



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

A influência das características geomecânicas dos maciços fracturados no desvio da perfuração

Ivo Alexandre Ferreira Abreu Reimão de Albuquerque



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

A influência das características geomecânicas dos maciços fracturados no desvio da perfuração

Ivo Alexandre Ferreira Abreu Reimão de Albuquerque

Nº 1040779

*Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizado sob a orientação do Engenheiro António Carlos Galiza, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenheiro António Carlos Reis Galiza Carneiro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Filipe Santos Fonseca

Departamento de Direcção de Obra, Descavanor SA - Grupo MonteAdriano, SA

Mestre Luís Carlos Correia Ramos

Departamento de Controlo Operacional, MonteAdriano: Agregados, SA

Dedico esta tese a meus Pais por toda a compreensão e apoio que me prestaram na minha formação e graduação em Engenharia Geotécnica. Muito obrigado por tudo...

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os quantos, de uma ou de outra forma, me incentivaram na elaboração da presente investigação, em particular:

- Aos meus orientadores Eng.º A. Carlos Galiza (ISEP) e Prof. Doutor Helder I. Chaminé (ISEP), expresso o meu sincero reconhecimento pela forma prestável como sempre me apoiaram, quer no terreno quer no gabinete, no desenvolvimento da presente tese. Grato pela partilha da imensa documentação bibliográfica sobre geomecânica e engenharia de maciços rochosos e, por fim, deveras agradecido pela leitura atenta às várias versões do trabalho;
- Ao Mestre Luís Ramos (MonteAdriano-Agregados SA), grato pela forma dedicada e incedível como me acolheu na pedreira de Serdedelo e no apoio nas várias fases do trabalho e, sobretudo, pela troca de impressões sobre a temática e partilha da sua experiência no funcionamento das bases de dados;
- Aos investigadores do LABCARGA|ISEP, por apoios vários no desenvolvimento da tese, em particular: Mestre Rui Santos Silva e Mestre Patrícia Moreira, pelo apoio e observações de alguns dados geomecânicos de terreno, e Mestre José Teixeira, pela disponibilidade e auxílio prestado na integração dos dados cartográficos;
- Aos meus colegas de curso, Eng.º José Torres e Eng.º André Martins, pela disponibilidade e apoio nos levantamentos geológico-geotécnicos de campo;
- Ao Mestre Luís Fonseca (Descavanor SA), pelo importante apoio prestado na fase inicial deste trabalho, bem como pela partilha de dados;
- Ao Eng.º Pedro Baptista (Geoblast), pelo acompanhamento na realização do Ensaio Boretrak e disponibilidade de meios técnicos para a compilação dos ensaios de campo;
- Ao director do Centro de Prestações de Serviço Especializados Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), Prof. Helder I. Chaminé, por todas as facilidades na utilização dos recursos e equipamentos do laboratório;
- À empresa *MonteAdriano-Agregados SA*, na pessoa do Presidente do Conselho de Administração, Eng.º A. Carlos Galiza, pela oportunidade que me deu na realização do trabalho de campo na pedreira de Serdedelo;
- À minha família e amigos, que compreenderam os meus humores, as minhas ausências e não deixaram de me apoiar...

A todos, sem excepção, o meu Muito Obrigado!

Palavras-chave

Geomecânica, Maciços rochosos, Técnica de Amostragem Linear, Desvios de perfuração

Resumo

A perfuração é uma das operações envolvidas no desmonte de rocha com explosivos. A forma como esta operação é executada é determinante para o sucesso do desmonte. Quando é realizada correctamente o desmonte produz superfícies limpas com o mínimo de sobrecavação e perturbação. A selecção das ferramentas de perfuração é um dos factores preponderantes para os custos do desmonte de maciços rochosos. A forma como a perfuração é executada é determinante para a boa fragmentação do maciço rochoso. Este estudo irá centrar-se na perfurabilidade do maciço, linearidade dos furos e desenvolvimento de metodologias do ciclo de perfuração. O objectivo geral deste trabalho é demonstrar a interdependência entre os parâmetros geológicos e geotécnicos do maciço rochoso e as tecnologias de perfuração de forma a otimizar tanto técnica como economicamente. O controlo geomecânico do desmonte do maciço rochoso através de uma perfuração alinhada é salientado com o intuito de uma abordagem de geoengenharia integrada nos maciços rochosos.

