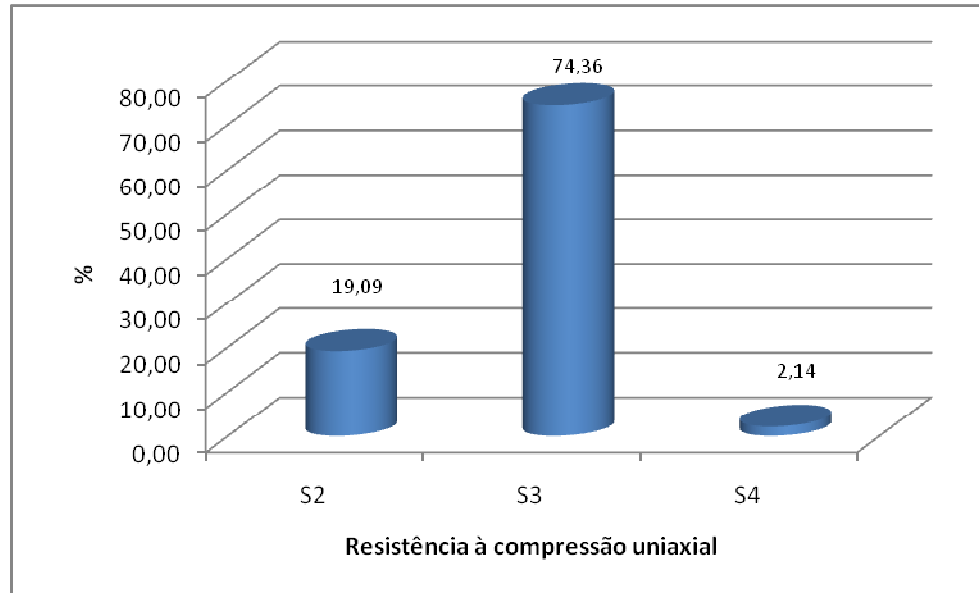


Figura 62. Resistência à compressão uniaxial laboratorial.

A avaliação da resistência à compressão uniaxial por intermédio do ensaio de carga pontual (PLT) foi feita em 158 dos 234 provetes, correspondentes a 17 amostras.

Na serragem das amostras para a preparação dos provetes surgiram algumas dificuldades, nomeadamente devido ao grau de alteração do material-rocha, à sua fracturação, bem como à presença de veios de quartzo (figura 63).



Figura 63. Exemplo de provete fracturado com veio de quartzo.

Todos os provetes foram numerados (figura 64) e medidos com auxílio de um paquímetro digital electrónico (CONTROLS, modelo 82-C0109/1).



Figura 64. Numeração dos provetes ensaiados no PLT.

O ensaio de carga pontual foi realizado sobre provetes prismáticos (blocos) (figura 65). Em alguns casos, a superfície de rotura passou apenas por um dos pontos de carga, pelo que o ensaio respectivo foi rejeitado (figura 66).



Figura 65. Ensaio de Carga Pontual sobre provetes prismáticos.



Figura 66. Exemplos de ensaios rejeitados.

O valor médio de $I_{s(50)}$ deve ser calculado retirando os dois valores mais elevados e os dois valores mais baixos. Dado que não obtivemos um grande número de provetes, optámos por eliminar o valor mais elevado e o valor mais baixo, efectuando-se a média dos restantes valores.

A avaliação da resistência à compressão uniaxial (MPa) a partir do índice de resistência à carga pontual, para os 17 provetes ensaiados, de acordo com a ISRM (1985, 2007), apresenta-se na figura 67.

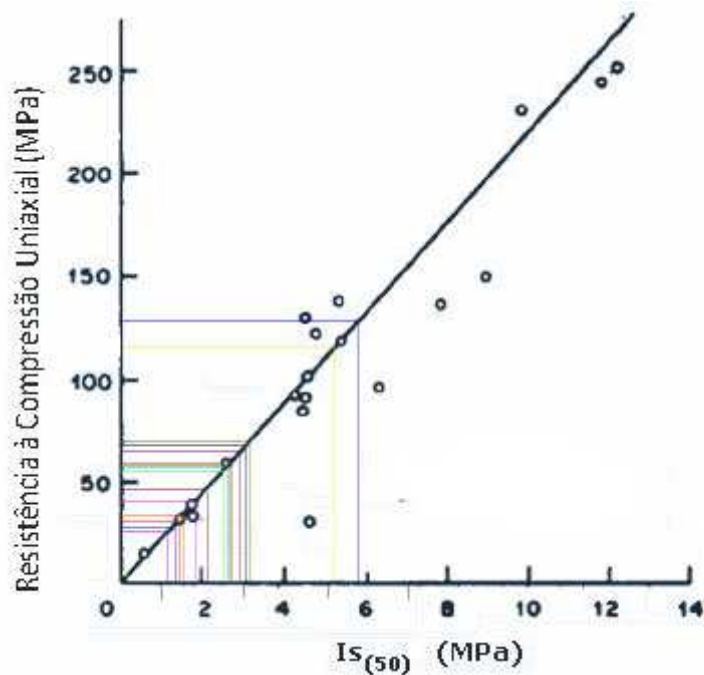


Figura 67. Determinação da resistência à compressão uniaxial a partir do índice de resistência à carga pontual, segundo a ISRM (1985, 2007), para os 17 provetes ensaiados.

No quadro 15 sintetizam-se todos os valores médios do índice de resistência à carga pontual, da resistência à compressão uniaxial, bem como da classe de resistência, para cada um dos pontos de amostragem. Na figura 68 apresentam-se os valores de resistência à compressão uniaxial com a distância das amostras à origem.

Quadro 15. Valores médios do índice de resistência à carga pontual, da resistência à compressão uniaxial e da classe de resistência, para cada um dos pontos de amostragem.

Pontos de amostragem (m)	Média $I_{s(50)}$ (MPa)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de Resistência ISRM (1981, 2007)
-187,50	2,21	48,00	S ₃
0,00	1,69	35,00	S ₃
22,20	3,26	70,00	S ₂
29,80	5,26	120,00	S ₂
33,10	2,75	60,00	S ₃
33,30	2,65	59,00	S ₃
105,40	0,91	5,00	S ₅
113,90	2,96	68,00	S ₂
115,90	1,67	34,00	S ₃
130,60	1,58	30,00	S ₃
191,50	3,17	69,00	S ₂
212,50	1,38	25,00	S ₃
220,70	2,73	59,50	S ₃
222,40	2,62	58,50	S ₃
289,50	5,86	121,00	S ₂
291,10	1,91	40,00	S ₃
305,50	1,58	30,00	S ₃

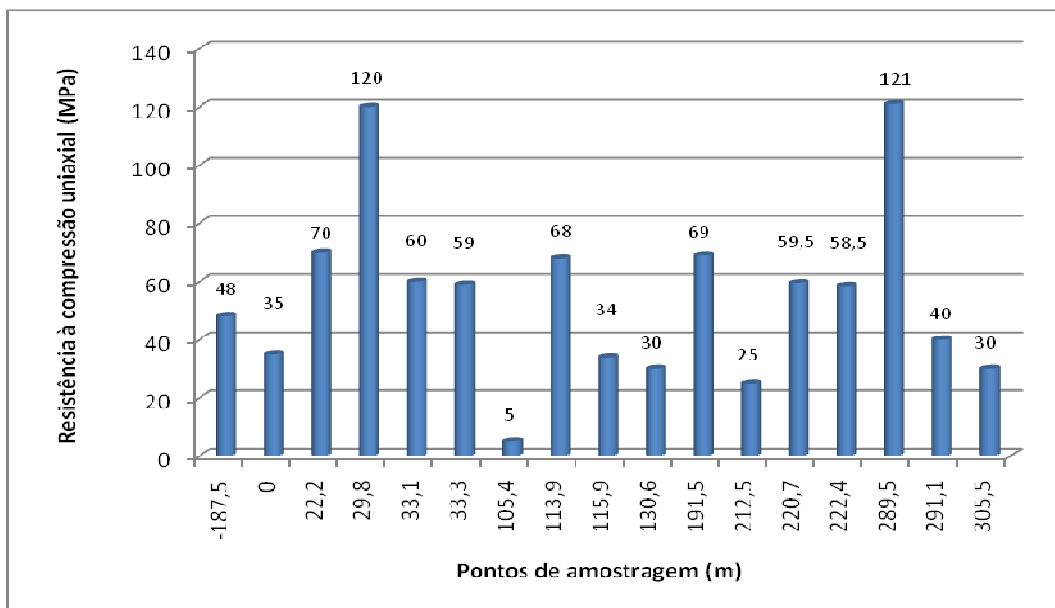


Figura 68. Resistência à compressão uniaxial versus distância à origem da *scanline*.

Constata-se assim que o granito de duas micas é, na sua maioria, do tipo S₃ (resistência média), segundo a ISRM (1981, 2007). Contudo, existe uma percentagem significativa que classifica o material-rocha na classe S₂ (resistência elevada), como se pode verificar pela figura 69.

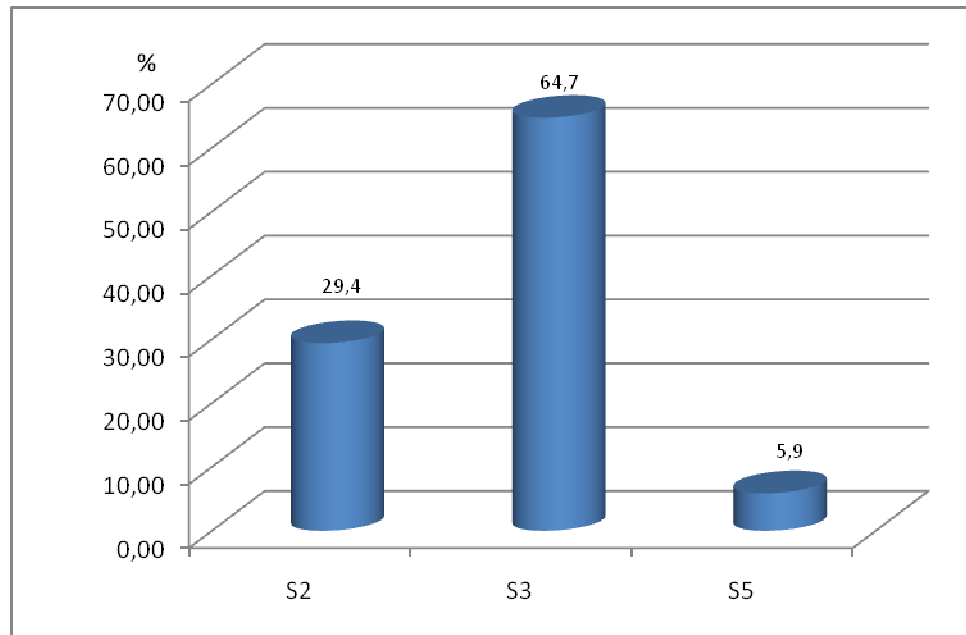


Figura 69. Classes de resistência, segundo o ensaio de carga pontual.

❖ *Resistência à flexão sob carga centrada*

A avaliação da resistência à flexão, através do ensaio à flexão sob carga centrada, foi feita em 76 dos 234 provetes, correspondentes a 10 amostras (Anexo 5). Este ensaio deve ser encarado numa perspectiva mais exploratória, uma vez que, como já foi referido anteriormente, visa a caracterização de rochas para fins ornamentais. Além disso, surgiram alguns problemas técnicos no desenvolvimento deste ensaio.

À semelhança do ensaio de carga pontual, todos os provetes foram numerados e medidos com auxílio do paquímetro digital electrónico anteriormente referido, sendo posteriormente ensaiados (figura 70).



Figura 70. Exemplo do ensaio de resistência à flexão sob carga centrada.

Tal como no ensaio de carga pontual, alguns ensaios tiveram que ser rejeitados, pois a sua rotura desviou-se do centro do provete (figura 71).



Figura 71. Exemplos de ensaios rejeitados.

Os resultados obtidos da resistência à flexão (R_f) foram em muitos casos inferiores a 1MPa, pelo que se optou por considerar para o cálculo do valor médio de R_f para cada provete apenas os três valores mais elevados.

No quadro 16 apresenta-se o valor médio da resistência à flexão para cada amostra, bem como o valor médio global correspondentes às dez amostras.

Quadro 16. Valores médios da resistência à flexão (R_f) para os dez pontos de amostragem.

Pontos de amostragem (m)	Valor médio de R_f (MPa)	Valor médio de R_f (MPa) relativo às 10 amostras
-187,50	1,46	1,92
0,00	0,57	
29,80	5,62	
33,10	1,31	
105,40	0,88	
115,90	1,99	
130,60	1,58	
191,50	1,65	
212,50	0,12	
289,50	3,98	

Os valores obtidos são muito baixos, na sua maioria inferiores a 2MPa, o que, de acordo com Pinto et al. (2006), corresponde a um material-rocha de muita baixa resistência à flexão.

3.3. Proposta de um zonamento geotécnico – geomecânico

Os critérios utilizados no zonamento geotécnico-geomecânico do maciço rochoso granítico subterrâneo de Arca d'Água (Paranhos, Porto) tiveram como base as especificações da UNESCO (1976) e, especialmente, da IAEG (1981, 2005).

A proposta do zonamento geotécnico-geomecânico para o maciço subterrâneo de Paranhos apresenta-se na figura 72 e no anexo 7 à escala 1/2000.

No quadro 17 apresenta-se uma síntese das principais características das três zonas geotécnicas estabelecidas, as quais correspondem a um refinamento do zonamento geotécnico-geomecânico estabelecido em Moreira (2008).

A caracterização das unidades geotécnicas de superfície para toda a cidade do Porto, realizada pela COBA (2003), para as três unidades que interessam ao traçado do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”, apresenta-se no quadro 18. Confrontando as características destas unidades de superfície com as das unidades geotécnicas definidas no maciço subterrâneo de Paranhos, constata-se o seguinte: i) a avaliação do grau de alteração e do grau de fracturação é coerente; ii) os graus do parâmetro R definidos para o maciço rochoso são consensuais com os intervalos de resistência à compressão uniaxial avaliados para o maciço de Paranhos.

Quadro 17. Algumas características das zonas geotécnicas definidas no maciço subterrâneo de Paranhos.

Zonas Geotécnicas	Extensão (m)	Grau de alteração (W)	Grau de fracturação (F)	Resistência à compressão uniaxial (S)
ZG1	0 – 116 162 - 252	W ₁₋₂	F ₄₋₅	S ₃ a S ₂
ZG2	116 – 162 252 - 379	W ₃	F ₄₋₅ a F ₃	S ₃
ZG3	379 - 400	W ₄₋₅	F ₁₋₂	S ₅

Quadro 18. Algumas características das unidades geotécnicas de superfície, G2, G9-A e G9-B, definidas para a cidade do Porto (adaptado de COBA, 2003).

Unidades Geotécnicas	U.G.	Grau de alteração (W) e fracturação (F)	Caracterização da qualidade (a)
Solos aluvionares e coluvionares	G2	-	$0 < N_{SPT} < 10$, com menor probabilidade de ocorrência de $10 < N_{SPT} < 30$
Maciço granítico rochoso de fraca a razoável qualidade	G9-A	W_3 , com menor probabilidade de ocorrência de W_4 F_{2-4} , com probabilidade de ocorrência de F_5	$25\% < RQD < 75\%$ R_{2-3} , com menor probabilidade de ocorrência de R_1 e R_4
Maciço granítico rochoso de boa a excelente qualidade	G9-B	W_{2-3} F_{2-3} , com menor probabilidade de ocorrência de F_{1-2} e F_{3-4}	$RQD > 75\%$ R_{2-4} , com menor probabilidade de ocorrência de R_5

a) Classificação da compacidade ou consistência (com base nos ensaios SPT); classificação da qualidade com base no RQD e resistência à compressão uniaxial (R).