Keywords

Geomechanics, Rock Masses, Scanline Sampling Technique, Drilling Deviations

Abstract

Drilling is one of the unit operations involved in rock fragmentation by blasting. The way this operation is conducted determines the success of the rock fragmentation. When correctly performed, these blasts can produce very clean faces with a minimum of over-break and disturbance. The wear of drilling tools in quarrying has always been a predominant factor for the costs of hard rock excavation. The way drilling is conducted determines the success of the rock fragmentation. This study will focus in the rock mass drillability, straight holes, and in the development of drilling cycle methodologies. The main goal of this work is to present the potential interdependency between geological and geotechnical parameters of rock masses and drilling technologies, in order to optimize drilling both technically and economically. The selected study area – Serdedelo Quarry (Ribeira, Ponte de Lima), NW Portugal – is located near regional faults. The geomechanical control of rock mass blasting by aligned drilling features is outlined in order to address an integrated geoengineering rock masses approach.

Índice geral

1. INTRODUÇÃO GERAL	3
1.1 Enquadramento da temática	3
1.2 Objectivos.....	4
1.3 Materiais e métodos	6
2. GEOTECNIA DE MACIÇOS ROCHOSOS: CARACTERIZAÇÃO E DESMONTE	13
2.1 Caracterização da matriz rochosa	13
2.2 Descrição das descontinuidades	13
2.3 Descrição de Maciços Rochosos.....	15
2.4 Parâmetros do maciço rochoso.....	17
2.5 Técnica de amostragem linear aplicada às superfícies de descontinuidades.....	25
2.6 Desmonte de maciços rochosos.....	28
3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE COMPARTIMENTAÇÃO DA PEDREIRA DE SERDEDELO: ZONAMENTO GEOTÉCNICO DE PORMENOR DO MACIÇO ROCHOSO, BANCADAS NORTE.	51
3.1 Considerações iniciais e enquadramento regional	51
3.2 Pedreira de Serdedelo.....	53
3.3 Parâmetros geológico-geotécnicos	54
3.3.1 Caracterização do material rochoso presente na Pedreira de Serdedelo	56
3.3.2 Grau de alteração.....	57
3.3.3 Estado da fracturação e espaçamento.....	58
3.3.4 Continuidade	70
3.3.5 Terminação.....	72
3.3.6 Abertura	73
3.3.7 Enchimento/Preenchimento	74
3.3.8 Rugosidade	76
3.3.9 Curvatura.....	77
3.3.10 Presença de água	78

3.3.11	Caracterização do grau de compartimentação do maciço.....	80
3.3.12	Ensaio de resistência “in situ”	82
3.4	Esboço do zonamento geotécnico de pormenor	86
3.5	Análise dos desvios de perfuração.....	88
3.5.1	Emboquilhamento.....	88
3.5.2	Desvio Pontual.....	90
3.5.3	Desvio de Flexão.....	92
3.6	Resultados	94
3.6.1	Emboquilhamento.....	94
3.6.1.1	Limpeza da bancada.....	94
3.6.1.2	Regularidade da bancada.....	95
3.6.2	Parâmetros geométricos do diagrama de fogo.....	99
3.7	Análise Fotográfica.....	103
4.	CONCLUSÕES	111
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
6.	ANEXOS	123