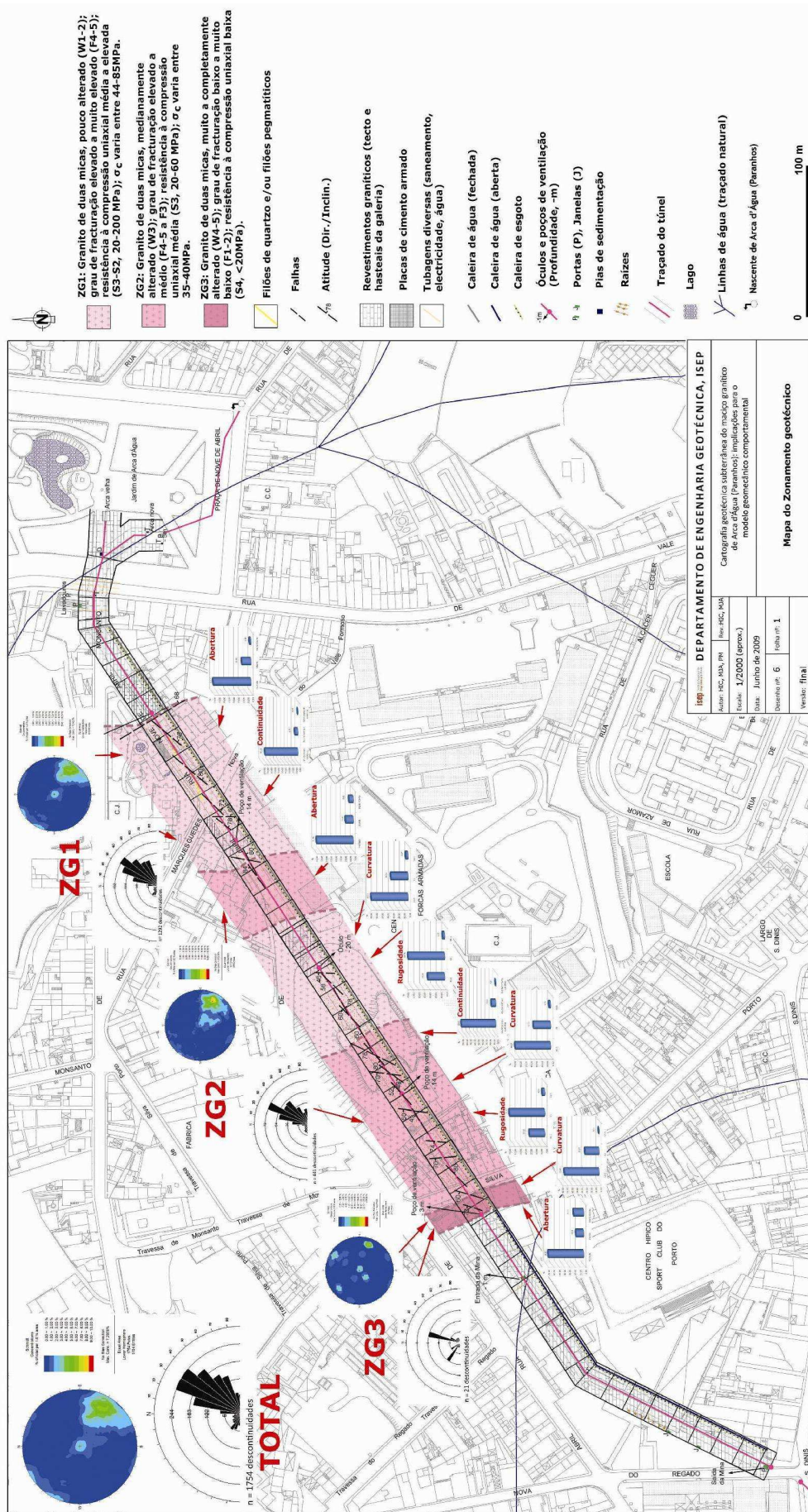


Figura 72. Mapa do zonamento geotécnico do maciço do túnel “Arca d’Água – Rua Nova do Regado” .

De seguida apresentam-se, em detalhe, as características de cada uma das zonas geotécnicas definidas.

Zona geotécnica ZG1

Esta zona é a que tem maior representatividade (figura 74), com uma extensão de 206 metros, com 1292 descontinuidades registadas e 226 estações geomecânicas realizadas, pelo que as suas características reflectem, como se verá de seguida, o estudo global do maciço.

Nesta zona o maciço apresenta-se, na sua maioria (ca. 68%), são a pouco alterado (W_{1-2}), ocorrendo ainda numa percentagem relevante (ca. 28%) medianamente alterado (W_3), como se pode verificar pela figura 73.

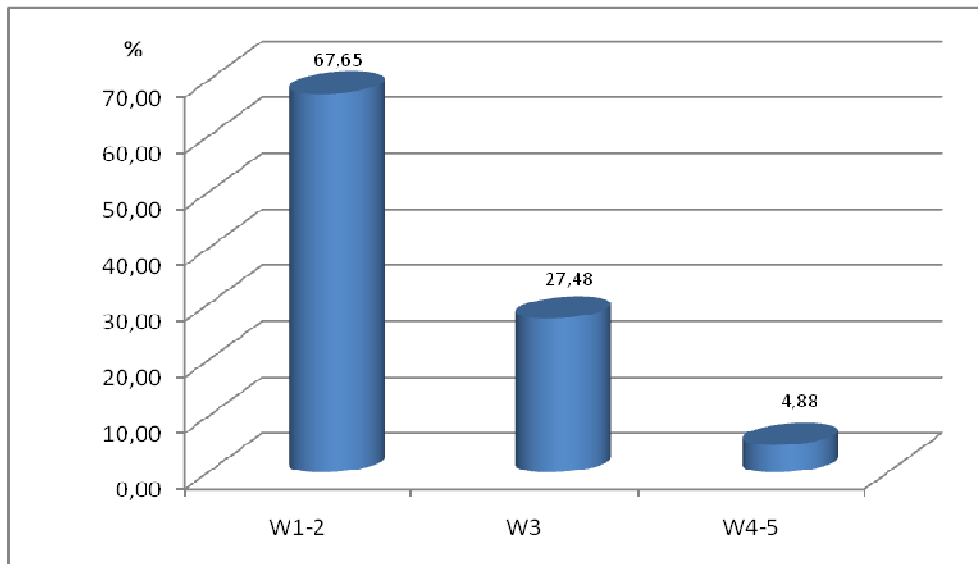


Figura 73. Grau de alteração da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

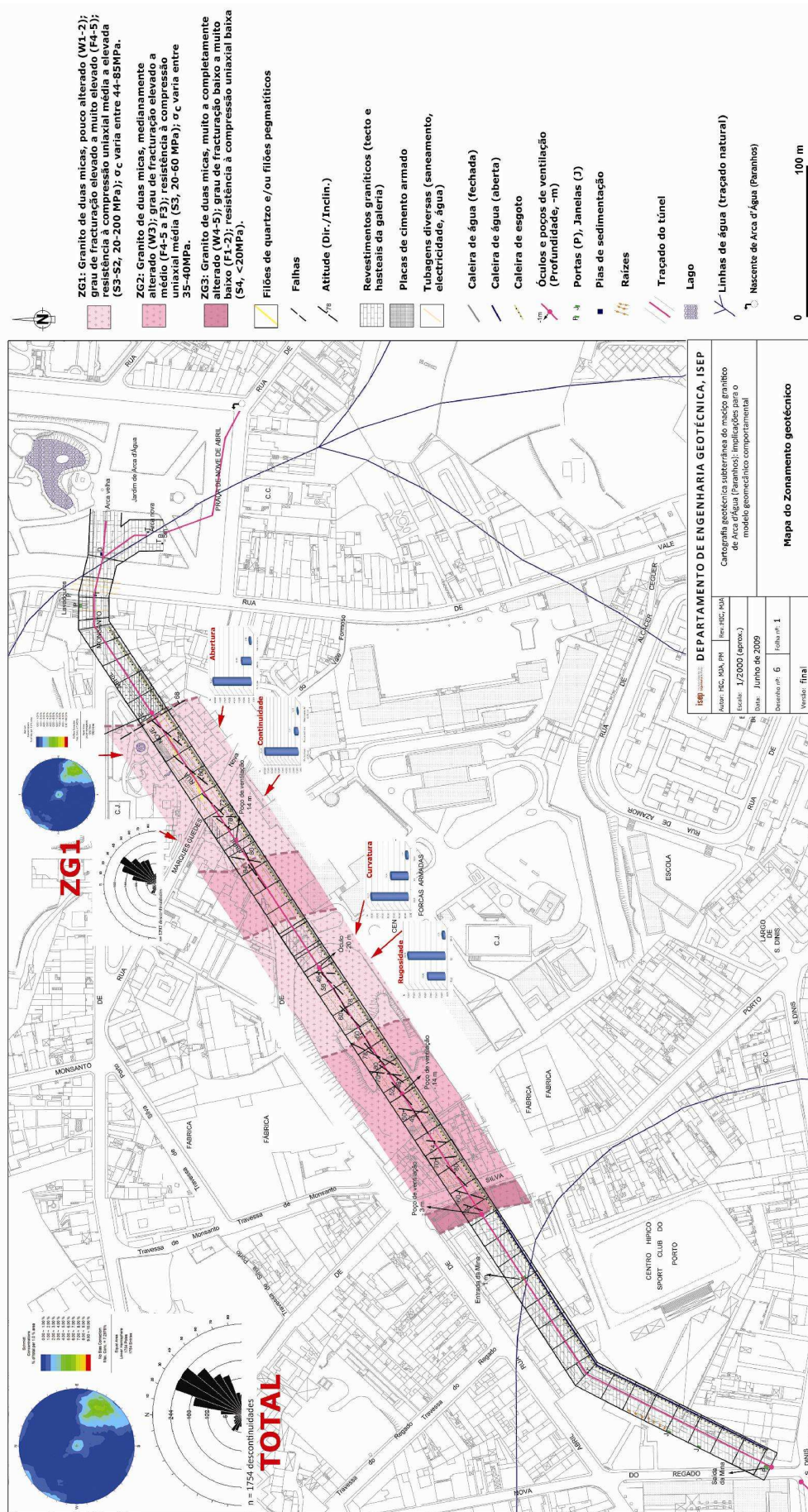


Figura 74. Zona geotécnica ZG1 do maciço do túnel “Arca d’Água – Rua Nova do Regado”.

A maioria (ca. 73%) das 1292 descontinuidades registadas corresponde a diaclases (figura 75).

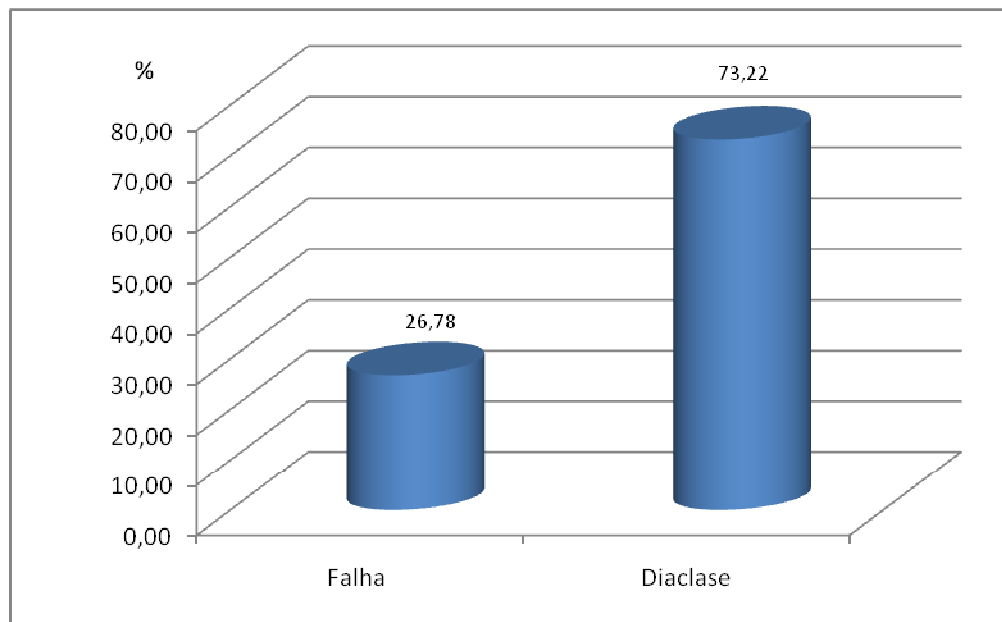


Figura 75. Tipos de descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

As famílias principais desta zona correspondem às definidas para todo o traçado do túnel, ou seja, a família N20°-40°E, destacando-se os azimutes N30°-40°E, a família N40°-50°E e a família N110°-130°E, esta última correspondente a descontinuidades sub-horizontais (figura 76).

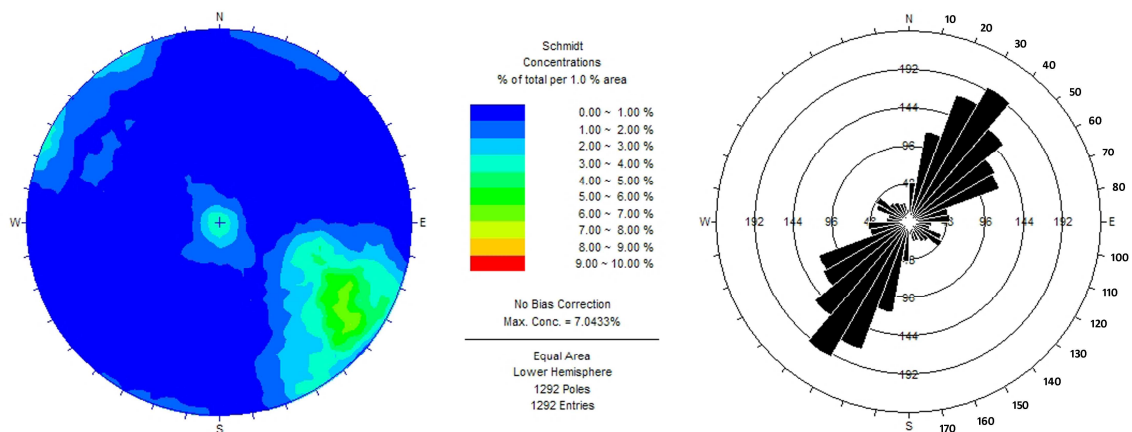


Figura 76. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=1292) da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

As discontinuidades em questão apresentam as características que seguidamente se apresentam.

Em termos de abertura, estas ocorrem na sua maioria (*ca.* 78%) fechadas, ou seja com aberturas inferiores a 0.5 mm. Contudo, cerca de 19% encontram-se abertas (figura 77).

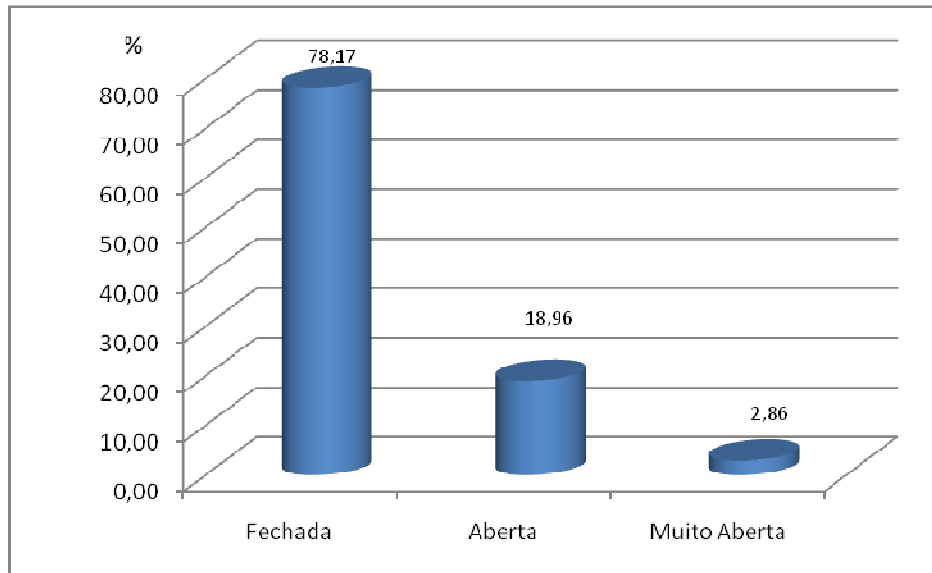


Figura 77. Abertura das discontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente ao espaçamento, este é, na maior parte dos casos (*ca.* 77%), inferior a 20cm, classificando-se como próximo (F_{4-5}). Não é, no entanto, de descurar a percentagem (*ca.* 19%) que aparece com espaçamentos F_3 , i.e., medianamente afastados (figura 78).

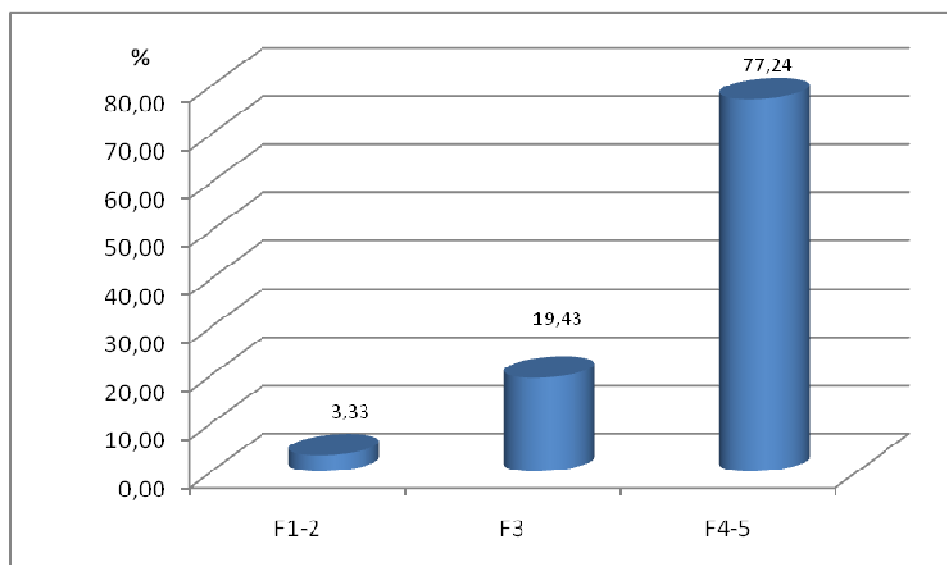


Figura 78. Espaçamento das discontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente à continuidade, as descontinuidades desta zona são, na grande maioria (ca. 91%), muito pouco contínuas, ou seja, com comprimento inferior a 1 m (figura 79).

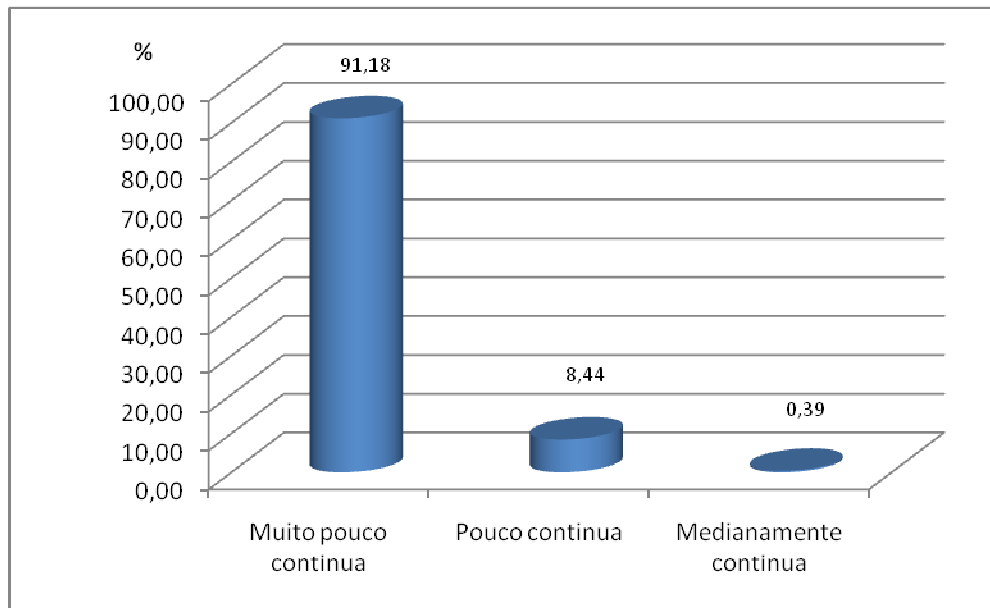


Figura 79. Continuidade das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto à terminação, esta apresenta-se muito equilibrada entre os três tipos propostos pela ISRM (1978, 1981), apresentando a terminação “em rocha” uma percentagem ligeiramente mais elevada (figura 80).

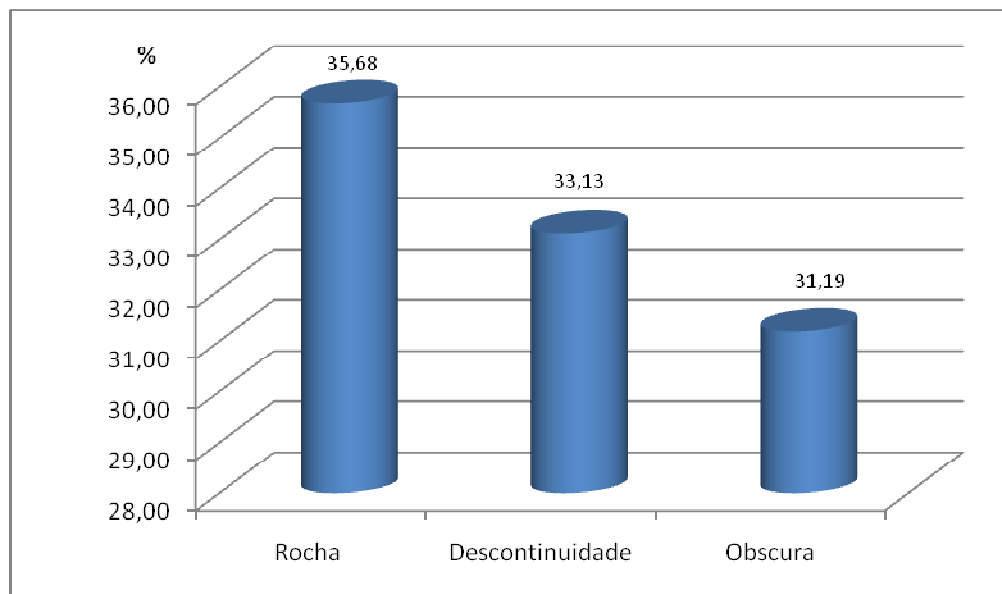


Figura 80. Terminação das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente à curvatura, esta é na sua maioria (*ca.* 66%) do tipo C₁₋₂, ou seja, corresponde a descontinuidades planas, não sendo de descurar a percentagem (*ca.* 30%) de descontinuidades algo curvas (C₃) (figura 81).

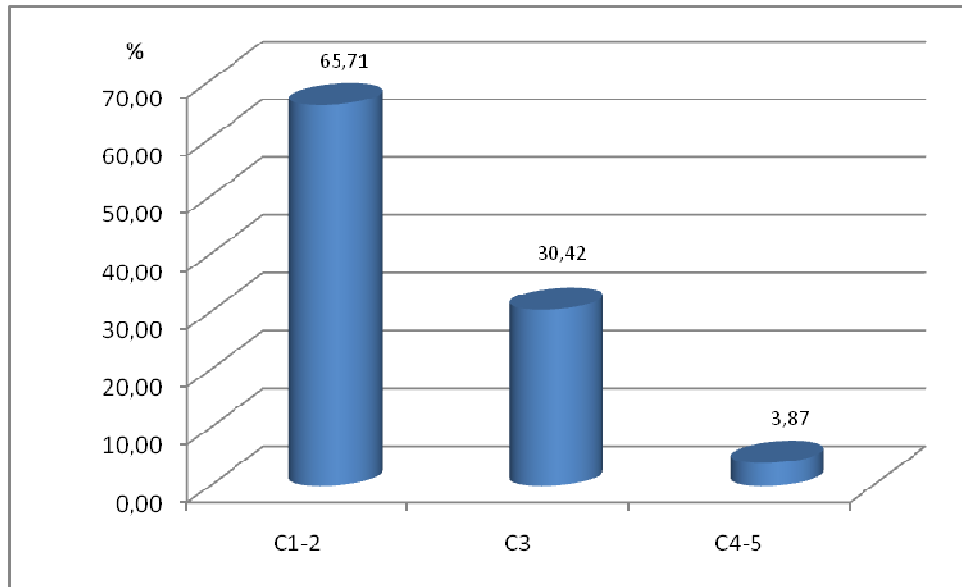


Figura 81. Curvatura das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

No que toca à rugosidade, as descontinuidades são, predominantemente (*ca.* 66%), R3, designando-se por algo rugosas, ocorrendo, ainda, descontinuidades lisas (R₁₋₂) numa percentagem significativa (*ca.* 30%) (figura 82).

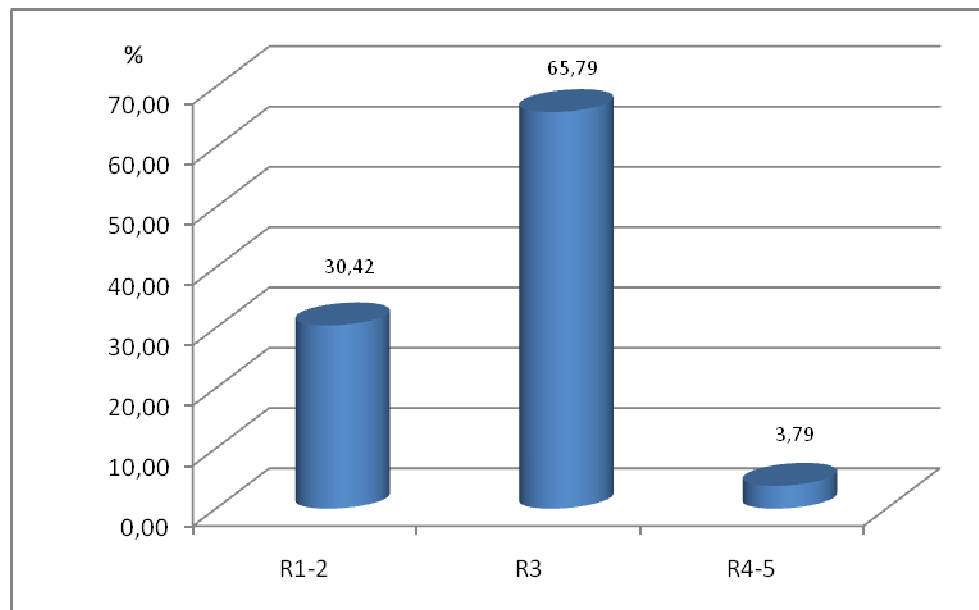


Figura 82. Rugosidade das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

A maioria (ca. 75%) das descontinuidades desta zona não apresenta enchimento, mas quando este existe é sobretudo do tipo argiloso (figura 83).

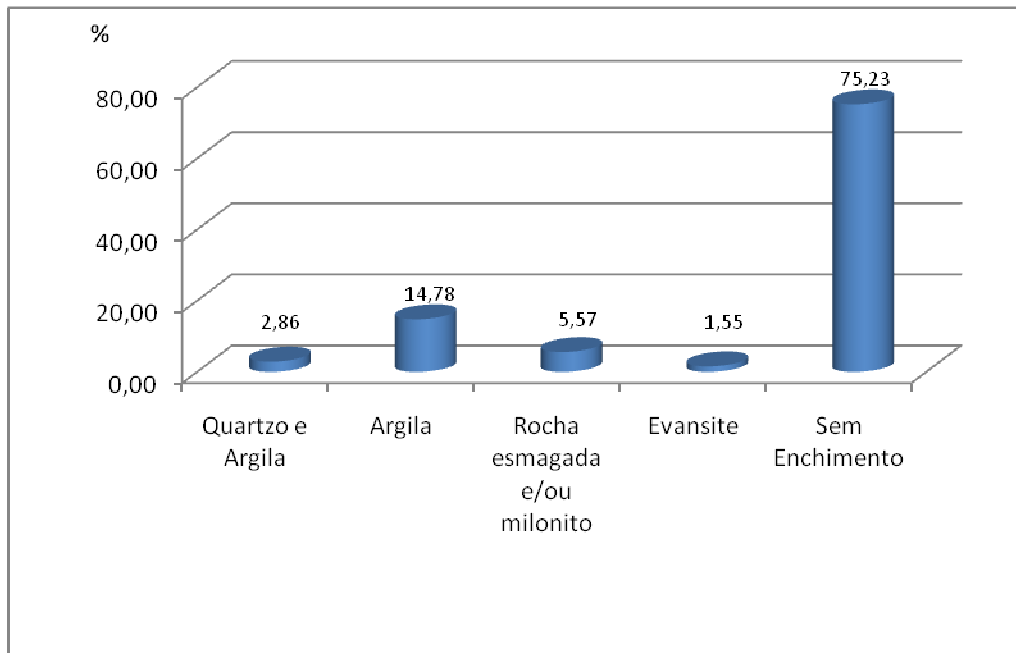


Figura 83. Enchimento das descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Em grande parte das descontinuidades ocorre a presença de água (figura 84).

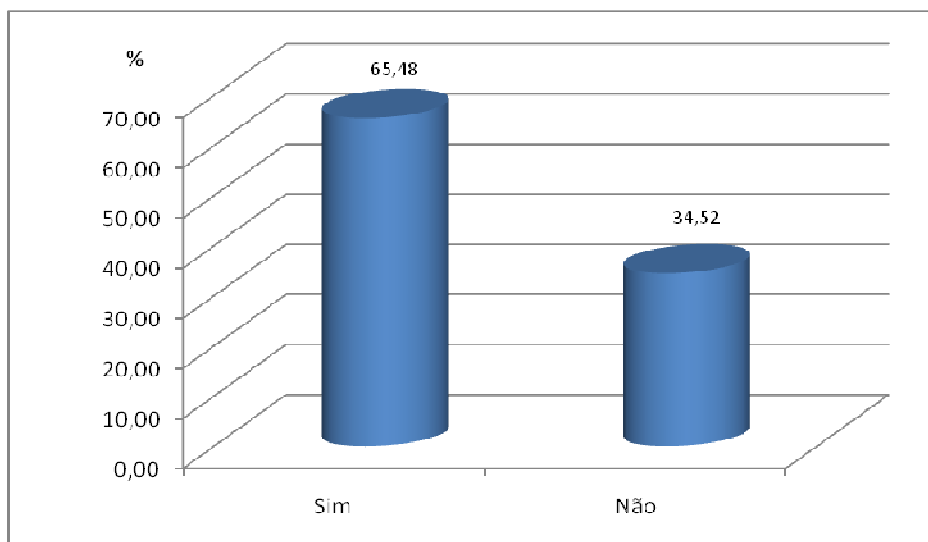


Figura 84. Presença de água nas descontinuidades da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

No que se refere à resistência à compressão uniaxial (figura 85), nas 226 estações geomecânicas representativas desta zona, as descontinuidades classificam-se, na sua maioria (ca. 59%), no tipo S_3 (i.e., resistência média), com um valor médio de 40 MPa. Não se deve, contudo, desprezar as que apresentam uma resistência elevada (S_2), correspondentes a cerca de 36%.