Índice de figuras

Figura 1. Exemplo de aplicação da base de dados, ScanGeoData BGD (Ramos, 2008; Fonseca, 2008; Fonseca et al., 2010), desenvolvida para maciços rochosos fracturados.	7
Figura 2. Extracto da base de dados, SchmidtData UCS (Ramos, 2008; Fonseca, 2008; Fonseca et al., 2010), desenvolvida para maciços rochosos fracturados.	7
Figura 3. Exemplo de aplicação da base de dados GeoHole Data (Ensaio de medição do desvio de perfuração Boretrak), (segundo Ramos, 2008).	8
Figura 4. Representação esquemática das diferentes etapas para a caracterização geológica, geotécnica e geomecânica do maciço rochoso: i) zonamento geotécnico / geomecânico do maciço; ii) ensaios laboratoriais (in situ e laboratório); iii) gestão racional de dados, com recurso a base de dados dinâmicas dos elementos geológico-geotécnicos e geomecânicos (<i>ScanGeoData BGD / SchmidtData UCS</i>), segundo Fonseca et al. (2010).	9
Figura 5. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	22
Figura 6. 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.	25
Figura 7. Ficha tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo, com aplicação da técnica de amostragem linear.	26
Figura 8. Operações da indústria extractiva e transformadora de rocha industrial (adaptado de <i>Rock Excavation Handbook</i> , Sandvik/Tamrock 1999).	28
Figura 9. Representação esquemática das actividades de Extração e Transformação de pedra natural e das consequências que a execução da perfuração tem nas actividades subsequentes (adaptado de Fonseca,2008).	29
Figura 10. Factores resultantes do desmonte de maciços rochosos (adaptado de <i>Rock Excavation Handbook</i> , Sandvik/Tamrock, 1999).	30
Figura 11. Benefícios de uma perfuração alinhada.	31
Figura 12. Esquematização visual dos parâmetros do maciço rochoso na análise dos desvios de perfuração.	32
Figura 13. Parâmetros geométricos do diagrama de fogo e ferramentas de execução (equipamento de perfuração mais acessórios).	33
Figura 14. Desvio de perfuração.	33
Figura 15. Exemplo de posicionamento dos furos à superfície (a vermelho) e à cota pretendida (a azul).	34

Figura 16. Desvio lateral (COD:222) e frontal (COD:211).....	39
Figura 17. Parâmetros influentes nos desvios de perfuração (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).	40
Figura 18. Parâmetros do diagrama de fogo registados na BD.....	43
Figura 19. Esquema de transmissão de energia através dos acessórios de perfuração.	43
Figura 20. Ângulo de intercepção entre o furo e as descontinuidades do maciço, comportamento do desvio.....	44
Figura 21. Exemplos de bons (OK) e maus (KO) emboquilhamentos.	45
Figura 22. Exemplo de instabilidade do equipamento.	46
Figura 23. Partes constituintes do equipamento Boretrak, a) Control Display Unit; b) Sensor Probe;	47
Figura 24. Modo de operação do Boretrak.	48
Figura 25. Enquadramento da geologia regional do sector a Norte de Viana do Castelo [fotomontagem, com carta de relevo sombreado, adaptada da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50.000, folha 5-A (Viana do Castelo); Teixeira et al., 1972]. Os tons avermelhados representam os granitóides, as tonalidades cinza-esverdeados são rochas metassedimentares e tons cinza claro são os depósitos sedimentares.	52
Figura 26. Enquadramento geológico regional da pedreira de Serdedelo, Sudeste de Ponte de Lima (base cartográfica: adaptada/revista de Teixeira et al., 1972; Pereira et al., 1989).	52
Figura 27. Localização da pedreira de Serdedelo, Sudeste de Ponte de Lima (base cartográfica: adaptada do <i>Google Earth Pro</i> [Setembro de 2010]).....	53
Figura 28. O estado do grau de alteração para a pedreira em estudo.	57
Figura 29. Análise do grau de alteração das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	58
Figura 30. Exemplo da aplicação de uma linha de amostragem graduada no estudo da compartimentação da pedreira granítica de Serdedelo, Ponte de Lima.	58
Figura 31. Aspectos do grau de fracturação e de alteração da pedreira de Serdedelo. A) Perspectiva geral da pedreira; B) Perspectiva do topo Nordeste da pedreira; C) Aspecto da compartimentação do maciço rochoso; D) Aspecto do maciço com um grau de alteração são ou praticamente não alterado (W_1); E) Plano de falha, no topo Leste da pedreira; F) Aspecto da zona de desmonte, no topo Noroeste da pedreira.....	59
Figura 32. Tipos de descontinuidades nas bancadas da pedreira de Serdedelo.	60
Figura 33. Localização dos perfis lineares (“scanlines”) da zona em estudo (Pedreira de Serdedelo).	60