Relativamente aos ensaios esclerométricos realizados em laboratório, os valores de resistência são próximos aos obtidos *in situ*, classificando-se o material-rocha, na sua maioria, no tipo S_3 (figura 86).

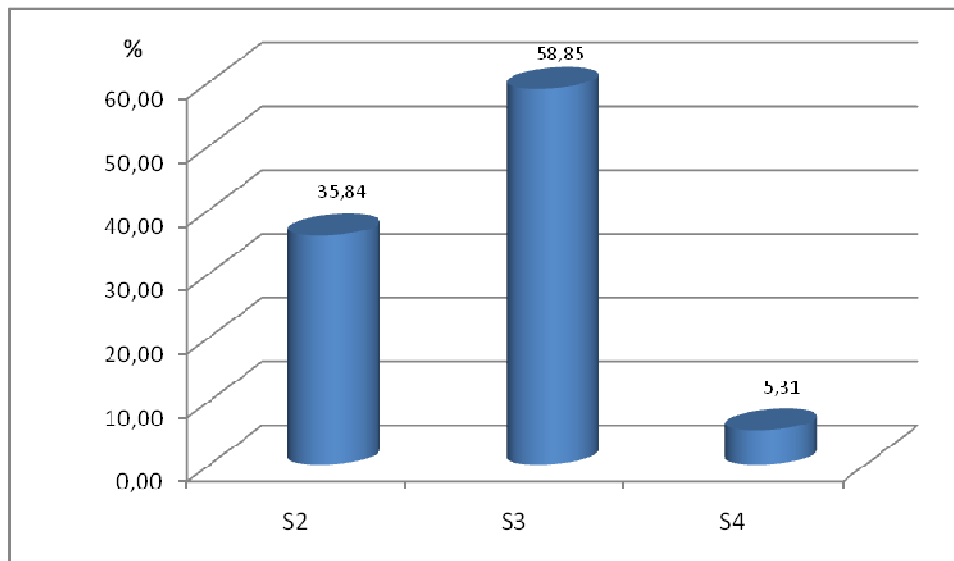


Figura 85. Resistência à compressão uniaxial da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

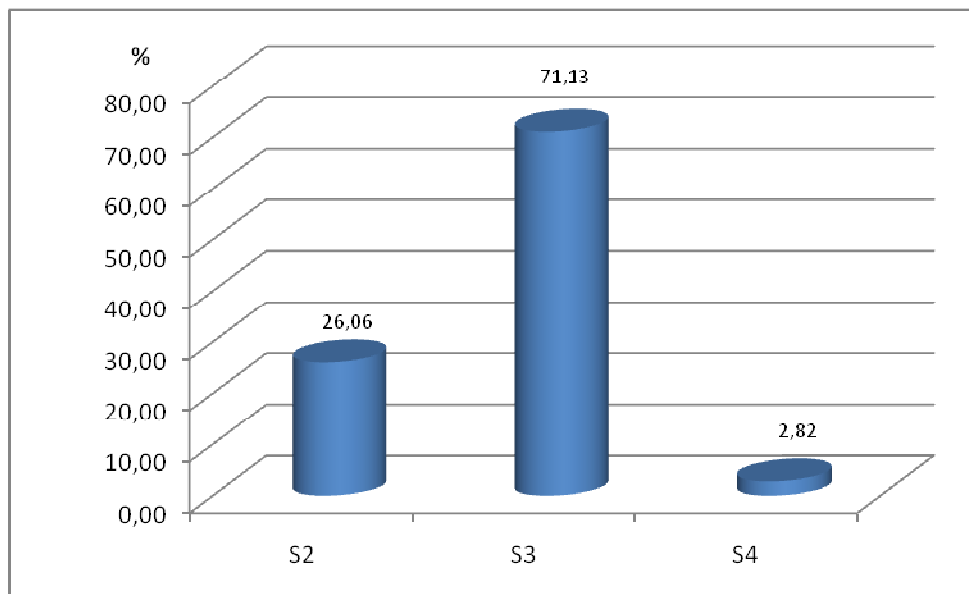


Figura 86. Resistência à compressão uniaxial realizada em laboratório, correspondente a material-rocha da zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

No que toca ao ensaio de carga pontual (PLT), os 93 provetes representativos desta zona, classificam-se, na sua maioria, no tipo S3 (resistência média). No entanto, não é desprezável a percentagem significativa (ca. 33%), incluída na classe S₂ (figura 87).

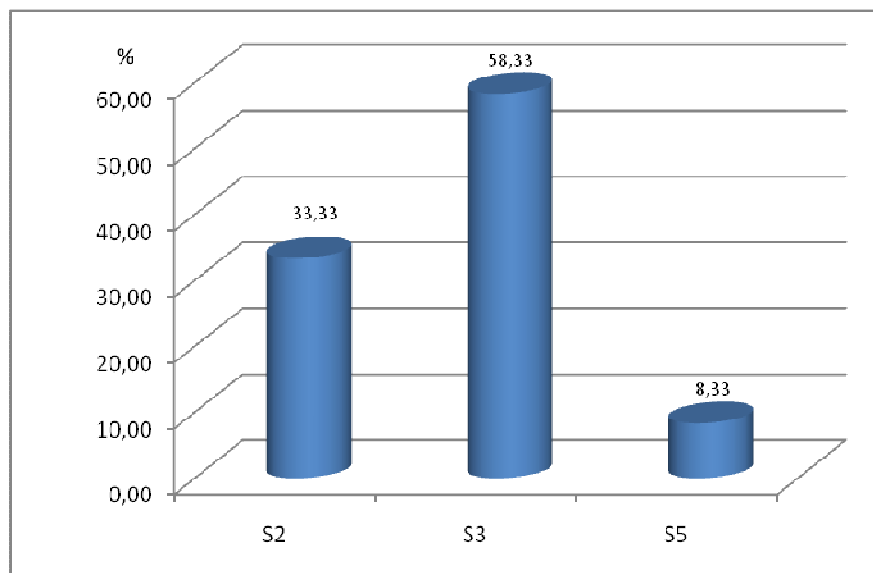


Figura 87. Resistência à compressão uniaxial (PLT) das amostras correspondentes à zona ZG1 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Por último, apresenta-se o ensaio de flexão sob carga centrada, apesar de ser pouco conclusivo, tal como se viu para a globalidade do maciço. Das 7 amostras correspondentes à zona geotécnica em análise, os valores são muito inferiores a 6 MPa (quadro 19), o que corresponde a uma resistência à flexão muito baixa de acordo com Pinto et al. (2006).

Quadro 19. Valor médio R_f (MPa) para a Zona Geotécnica 1.

Pontos de amostragem (m)	Valor médio R_f (MPa)	Valor médio de R_f (MPa) para a ZG1
0,00	0,57	1,73
29,80	5,62	
33,10	1,31	
105,40	0,88	
115,90	1,99	
191,50	1,65	
212,50	0,12	

Zona geotécnica ZG2

Esta zona tem uma extensão de 173 metros (figura 89), na qual foram registadas 441 descontinuidades e realizadas 68 estações geomecânicas.

Em termos de alteração, o maciço apresenta-se, na sua maioria (ca. 69%) medianamente alterado (W_3), como se pode verificar pela figura 88.

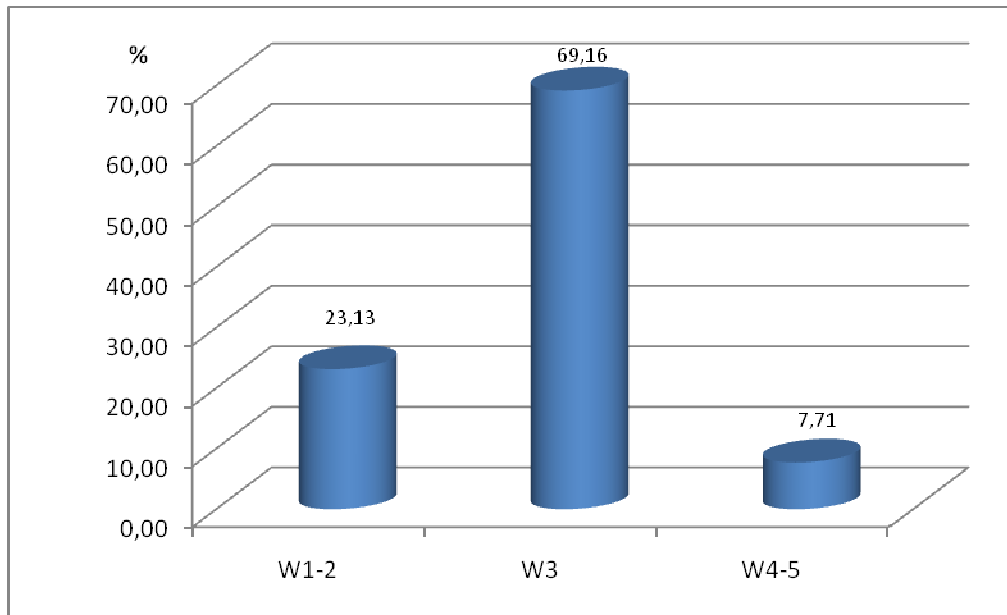


Figura 88. Grau de alteração da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Das 441 descontinuidades registadas nesta zona, a maioria (ca. 58%) são diaclases mas com uma presença significativa (ca. 42%) de falhas (figura 90).

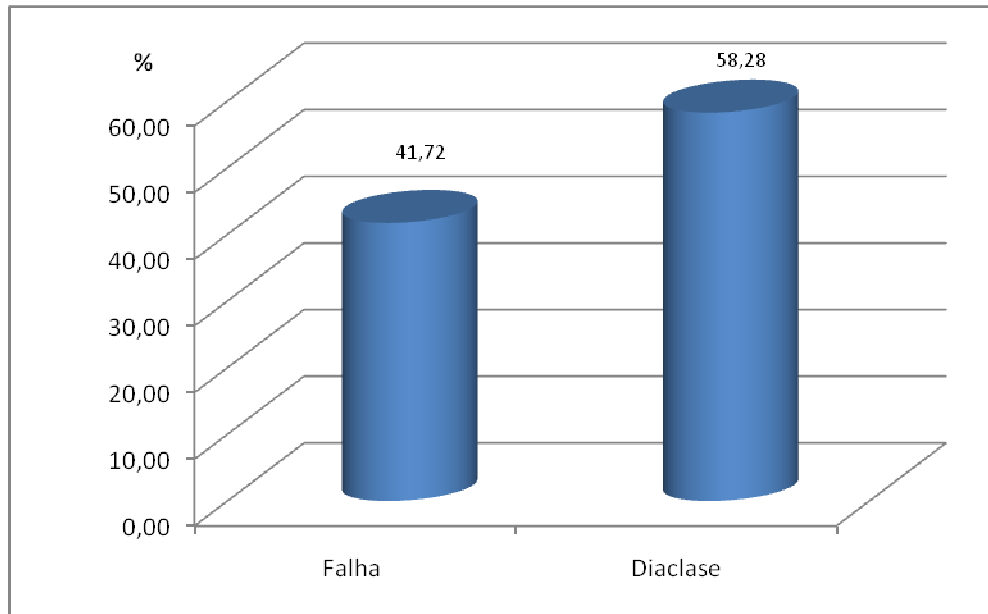


Figura 90. Tipos de descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Nesta zona, as famílias mais importantes são a N20°-40°E, destacando-se os azimutes N20°-30°E, e a família N40°-50°E, como se pode verificar nos diagramas estruturais (figura 91).

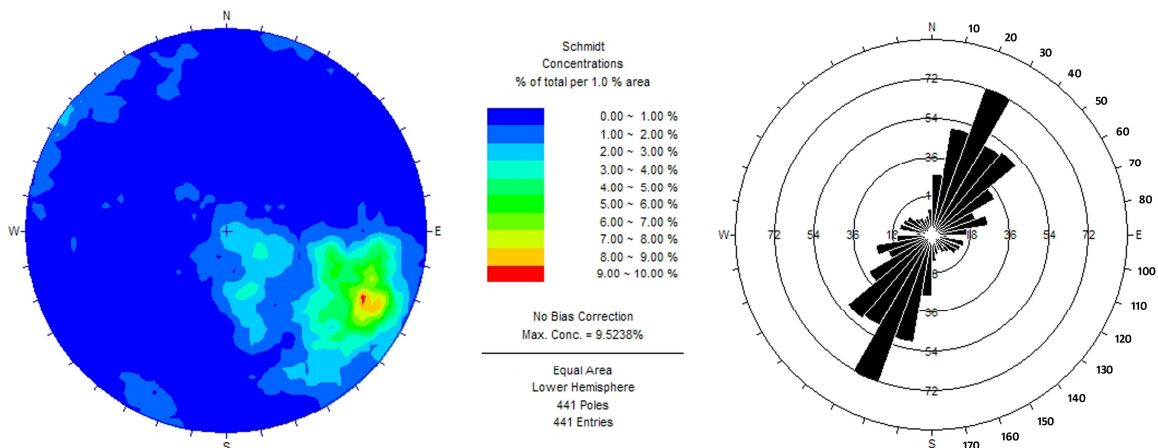


Figura 91. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=441) da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

As características das descontinuidades desta zona geotécnica são apresentadas seguidamente.

Em termos de abertura, estas ocorrem na sua maioria (ca. 76%) fechadas, *i.e.*, com aberturas inferiores a 0.5 mm (figura 92).

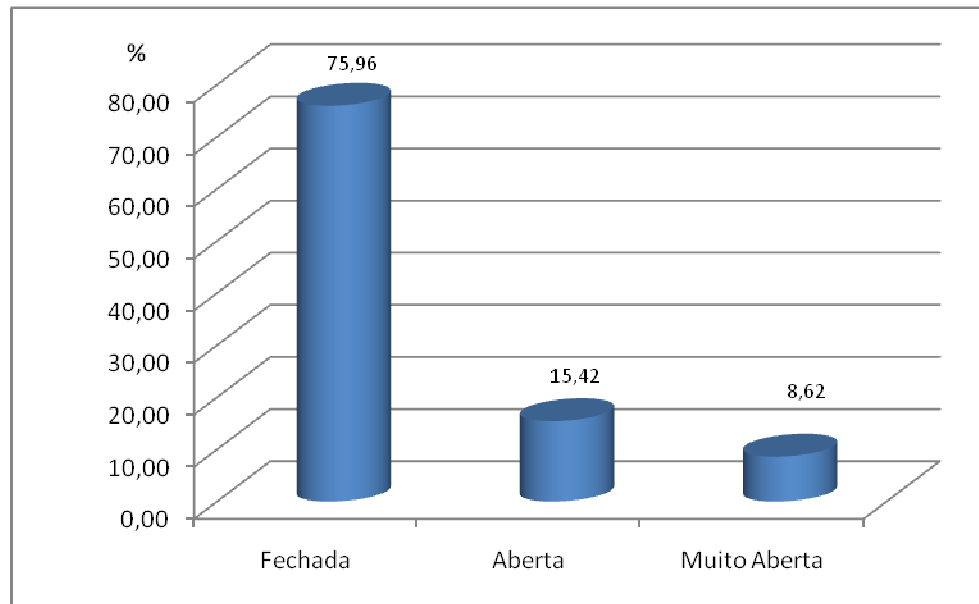


Figura 92. Abertura das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente ao espaçamento (figura 93), as descontinuidades apresentam-se mediamente afastadas (F_3) a próximas (F_{4-5}).

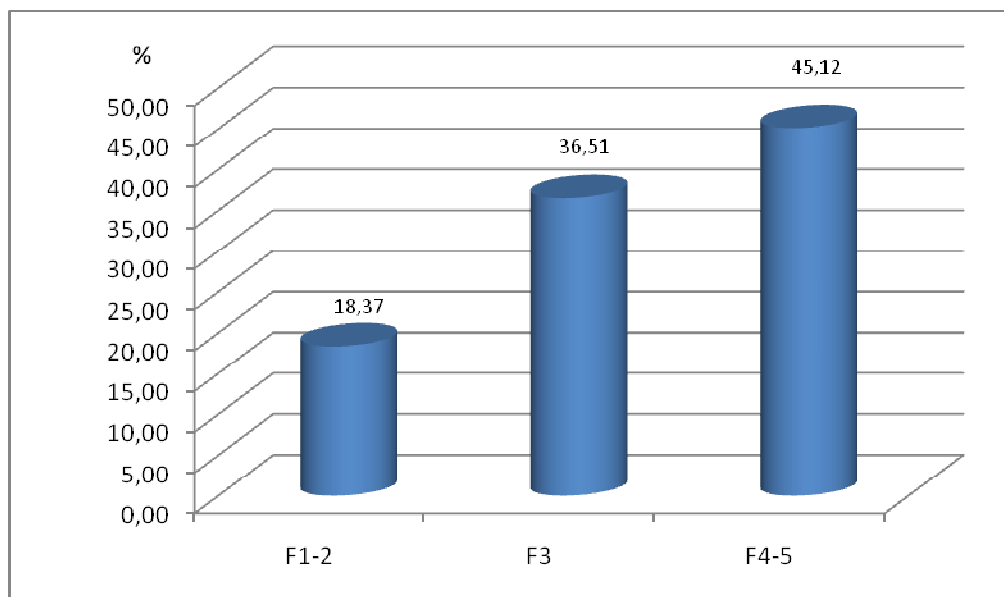


Figura 93. Espaçamento das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Em termos de continuidade, a maioria (ca. 89%) das descontinuidades são muito pouco contínuas (figura 94).

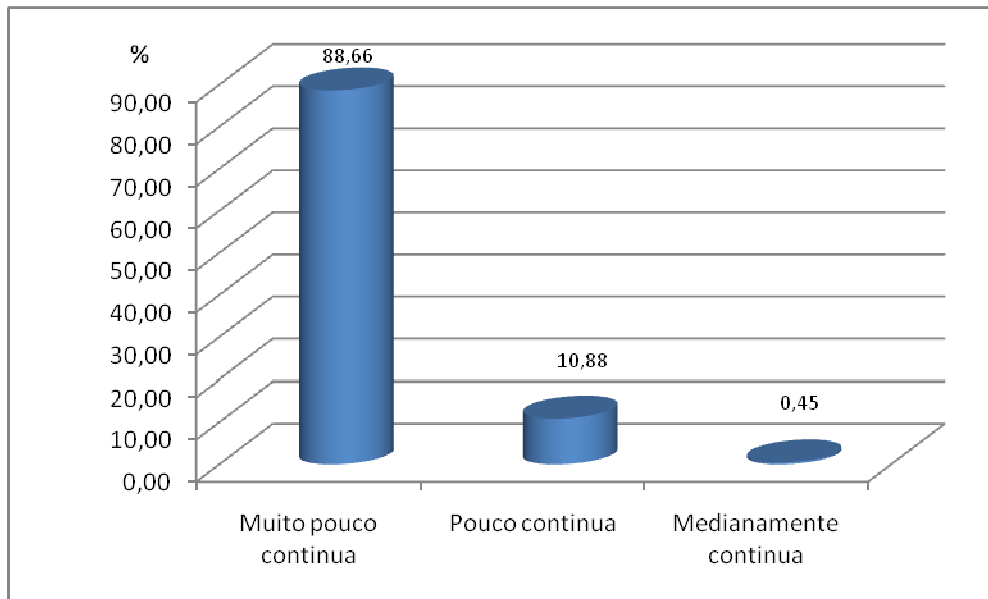


Figura 94. Continuidade das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto à terminação, apesar das percentagens serem próximas entre os três tipos, a terminação “obscura” apresenta uma percentagem ligeiramente superior às restantes (figura 95).

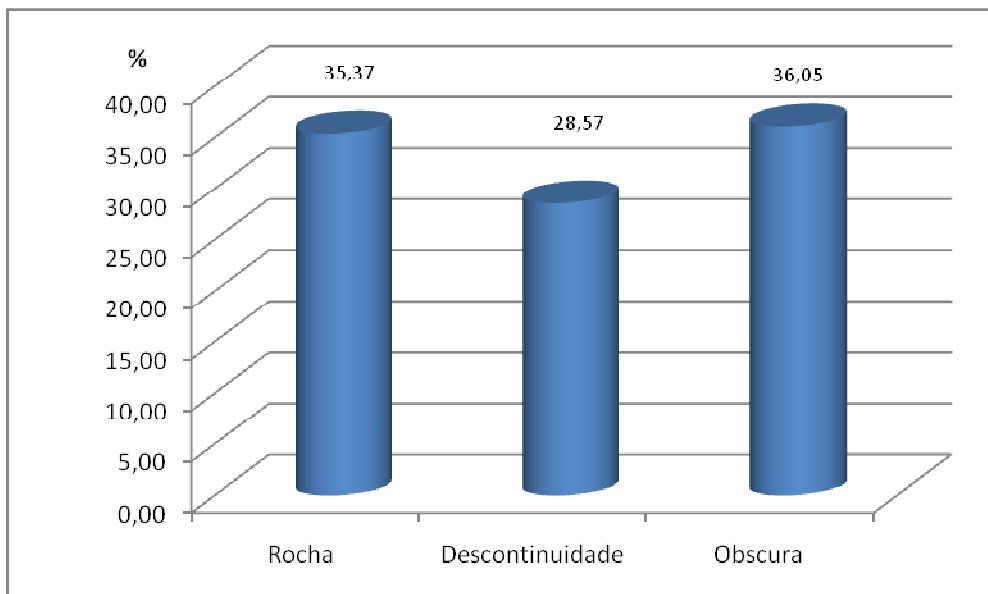


Figura 95. Terminação das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente à curvatura (figura 96), a maioria (ca. 65%) das descontinuidades são planas, i.e., do tipo C_{1-2} , no entanto as descontinuidades algo curvas (C_3) correspondem a uma percentagem significativa (ca. 32%).

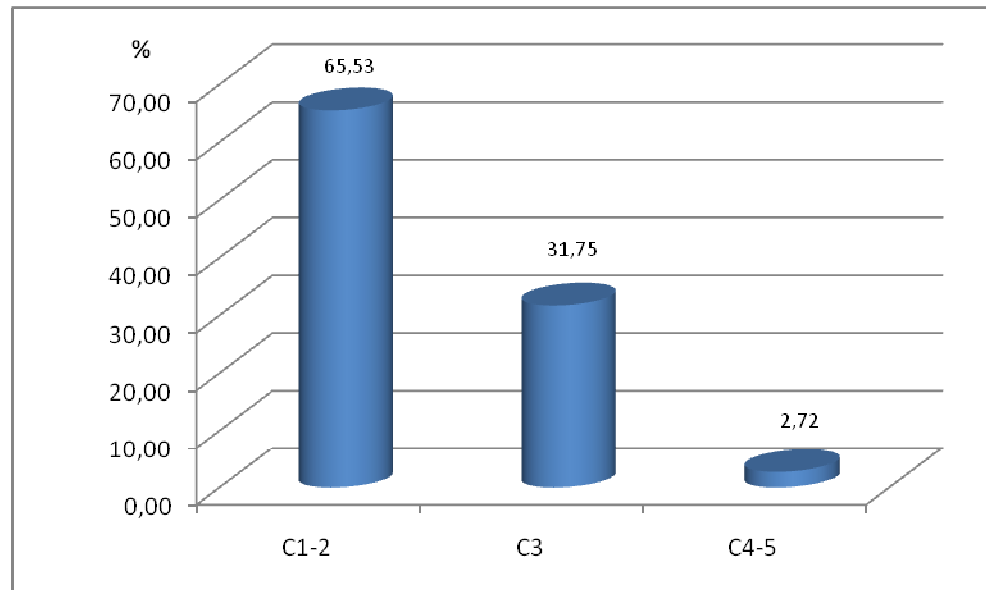


Figura 96. Curvatura das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto à rugosidade dominante (ca. 67%) esta é R_3 , designando-se as descontinuidades por algo rugosas (figura 97).

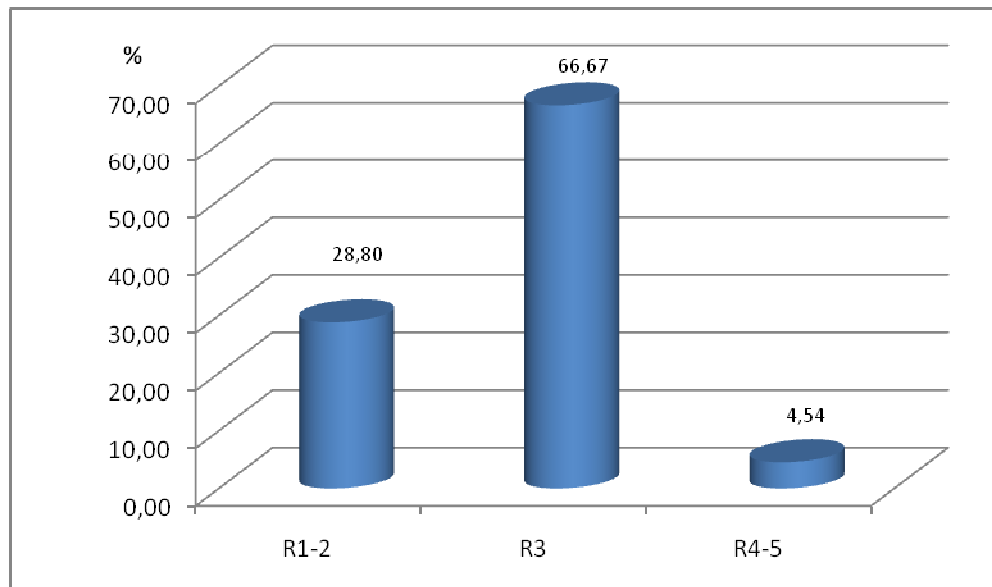


Figura 97. Rugosidade das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente ao enchimento (figura 98), uma percentagem significativa (*ca.* 48%) não tem, no entanto, as descontinuidades com preenchimento argiloso correspondem a uma percentagem expressiva (*ca.* 34%).

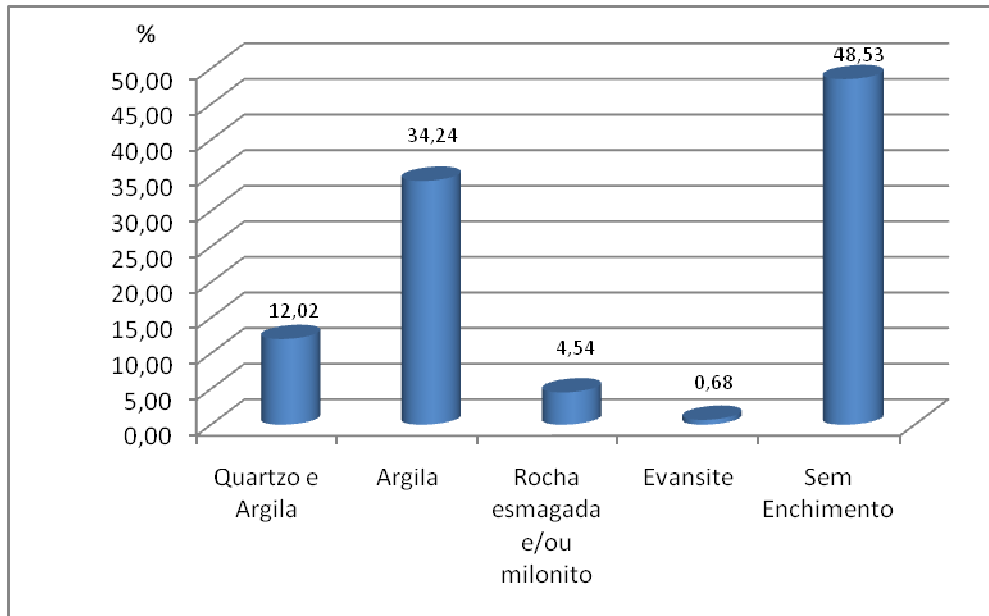


Figura 98. Enchimento das descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto à presença de água, a maior parte das descontinuidades apresenta-se seca (figura 99).

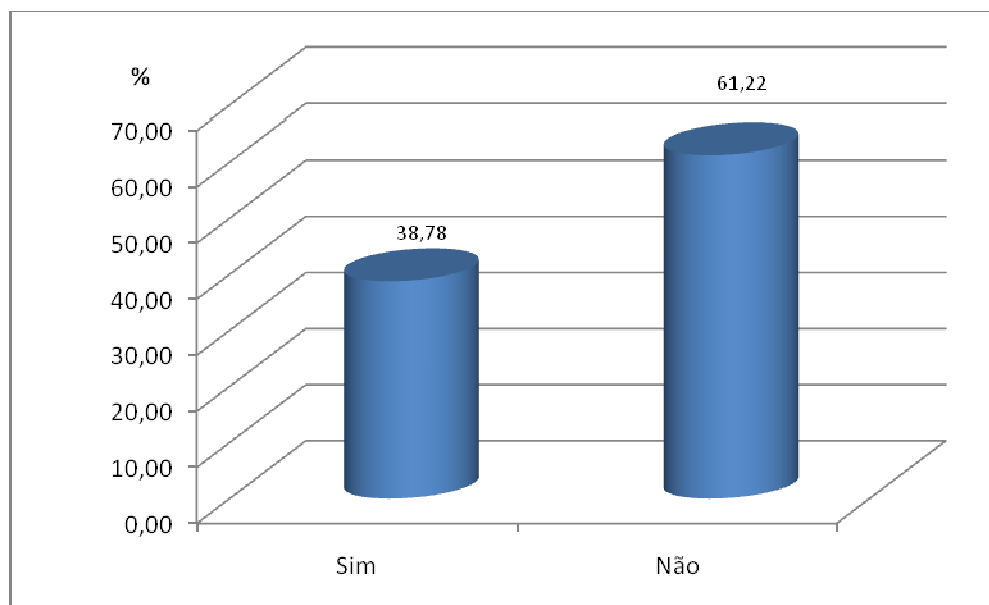


Figura 99. Presença de água nas descontinuidades da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

No que se refere à resistência à compressão uniaxial, nas 68 estações geomecânicas representativas desta zona, as descontinuidades classificam-se, maioritariamente (81%), no tipo S₃, resistência média (figura 100), correspondente a uma resistência média de 40 MPa.