Figura 34. Diagrama de rosetas da bancada n.º 0 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima), com 239 descontinuidades projectadas em intervalos (pétalas) com 11° de amplitude, sendo o primeiro intervalo [0°;10°].	61
Figura 35. Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 239 descontinuidades medidas na bancada n.º 0 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	61
Figura 36. Ilustração da variação do azimute das descontinuidades (n=239) do maciço da bancada n.º 0 da pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	63
Figura 37. Diagrama de rosetas da bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima), com 85 descontinuidades projectadas em intervalos (pétalas) com 11° de amplitude, sendo o primeiro intervalo [0°;10°].	64
Figura 38. Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 85 descontinuidades medidas na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	64
Figura 39. Diagrama de rosetas geral da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima), com 324 descontinuidades projectadas em intervalos (pétalas) com 11° de amplitude, sendo o primeiro intervalo [0°;10°].	66
Figura 40. Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 324 descontinuidades medidas na Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	66
Figura 41. Azimute das descontinuidades (n=324) do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	67
Figura 42. Análise dos tipos de descontinuidade das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	68
Figura 43. Espaçamento das descontinuidades nos painéis estudados.	68
Figura 44. Análise do espaçamento das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	69
Figura 45. Tipo de continuidade das descontinuidades no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	71
Figura 46. Análise da continuidade das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	71
Figura 47. Tipo de terminação das descontinuidades no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	72
Figura 48. Análise do tipo de terminação das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	72
Figura 49. Abertura das descontinuidades no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	73

Figura 50. Análise da abertura média das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	74
Figura 51. Exemplos de enchimento.	74
Figura 52. Tipo de preenchimento das descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	75
Figura 53. Análise dos tipos de preenchimento das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	75
Figura 54. Tipo de rugosidade das descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	76
Figura 55. Análise dos tipos de rugosidade das famílias principais e no geral no maciço rochoso.	77
Figura 56. Tipo de curvatura das descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	77
Figura 57. Análise do tipo de curvatura das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	78
Figura 58. Presenças pontuais de água no maciço rochoso.	78
Figura 59. Tipo de presença de água nas descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	79
Figura 60. Análise do tipo de presença de água nas descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.	79
Figura 61. Representação esquemática do bloco unitário previsível na área investigada.	81
Figura 62. Exemplo de aplicação do martelo de Schmidt num maciço rochoso para avaliar a sua resistência à compressão.	82
Figura 63. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo de Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	83
Figura 64. Classes de resistência à compressão uniaxial no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	84
Figura 65. Projecção dos valores da resistência à compressão uniaxial segundo os perfis lineares das bancadas cartografadas do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima). ...	84
Figura 66. Análise conjunta dos parâmetros comumente utilizados para apoiar o zonamento geotécnico.	85
Figura 67. Esboço do zonamento geotécnico de superfície da área da pedreira de Serdedelo (segundo Fonseca et al., 2010).	87
Figura 68. Esboço do zonamento geotécnico de pormenor do sector estudado na pedreira de Serdedelo.	87

Figura 69. Exemplo de um desvio de emboquilhamento do ângulo de direcção (X) – furo n.º 1 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 20/04/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	89
Figura 70. Exemplo de um desvio de emboquilhamento do ângulo de inclinação (Y) – furo n.º 37 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 20/04/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	89
Figura 71. Exemplo de um desvio pontual do ângulo de direcção (X) – furo n.º 15 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 20/04/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	91
Figura 72. Exemplo de um desvio pontual do ângulo de inclinação (Y) – furo n.º 13 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 30/06/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	91
Figura 73. Exemplo de um desvio de flexão do ângulo de direcção (X) – furo n.º 20 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 30/06/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	93
Figura 74. Exemplo de um desvio de flexão do ângulo de inclinação (Y) – furo n.º 9 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 30/06/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).	93
Figura 75. Emboquilhamento: Limpeza da bancada.	94
Figura 76. Classes de emboquilhamento.	95
Figura 77. Regularidade das bancadas.	96
Figura 78. Emboquilhamento: Regularidade das bancadas.	96
Figura 79. Furos com inclinação de 10°.	99
Figura 80. Furos com inclinação de 12°.	99
Figura 81. Representação da ocorrência dos diferentes tipos de códigos presentes nos desvios em (X).	100
Figura 82. Representação da ocorrência dos diferentes tipos de códigos presentes nos desvios em (Y).	100
Figura 83. Possíveis causas da ocorrência de desvios na perfuração.	103
Figura 84. Aspecto da bancada n.º 0 antes e após a realização do desmonte (pega 1) – Pedreira de Serdedelo.	104
Figura 85. Exemplo da identificação das “meias-canas” da 1.ª pega (20/04/2010) realizada na bancada 0 da Pedreira de Serdedelo.	105
Figura 86. Aspecto da bancada n.º 1 antes da realização do desmonte (pega 2) – Pedreira de Serdedelo.	106
Figura 87. Exemplo da identificação das “meias-canas” da 2.ª pega (30/06/2010) realizada na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo.	106
Figura 88. Exemplo da identificação das “meias-canas” da 2.ª pega (30/06/2010) realizada na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo.	107