O mesmo é possível verificar nos ensaios esclerométricos realizados em laboratório, para os quais, na maioria dos casos (ca. 86%), o material-rocha se classifica como sendo do tipo S₃ (figura 101).

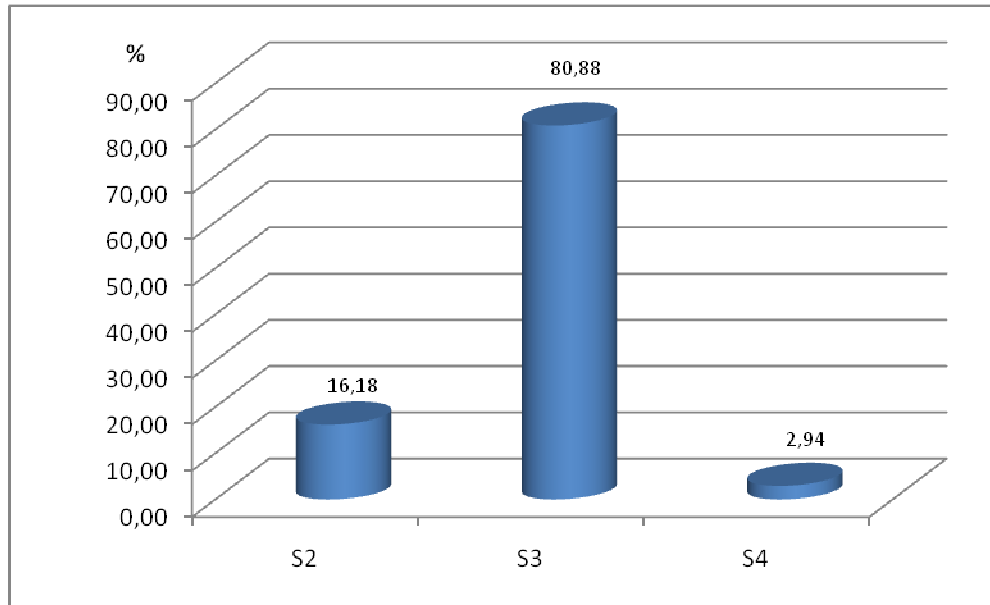


Figura 100. Resistência à compressão uniaxial da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

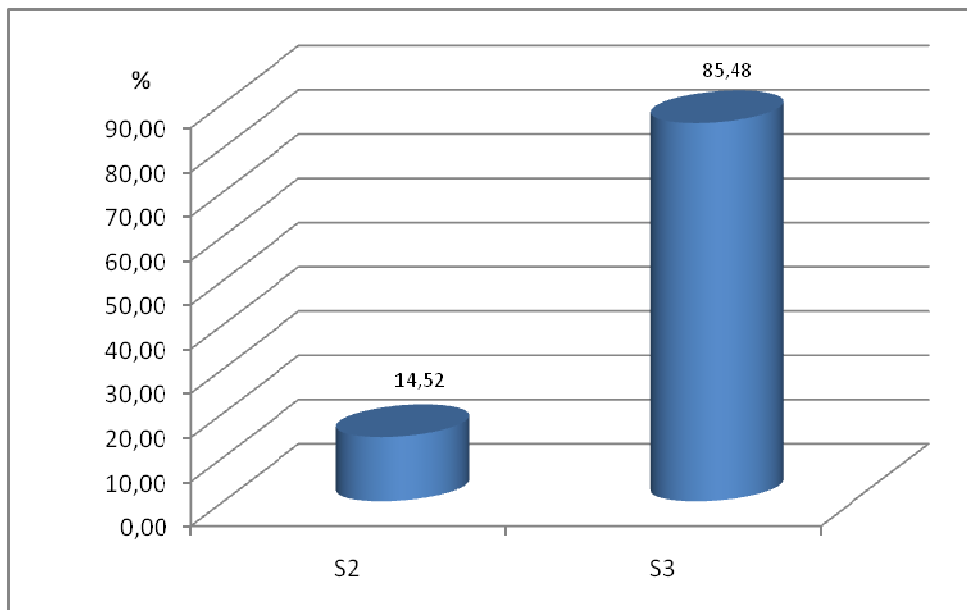


Figura 101. Resistência à compressão uniaxial realizada em laboratório, correspondente a material-rocha da zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Dos 49 provetes, representativos desta zona, ensaiados com o ensaio de carga pontual (PLT), a maioria (75%), classifica-se no tipo S3 (resistência média)(figura 102).

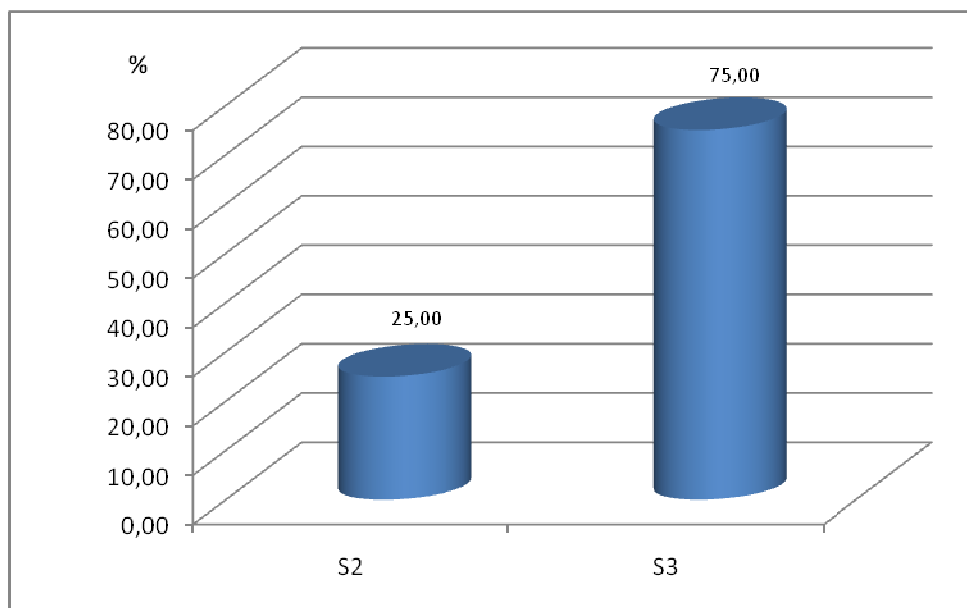


Figura 102. Resistência à compressão uniaxial (PLT) das amostras correspondentes à zona ZG2 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

No que se refere ao ensaio de resistência à flexão, esta zona apresenta uma resistência média um pouco superior à ZG1, ainda que muito inferior a 6MPa (quadro 20).

Quadro 20. Valor médio R_f (MPa) para a Zona Geotécnica 2.

Pontos de amostragem (m)	Valor médio R_f (MPa)	Valor médio de R_f (MPa) para a ZG2
130,60	1,58	2,78
289,50	3,98	

Por fim, é de salientar que foi efectuado um ponto de amostragem (-)187.5m do ponto zero da *scanline*, próximo à Arca Nova. Neste local o maciço é do tipo W_3 e, quer o ensaio esclerométrico realizado em laboratório, quer o ensaio de carga pontual conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média (S_3). Assim, pelas características obtidas, podemos enquadrar este ponto de amostragem nesta zona geotécnica.

Relativamente ao ensaio de resistência à flexão, o valor da resistência média foi de 1.58MPa.

Zona geotécnica ZG3

Esta zona tem uma extensão de 21.4 metros (figura 103), na qual foram registadas 21 descontinuidades. Esta zona é aquela em que o maciço se encontra com uma pior qualidade, encontrando-se em toda a extensão muito a completamente alterado (W_{4-5}).

Das 21 descontinuidades registadas, a maioria (ca. 67%), são falhas (figura 104).

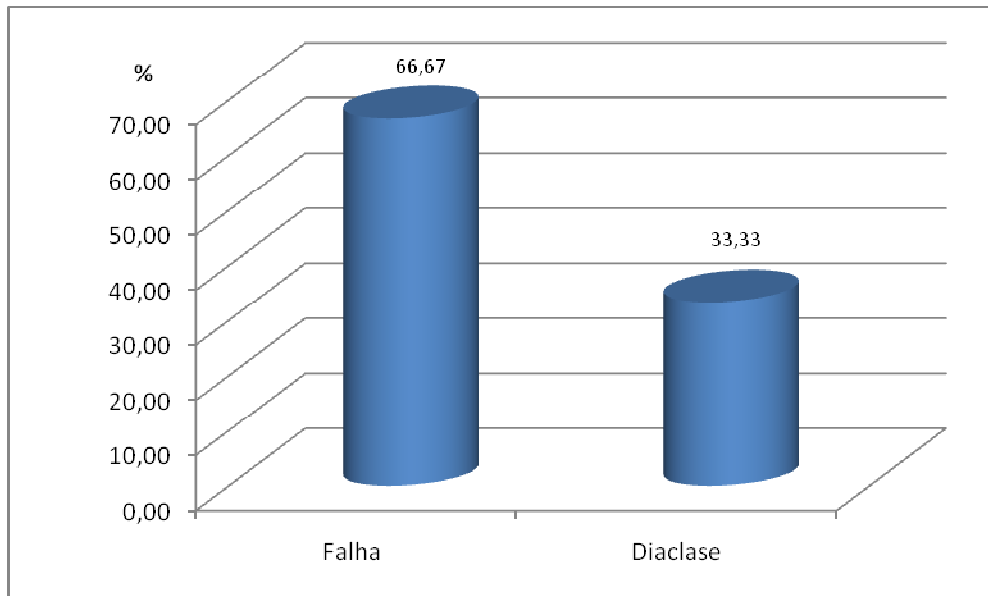


Figura 104. Tipos de descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Em termos de famílias de descontinuidades, existe uma considerável dispersão, no entanto destacam-se as orientações N10°-20°E e N120°-130°E, como se pode verificar nos diagramas estruturais da figura 105.

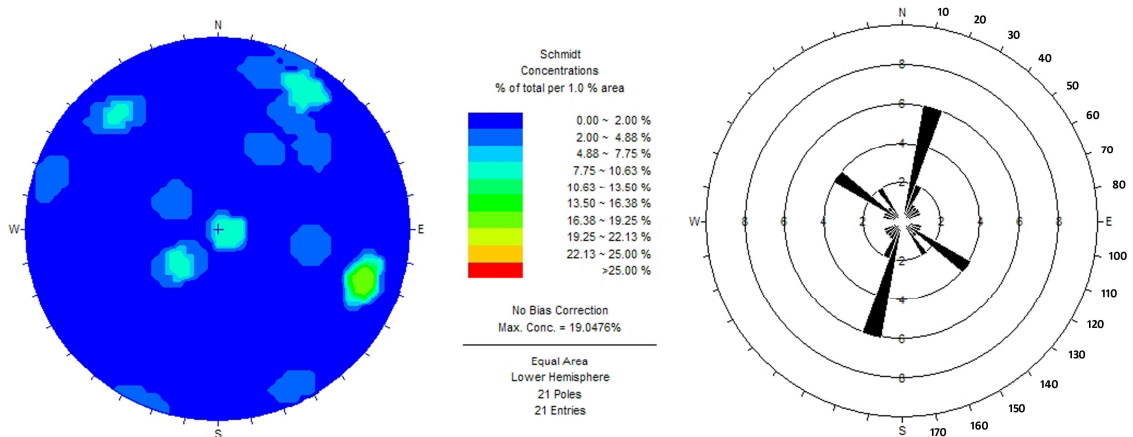


Figura 105. Diagramas de contorno estrutural e de rosetas relativos ao tratamento estatístico das descontinuidades (n=21) da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

As características das descontinuidades desta zona geotécnica são apresentadas seguidamente.

Em termos de abertura, predominam as descontinuidades fechadas, i.e., com aberturas inferiores a 0.5 mm (figura 106).

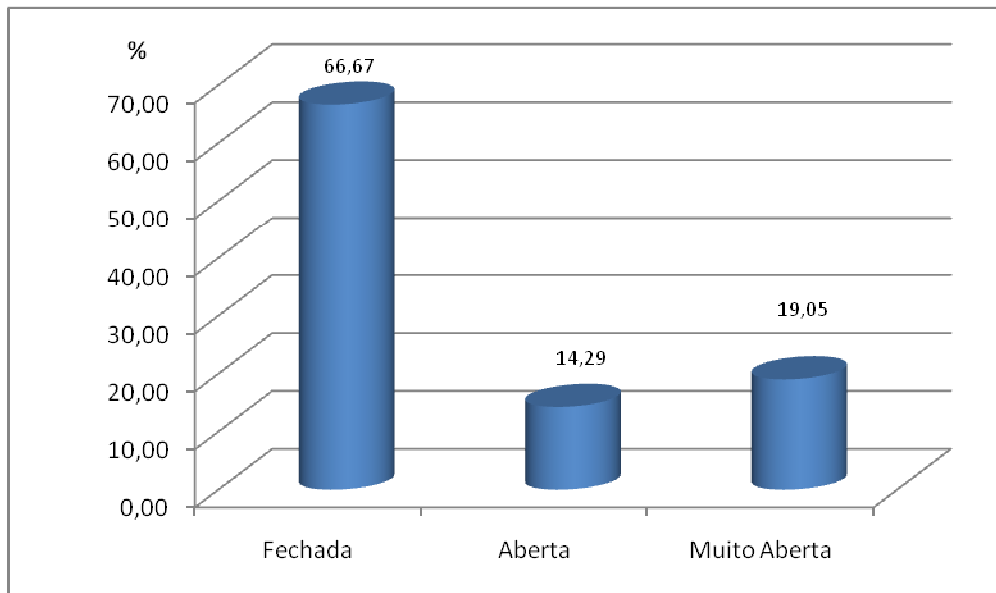


Figura 106. Abertura das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto ao espaçamento (figura 107) as descontinuidades são, predominantemente, afastadas (F_{1-2}).

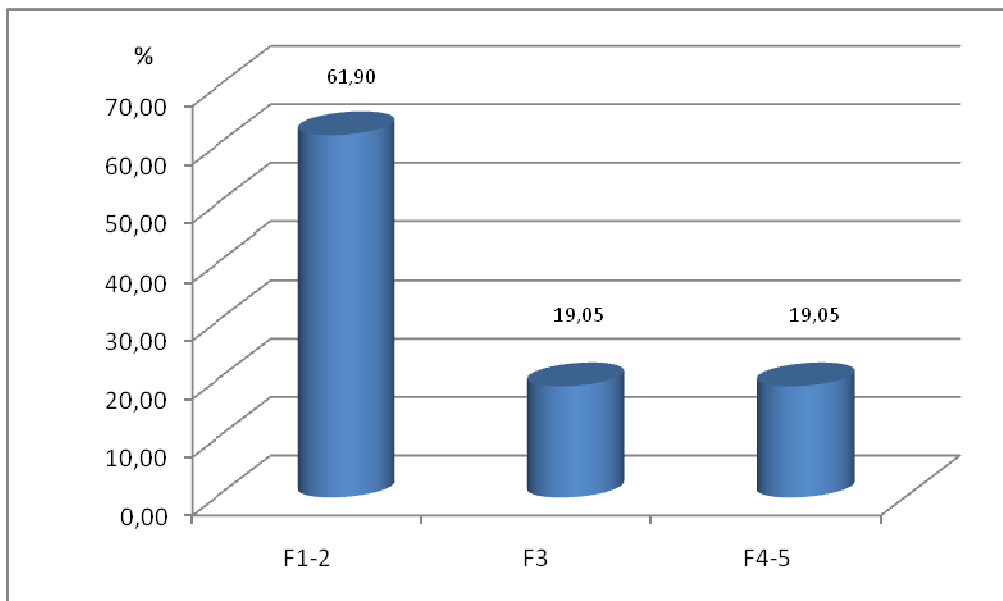


Figura 107. Espaçamento das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Em termos de continuidade, todas as descontinuidades são muito pouco contínuas, ou seja, com comprimento inferior a 1 m.