Figura 89. Exemplo da identificação das “meias-canãs” da 2.ª pega (30/06/2010) realizada na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo..... 108

Índice de quadros

Quadro 1. Tipos de descontinuidades (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al. 2002).	14
Quadro 2. Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).	18
Quadro 3. Terminologia para caracterização do estado de resistência (ISRM, 1978).	19
Quadro 4. Estados de alteração (adaptado de ISRM, 1978).	20
Quadro 5. Graus de alteração propostos pela ISRM (1981).	21
Quadro 6. Síntese esquemática e resumida dos diferentes parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos.	23
Quadro 7. Resistência à compressão simples (segundo a ISRM, 1978, 1981).	27
Quadro 8. Erro de posicionamento (adaptado de Ramos, 2008).	35
Quadro 9. Erro de emboquilhamento (adaptado de Ramos, 2008).	36
Quadro 10. Erro de direcção e inclinação (adaptado de Ramos, 2008).	36
Quadro 11. Erro de Comprimento/Cota (adaptado de Ramos, 2008).	37
Quadro 12. Matriz de avaliação do tipo de desvio (adaptado de Ramos, 2008).	38
Quadro 13. Matriz de avaliação do equipamento de perfuração (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).	41
Quadro 14. Matriz de avaliação dos acessórios de perfuração (adaptado de Fonseca, 2008). ..	42
Quadro 15. Vantagens e desvantagens de bancadas limpas, mas irregulares (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).	45
Quadro 16. Resumo do estudo micropetrográfico das amostras do granito de Serdedelo (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).	56
Quadro 17. Síntese dos dados geológico-estruturais da pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).	62
Quadro 18. Espaçamento médio das descontinuidades para o maciço de Serdedelo.	63
Quadro 19. Síntese dos dados geológico-estruturais da pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).	65
Quadro 20. Espaçamento médio das descontinuidades para o maciço de Serdedelo.	65
Quadro 21. Síntese dos dados geológico-estruturais da pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).	67
Quadro 22. Espaçamento médio das descontinuidades para o maciço de Serdedelo.	70

Quadro 23. Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos dos painéis cartografados com recurso à técnica de amostragem linear em superfícies expostas dos taludes das bancadas do maciço de Serdedelo.	80
Quadro 24. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico (ISRM, 1981).	81
Quadro 25. Limpeza da bancada: classes de emboquilhamento e respectivos valores de análise.	95
Quadro 26. Regularidade da bancada: classes de emboquilhamento e respectivos valores de análise.	96
Quadro 27. Análise do desvio de emboquilhamento.	97
Quadro 28. Análise do desvio de flexão.....	98
Quadro 29. Análise percentual dos vários tipos de desvios de perfuração.....	102

CAPÍTULO 1



1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Enquadramento da temática

O desmonte do maciço rochoso com explosivos pode ser considerado como uma operação de destaque de uma porção do material rochoso que o constitui (Galiza et al., 2008). A perfuração é uma das operações que assume um papel de extrema importância no desmonte. A qualidade da sua execução determina o sucesso do desmonte. Esta operação envolve três grupos de parâmetros, a saber (e.g., Persson et al., 1993; Jimeno, 1995; Dinis da Gama, 1995; Holmberg, 2003; Brady & Brown, 2004; Galiza et al., 2008; Fonseca et al., 2010): i) petrofísicos, geológico-estruturais, geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso; ii) ferramentas de execução; iii) geometria do diagrama de fogo.