Em termos de terminação, a maioria das descontinuidades termina de forma obscura (figura 108).

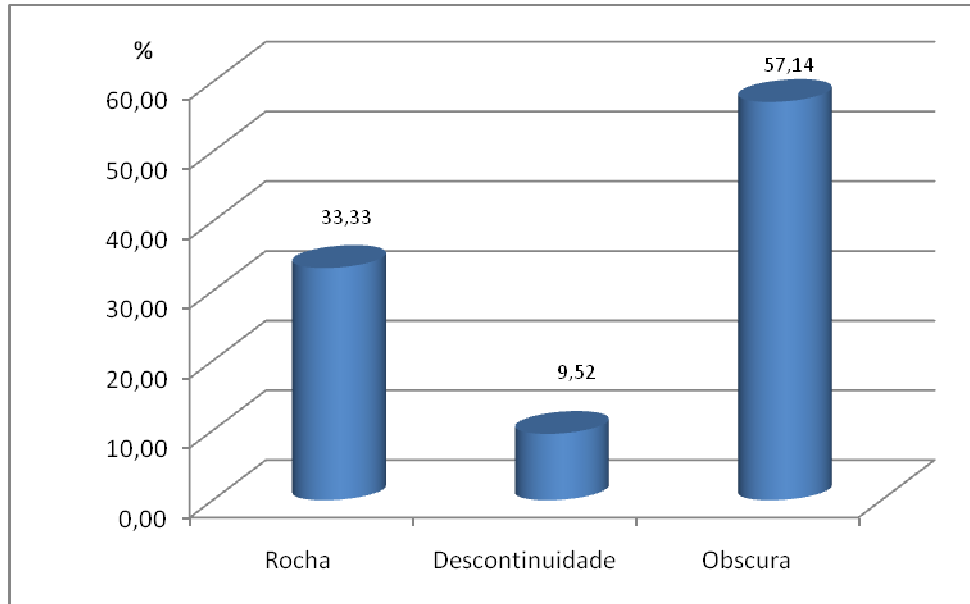


Figura 108. Terminação das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto à curvatura, são na sua maioria planas, ou seja, do tipo C_{1-2} (figura 109).

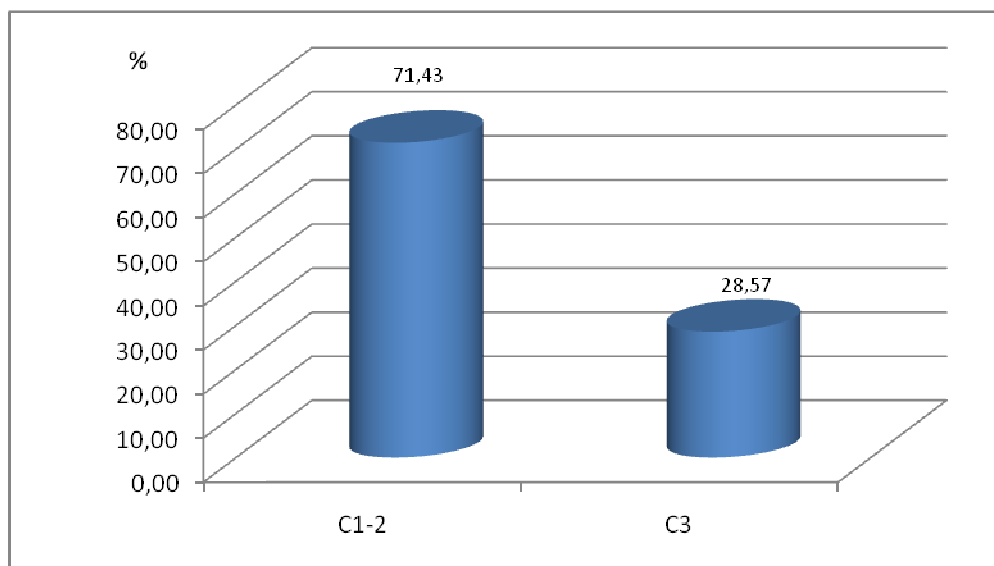


Figura 109. Curvatura das descontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Relativamente à rugosidade, todas as discontinuidades foram classificadas como algo rugosas, R_3 .

Quanto ao enchimento, a maioria das discontinuidades apresenta e este é do tipo argiloso (figura 110).

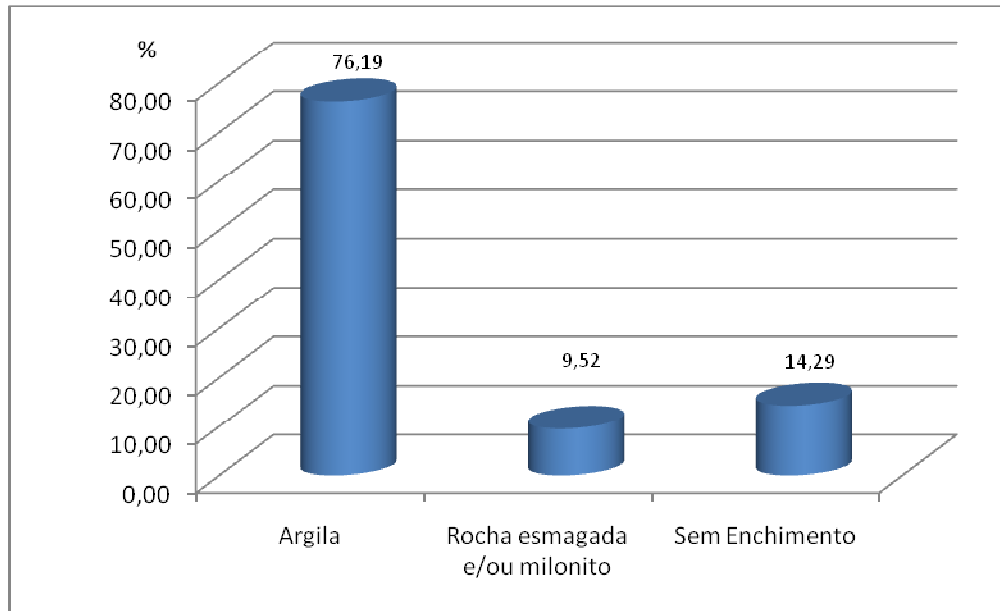


Figura 110. Enchimento das discontinuidades da zona ZG3 do maciço do túnel de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Quanto à presença de água, está-se perante um maciço totalmente seco.

Por último, no que se refere à resistência à compressão simples, e uma vez que não foi realizada nenhuma estação geomecânica, face às características descritas do maciço, dever-se-á estar perante um maciço de resistência baixa a muito baixa (S_{4-5}).

Nesta zona não foi feita qualquer recolha de amostras, pelo que não foram realizados os ensaios de carga pontual e de resistência à flexão. Todavia, a aplicação da classificação de campo do estado de resistência para o material-rocha (ISRM, 2007) permite-nos situar no intervalo R_2 a R_3 , i.e., rocha branda.

3.4. Estimativa de custos associados ao estudo

O presente trabalho enquadra-se em qualquer tipo de projecto aplicado de geoengenharia, mais concretamente de engenharia de maciços rochosos em ambiente subterrâneo.

Apresenta-se, seguidamente, uma estimativa de custos para executar o presente projecto com o estatuto de técnico júnior, enquadrado numa campanha de prospecção geotécnica, ou seja, desde a fase de reconhecimento, levantamento, cartografia, inventariação e recolha bibliográfica, até ao processamento e tratamento de dados em gabinete e, conseqüentemente, a redacção e apresentação do relatório técnico-científico ao cliente.

Este estudo recorreu a uma extensa bibliografia e a um exaustivo trabalho de gabinete, que permitiu analisar a nível da geologia fundamental e aplicada os principais elementos a tratar. Além disso, foi realizado um acurado trabalho de laboratório, com a realização do ensaio PLT e de resistência à flexão, para apoiar a caracterização do maciço rochoso. Recolhida toda a informação, procedeu-se ao processamento e análise de dados, dos quais resultaram diversos gráficos e mapas da área estudada. Por fim procedeu-se a um relatório final, onde foram compilados e redigidos todos os dados e documentação.

Como já foi referido anteriormente, a técnica de amostragem linear esteve subjacente a este estudo, uma vez que é extremamente expedita e versátil para o estudo da compartimentação de maciços rochosos e fornece valiosas informações sobre o estado da fracturação do material-rocha. Esta prática é frequentemente citada e aplicada em trabalhos de especialidade no estudo de obras superficiais e/ou subterrâneas em maciços fracturados, não exigindo equipamentos muito sofisticados, mas apenas de: fita métrica, bússola com clinómetro incorporado (“bússola de Geólogo”), martelo de Geólogo, máquina fotográfica e esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt). Sendo assim, é um método muito acessível em termos económicos. Por outro lado, no que respeita aos ensaios laboratoriais, está-se igualmente perante trabalhos com custos acessíveis.

O tratamento e análise estatística dos resultados obtidos foi feito recorrendo-se a uma análise estatística elementar e ao programa geo-informático *Dips vs. 5.1* da *Rocscience*®.

Desta forma e atendendo às recomendações, quer da *Ordem dos Engenheiros*, quer da *Associação Portuguesa de Geólogos* pode ser apontado o orçamento base de 11.480 Euros (€), sem IVA incluído, e com prazo de execução de 6 meses. Este valor inclui os custos orçamentados para a execução do trabalho e os custos para a aquisição de equipamento geocientífico e informático diverso (Quadro 21).

Quadro 21. As fases constituintes do trabalho e respectivos custos (s/ IVA, €) associados ao Projecto.

		Meses						Custos (€)
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	
T r a b a l h o s e f e c t u a d o s	1. Recolha bibliográfica (geotectónica, geotecnia e geomecânica de maciços rochosos).	●	●					180
	2. Recolha bibliográfica específica sobre a rede de túneis da cidade do Porto.		●					180
	3. Síntese cartográfica da informação disponibilizada (geológica e geotécnica).		●					150
	4. Aplicação da Técnica de Amostragem Linear.			●				1600
	5. Amostragem de material-rocha e ensaios geomecânicos <i>in situ</i> (Esclerómetro portátil).				●			2600
	6. Ensaios laboratoriais (PLT, Flexão e Esclerómetro portátil): tratamento laboratorial e representação dos dados.					●		3000
	7. Estudo da compartimentação do maciço rochoso. Processamento e tratamento estatístico.				●	●		120
	8. Cartografia geotécnica do traçado subterrâneo do túnel "Arca d'Água - Rua Nova do Regado". Zonamento geotécnico do maciço.					●		350
	9. Elaboração de um modelo geológico-geotécnico e geomecânico comportamental.					●	●	1500
	10. Síntese final e redacção do projecto.						●	1800
Total								11480

4. Conclusões

4. Conclusões

Neste trabalho, apresentam-se e discutem-se os principais resultados da aplicação e importância de uma base de dados extensa, uniformizada e robusta para apoiar o refinamento da caracterização geológico – geotécnica e geomecânica do maciço granítico de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (Paranhos, Porto).

Este estudo envolveu, inicialmente, a compilação dos levantamentos geológico-geotécnicos e geomecânicos sistemáticos, recorrendo à aplicação da técnica de amostragem linear em superfícies expostas de descontinuidades em maciços rochosos, realizados no período 2005-2008, ao longo de cerca de 400m do traçado do túnel “Arca d'Água – Rua Nova do Regado”. Além disso, foram executados em laboratório os ensaios de carga pontual (PLT), de resistência à flexão sob carga centrada e esclerométricos.

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

- O aperfeiçoamento do conhecimento das unidades geológicas locais: i) granito de duas micas, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado tectonicamente e ii) filões e/ou filonetes de quartzo leitoso, com possanças que não ultrapassam os 30cm que se encontram, em regra, muito tectonizados. A análise dos dados do grau de alteração permite constatar que o material-rocha ocorre são a pouco alterado (W_{1-2}) a medianamente alterado (W_3); contudo, em alguns locais do traçado subterrâneo o granitóide encontra-se muito a completamente alterado (W_{4-5}) e, mesmo, caulinizado;
- O reconhecimento de uma rede de fracturação intensa, com uma atitude geral $N20^\circ-40^\circ E/70^\circ-85^\circ NW$, e a ocorrência de falhas geológicas, com uma orientação média NE-SW e N-S;
- A revisão da cartografia geotécnica dos subterrâneos do Porto (maciço de Arca d'Água – Rua Nova do Regado, Paranhos, Porto);
- O refinamento do zonamento geotécnico, estabelecido em Moreira (2008), o qual pretende delinear a qualidade geotécnica do maciço, no qual se redefiniram as principais unidades geotécnicas locais, resultado do cruzamento e síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica;
- O zonamento foi sistematizado nas seguintes unidades: i) ZG1 – granito de duas micas, são a pouco alterado (W_{1-2}), com grau de fracturação elevado a muito elevado (F_{4-5} , $\approx 7\text{cm}$) e resistência à compressão uniaxial média a elevada (S_3-S_2 , $\approx 44-85\text{MPa}$); ii) ZG2 – granito de duas micas medianamente alterado (W_3), com grau de fracturação

elevado a médio a (F_{4-5} , ≈ 7 cm, a F_3 , ≈ 32 cm) e resistência à compressão uniaxial média (S_3 , ≈ 37 MPa); iii) ZG3 – granito de duas micas muito a completamente alterado (W_{4-5}), com grau de fracturação baixo a muito baixo (F_{1-2} , ≈ 131 cm) e resistência à compressão uniaxial baixa (S_4 , < 20 MPa).

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

- A continuação e o refinamento da cartografia geotécnica e estudo da compartimentação do maciço rochoso, especialmente do restante traçado correspondente ao manancial de Paranhos e ao manancial de Salgueiros;
- O cruzamento integrado da cartografia geotécnica de superfície, numa base SIG, da 2ª edição (2003) da Carta Geotécnica do Porto (à escala 1/10.000) com novos desenvolvimentos deste trabalho, à escala 1/1.000, quer em termos geológicos quer em termos geotécnicos e geomecânicos;
- O desenvolvimento de uma análise estatística dos dados mais robusta;
- A aplicação das classificações geomecânicas (nomeadamente, a RMR adaptada a galerias mineiras, a Q e a GSI), com o objectivo de avaliar a qualidade e competência geomecânica do maciço rochoso de Paranhos;
- A modelação geomecânica das galerias do maciço de Paranhos, com o intuito de verificar a estabilidade estrutural e a segurança, assim como para proceder ao dimensionamento estrutural de elementos de reforço, recorrendo a programas de cálculo automático específicos (*e.g.*, Phase² 2.7 da *RocScience: software tools for rock and soil*);
- A definição de cenários de susceptibilidade e de vulnerabilidade aos riscos geológicos e geotécnicos materializados por mapas temáticos de avaliação de perigosidade.

5. Referências Bibliográficas

5. Referências Bibliográficas

- Afonso, M. J. (in prep.), Hidrogeologia e hidrogeoquímica urbana da área metropolitana do Porto (NW de Portugal): implicações ambientais. Instituto Superior Técnico, Tese de Doutoramento (em preparação).
- Afonso, M. J.; Chaminé, H. I.; Gomes, A.; Teixeira, J.; Araújo, M. A.; Fonseca, P. E.; Carvalho, J. M.; Marques, J. M.; Marques da Silva, M. A. & Rocha, F. T., 2004. Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente*, Santiago de Compostela, 4: 101-115.
- Afonso, M. J.; Chaminé, H. I.; Gomes, A.; Fonseca, P. E.; Carvalho, J. M.; Marques, J. M.; Guimarães, L.; Guilhermino, L.; Teixeira, J.; Martins Carvalho, J. & Rocha, F. T., 2006. Urban hydrogeomorphology and geology of the Porto Metropolitan Área (NW Portugal), Pre-congress Proceedings, the 10 th IAEG Internation Congress – Engineering geology for tomorrow's cities. Nottingham, U.K. The Geological Society of London, 1-9pp. (CD-Rom).
- Aires-Barros, L., 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, INIC, Lisboa, 384 pp.
- Almeida, A., 2001. Caracterização geoquímica e geocronológica do granito de duas micas sintectónico do Porto (NW de Portugal) [Geochemical and geochronologic characterization of Porto syntectonic two-micas granite (NW Portugal)]. In: Lago M, Arranz E, Galé C (eds) Proceedings IIIer Congreso Ibérico de Geoquímica/VIII Congreso de Geoquímica de España. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, pp 311-315.
- Amorim, A. A. & Pinto, J. N., 2001. Porto d'agoa. Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento do Porto, SMAS, Porto, 197 pp.
- Araújo, M. A., 1991. Evolução geomorfológica da Plataforma litoral da região do Porto. Universidade do Porto, 534 pp. + vol. Anexos [87 pp.] (Tese de doutoramento).
- Araújo, M. A.; Gomes, A. A.; Chaminé, H. I.; Fonseca, P. E.; Gama Pereira, L. C. & Pinto de Jesus, A., 2003. Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto-Espinho, (NW de Portugal): implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozóica. *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 28: 79-105.
- ASTM – American Society for Testing and Materials, 2001. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer, Designation D5873-00. ASTM Standards on disc: 04-08.
- Aydin A., 2008. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.
- Aydin, A. & Basu, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 41: 1211-14.
- Babendererde, S.; Hoek, E.; Marinos, P. & Cardoso, A.S., 2004. Characterization of granite and the underground construction in metro do Porto, Portugal, In: Viana da Fonseca A Mayne PW (eds.): Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Millpress, Rotterdam, 1: 39-48.
- Begonha, A. & Sequeira Braga, M.A., 1995. A meteorização do granito do porto, In: F.S. Borges & M. Marques (eds.), Resumos alargados do IV Congresso Nacional de Geologia. Memórias Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Univ., Porto 4: 171-175.
- Begonha, A., 2001. Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto. Coleção monografias FEUP Edições, Porto, 2: 1-445. (Tese de doutoramento).
- Begonha, A. & Sequeira Braga, M. A., 2002. Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena*, 49: 57-76
- Bieniawski, Z. T., 1975. The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, pp. 1-11.
- Bourbon e Noronha, T., 1885. As águas do Porto. Dissertação inaugural apresentada à escola Médico-Cirúrgica do Porto, Typ. Occidental, Porto. 89 pp.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 2004. Rock mechanics for underground mining, 3rd Edition, George Allen & Unwin, London. 527 pp.

- Broch E. & Franklin J. A., 1972. The point load strength test. *Journal Rock Mech. Min. Sci*, 9: 669-697.
- Cabral, J., 1995. Neotectónica em Portugal Continental Mem. Inst. Geol. Min., Lisboa, 31: 1-256.
- Cargill, J. S. & Shakoor, A., 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 53: 97-103.
- Carvalho, J.M., 1996. Mineral water exploration and exploitation at the portuguese hercynian massif. *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- Carvalho, J.M., 2000. As águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no Norte de Portugal, In: Samper, J. et al., (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre "Las águas subterrâneas en el Noroeste de la Península Ibérica"*. Textos de las jornadas, mesa redonda y comunicaciones. A Coruña, AIH-GE & APRH, Publicaciones ITGE, Madrid, pp. 237-259.
- Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I. & Plasencia, N., 2003. Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional, In: Portugal Ferreira, M. (coord.). *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: Recursos Geológicos e formação. Volume de homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva*. Imprensa da Universidade, Série Investigação, Coimbra, 2: 245-264.
- Carvalho, J.M. & Chaminé, H.I., 2004. O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Ver. Uni. Aveiro*, 16: 13-31.
- 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.
- Chaminé, H. I., 2000. Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho –Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. Universidade do Porto, 497 pp., 2 anexos, 3 mapas. (Tese de doutoramento).
- Chaminé, H. I.; Dias, A. G. & Dinis da Gama, C., 2001. Estudo geológico e geomecânico do maciço granítico de Lamoso, Paços de Ferreira, NW de Portugal *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 15: 79-92.
- Chaminé, H. I.; Gama Pereira, L. C.; Fonseca, P. E.; Noronha, F. & Lemos de Sousa, M. J., 2003. Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Coimbra–Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena, (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 28: 37-78.
- COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, SA, 2003. Notícia explicativa da Carta Geotécnica do Porto, 2ª edição. COBA/FCUP e Câmara Municipal do Porto, 230 pp.
- Conde, L.E.N., 1983. Mapa de fracturas de Portugal (Memória descritiva). EDP, Electricidade de Portugal, 118 pp., 4 mapas na escala 1/500 000. (Relatório não publicado).
- Davis, G. & Reynolds, S. T., 1996. *Structural geology of rocks and regions*, 2nd ed., John Wiley & Sons. 776 pp.
- Day, M.J. & Goudie, A.S., 1977. Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer. *BGRG Technical Bulletin*, 18: 19-29.
- Dinis da Gama C., 1995. Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de Canteras. In: López Jimeno, C. (Ed.). *Cap. 10 del Manual de Rocas Ornamentales. Entorno Gráfico*. S.L., Madrid, pp. 231-246.
- Ferrer, M. & González de Vallejo, L. [eds.], 1999. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Publicaciones ITGE, Madrid. 81 pp, 41 fotografías.
- Fonseca, L., 2008. Interacção e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. Tese de Mestrado.

- Fontes, A., 1908. Contribuição para a higiene do Porto: Análise Sanitária do seu abastecimento em água potável. I. Estudo dos Mananciais de Paranhos e Salgueiros. Dissertação inaugural apresentada à escola Médico-Cirúrgica do Porto, Typ. Enciclopédia Portuguesa, Porto, 172 pp.
- Gaj, F.; Guglielmetti, V.; Grasso, P. & Giacomini, G., 2003. Experience on Porto: EPB follow-up. *Tunnels & Tunnelling International*, pp. 15-18.
- González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. [coords.], 2002. *Ingeniería geológica* Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society*, 28 (3): 207-242.
- Goudie, A. S., 2006. The Schmidt hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*, 30 (6): 703-718.
- 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.
- Hoek, E., 2007. *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.
- Hudson, J. A. & Priest, S. D., 1983. Discontinuity frequency in rock masses *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 20: 73-89.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 1981a. Recommend symbols for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 1981b. Rock and soils for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 2005. Special purpose mapping for waste disposal sites. *Bulletin IAEG*, 64.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics*, 15 (6): 319-368.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics (1985). Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 22: 51-60.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics, 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006 In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM Ankara, Turkey, 628 pp.
- Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock *Int. J. Rock Mech Min. Sci.*, 38: 981-994.
- Kahraman, S.; Fener, M. & Gunaydin, O., 2002. Predicting the Schmidt hammer values of in-situ intact rock from core sample values *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39: 395-399.
- Katza, O.; Rechesa, Z. & Roegiersc, J.C., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37: 723-728.
- Kolaiti, E. & Papadopoulos, Z., 1993. Evaluation of Schmidt rebound hammer testing: a critical approach *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*; 48: 69-76.
- Lamas, P. C., 1993. Estudos Geotécnicos para obras de Engenharia-Ensaios de rochas em laboratório. Cursos de sensibilização, CEGSA, Santo André, 29 e 30 de Março de 1993, pp.17.
- Loczy & Ladeira, E. A., 1980. *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectónica*, [S.I.]: Ed. Edgard Blucher.
- Lopes, M.E. (in prep.). Geoconservação, geodiversidade e património geológico-mineiro: os casos dos subterrâneos do Porto e da mina das Aveliras (Braga). Universidade de Coimbra. (em preparação).

- Martín-Serrano, A., 1994. Macizo Hispérico Septentrional, In: M. Gutiérrez Elorza (ed.). Geomorfología de España, Editorial Rueda, Madrid, pp. 25-62.
- Martins R., Moreira P., Santos P., Neto E., Pereira A. M., Teixeira J., Vieira A. & Chaminé H. I., 2006. A técnica de amostragem linear aplicada a estudos de compartimentação de maciços rochosos no Norte de Portugal. In: Actas do 10^o Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Univ. Nova de Lisboa, Maio de 2006. Volume 1, pp. 255-264.
- Mazzocola, D. F.; Millar, D. L. & Hudson, J. A., 1997. Information, uncertainty and decision making in site investigation for rock engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 15: 145-180.
- Moreira, P. F., 2008. Estudo cartográfico, geotécnico e geomecânico do maciço granítico de Arca d'Água (Paranhos): contributos para o conhecimento dos subterrâneos do Porto, Relatório Final de Projecto/Estágio. Departamento de Engenharia Geotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 116 pp., 5 anexos. (Relatório Inédito).
- Norbury, D. R., 1986. The Point Load Test. *Engineering Geology Special Publications*. Geological Society, London, 2: 325-329.
- Noronha, F. & Leterrier, J., 2000. Complexo metamórfico da Foz do Douro (Porto). *Geoquímica e Geocronologia, Separata de Rev. Real Academia Galega de Ciências*. Santiago de Compostela, vol. XIX, 19: 21-42.
- Palmström, A., 1975. Characterization of degree of jointing and rock mass quality. Intern. Report Ing. AB. Berdel, A.S. Oslo.
- Palmström, A., 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., 2006. Predicting Variability in joint frequencies from boreholes. *J. Structural Geology*, 28: 353-361.
- Peacock, D. C. P.; Harris, S. D. & Mauldon, M., 2003. Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies. *J. Struct. Geol.*, 25: 109-119.
- Pedrosa, M. Y. [coord.], 1998. Carta Hidrogeológica de Portugal. Instituto Geológico Mineiro, Lisboa, na escala 1/200 000, folha 1.
- Pedrosa, M. Y. [coord.], 1999. Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica de Portugal. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, na escala 1/200 000, folha 1, 70 pp. (+ 1mapa).
- Pinto, A. C. R.; Alho, A. A.; Moura, A. A. C. A.; Henriques, A. M. E.; Carvalho, C. I. P.; Ramos, J. M. F.; Almeida, N. C. & Mestre, V., 2006. Manual de pedra natural para a arquitectura. Direcção Geral de Geologia e Energia, Lisboa, 199 pp.
- Pinto de Jesus, A., 2001. Génese e Evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): um modelo. Universidade do Porto, Vol. Texto, 272 pp., Vol. Atlas: 71 pp. (Tese de doutoramento).
- Press, F. & Siever, R., 1997. *Understanding Earth*, 2ª edição, W.H. Freeman and Company, Nova Iorque, 682 pp.
- Priest, S. D. & Hudson, J. A., 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 183-197.
- Ramos, L. (2008). Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. Tese de Mestrado.
- Reis, P. A., 2002. Situação actual dos rios e ribeiros do Concelho do Porto. Universidade do Minho, Tese de mestrado.
- Ribeiro, A.; Quesada, C. & Dallmeyer, R.D., 1990. Geodynamic Evolution of the Iberian Massif In: Dallmeyer, R.D. & Martínez – Garcia, E., Eds, *Pré – Mesozoic Geology of Ibéria*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. pp. 397-410.

- Ribeiro, A.; Munhá, J.; Dias, R.; Mateus, A.; Pereira, E.; Ribeiro, L.; Fonseca, P.E.; Araújo, A.; Oliveira, J.T.; Romão, J.; Chaminé, H.I.; Coke, C. & Pedro J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009, 24 pp.
- Rocha, M., 1981. *Mecânica das Rochas*. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.
- Schmidt, E., 1951. A non-destructive concrete tester. *Concrete*, 59 (8): 34-35.
- Serrano Pinto, M., 1987. Síntese Geocronológica dos Granitóides do maciço Hespérico, In: Bea, F. et al. (eds.), *Geologia de los Granitoides y rocas asociadas del macizo Hespérico*. Livro de homenaje a L.C. García Figuerola, Editorial Rueda, Madrid, pp. 69-86.
- Sodré Borges, F., 2002. *Geologia Estrutural*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. (Policopiado).
- Terzaghi, K., 1965. Sources of errors in joint surveys. *Geotechnique*, 15: 287- 304.
- UNESCO, 1976. *Engineering geological maps: a guide to their preparation*. UNESCO Press, Paris.
- Vidal, R. J. R. & Twidale, C. R., 1999. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. *Geomorphology*, 31 (1-4): 13-27.
- Yassar, E. & Erdogan, Y., 2004. Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 71: 281-88.
- Zuquette, L. V. & Gandolfi, N., 2004. *Cartografia geotécnica*. Oficina de textos, Brasil, 198 pp.

Normas

EN 12372:2006. CEN TC 246 "Natural stones" Natural stone test methods - determination of flexural strength under concentrated load. 15pp.

Sites

<http://www.google-earth.com/> (consulta em Janeiro 2009)

<http://www.proceq.com/> (consulta em Novembro de 2008)

<http://www.biogetec.wordpress.com/> (consulta em Junho de 2009)

<http://www.e-geo.ineti.pt/> (consulta em Junho de 2009)

<http://www.webonc.darq.uc.pt/> (consulta em Maio de 2009)

ANEXOS

Anexos

Anexo nº1 – Ficha de Levantamento geológico - geomecânico	Ver cd em anexo
Anexo nº2 – Ficha de Levantamento geomecânico	Ver cd em anexo
Anexo nº3 – Ficha de Ensaio Esclerométrico realizado em laboratório	Ver cd em anexo
Anexo nº4 – Ficha de Ensaio de Carga Pontual	Ver cd em anexo
Anexo nº5 – Ficha de Ensaio de Resistência à Flexão sob Carga Centrada	Ver cd em anexo
Anexo nº6 – Mapa de Grau de Alteração	137
Anexo nº7 – Mapa de zonamento Geotécnico	139

Anexo nº1 – Ficha de Levantamento geológico – geomecânico

(ver cd em anexo)

Anexo nº2 – Ficha de Levantamento geomecânico

(ver cd em anexo)

Anexo nº3 – Ficha de Ensaio Esclerométrico realizado em laboratório

(ver cd em anexo)

Anexo nº4 – Ficha de Ensaio de Carga Pontual

(ver cd em anexo)

Anexo nº5 – Ficha de Ensaio de Resistência à Flexão sob Carga Centrada

(ver cd em anexo)

Anexo nº6 – Mapa de Grau de Alteração

Anexo nº7 – Mapa de zonamento Geotécnico

Consultar cap.3 da dissertação, para uma melhor leitura dos diagramas e gráficos