As propriedades petrofísicas, geológico-estruturais e geomecânicas do maciço rochoso são de extrema importância na compreensão do desmonte com explosivos, uma vez que o uso de diagramas de fogo de características invariáveis, sem considerar as mudanças destas propriedades, poderá conduzir a fragmentação deficiente, excessos de finos, danos nas paredes das bancadas adjacentes, impactos ambientais e custos operacionais maiores. Assim, os parâmetros do dimensionamento do diagrama de fogo serão determinados pela interacção das características do maciço, da perfuração, do explosivo utilizado e do sistema de iniciação. O maciço é o único factor que não pode ser dimensionado, mas, em virtude da sua importância no processo, deverá ser classificado, parametrizado e controlado. É vital a compreensão da forma como estes parâmetros interagem entre si e de que forma poderão contribuir para os desvios de perfuração, i.e., compreender como o tipo e a amplitude de desvio poderão causar a conjugação de determinadas características dos grupos referidos (Galiza et al., 2008; Fonseca et al., 2010).

A optimização de qualquer operação de desmonte com explosivos requer o conhecimento prévio, entre outros, das características petrofísicas do material-rocha, do estado da alteração e do grau de fracturação natural com o intuito de se definir a compartimentação do maciço rochoso (Rocha, 1981; ISRM, 1981; Dinis da Gama, 1995). O grau de fragmentação do material desmontado interfere na eficiência e no custo das operações subsequentes, sendo, também, directamente afectado pelo esquema de perfuração e pela quantidade de explosivos consumidos (e.g., Dinis da Gama, 1971; Franklin & Dusseault, 1991; Dinis da Gama, 1996; Moodley & Cunningham, 1996).

A presente tese enquadra-se na Unidade Curricular “Dissertação/Projecto/Estágio”, do 2º ano (anual), do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Politécnico do Porto. O formato desta tese de mestrado é de “projecto”, no âmbito de uma cooperação técnico-científica entre o DEG|ISEP/LABCARGA|ISEP e a empresa MonteAdriano – Agregados, SA. Por razões de ordem operacional e académica, a presente dissertação utiliza as bases de dados geológico-geomecânica e de engenharia de desmonte, bem como complementa as investigações de mestrado de Ramos (2008) e de Fonseca (2008). Os trabalhos anteriores e o presente enquadram-se, parcialmente, na investigação de doutoramento, de maior fôlego, do Eng.º A. Carlos Galiza (ISEP).

1.2 Objectivos

O presente trabalho visa atingir, numa perspectiva interdisciplinar, a temática dos desvios de perfuração em maciços rochosos, uma componente geológico-estrutural, geotécnica e geomecânica do maciço. Além disso, pretendeu-se investigar até que ponto há uma interdependência entre o tipo/amplitude dos desvios de perfuração e os parâmetros geológico-geotécnicos dos maciços, determinando ainda a correcção da direcção e inclinação do furo que permita corrigir ou limitar a tendência do desvio de perfuração, as ferramentas de execução e a geometria do diagrama de fogo. Com a conjugação de todos estes parâmetros e uma recolha sistemática dos mesmos pretendeu-se ainda aplicar bases de dados dinâmicas criadas e desenvolvidas por Ramos (2008) e Fonseca (2008). O maciço rochoso objecto de estudo foi a pedreira granítica da Serdedelo (Ponte Lima), situada no Alto Minho.

Este trabalho foi desenvolvido, essencialmente, em duas fases complementares. Uma primeira fase, referente ao trabalho de campo, com a consequente recolha, processamento, análise e interpretação dos dados para uma caracterização geotécnica e geomecânica do maciço rochoso em estudo. Uma segunda fase em que, se procedeu à realização de ensaios Boretrak (medição dos desvios de perfuração) e ao registo de parâmetros ligados ao diagrama de fogo, ao equipamento e aos acessórios de perfuração, e a outras condicionantes relevantes para o estudo dos desvios de perfuração.

Dentre os principais objectivos deste trabalho, podemos destacar:

- Reconhecimento e inspecção visual do maciço em estudo. Contacto com a geologia, a geomorfologia e a cartografia da pedreira de Serdedelo (Ribeira, Ponte de Lima) e área envolvente. Selecção do sector da pedreira a estudar e georreferenciação

topográfica, recorrendo a um GPS de alta-precisão (“Trimble Geoexplorer”), dos vários diagramas de fogo monitorizados;

- Zonamento geotécnico de pormenor do sector do maciço rochoso pré-seleccionado. Caracterização dos parâmetros geológicos e geotécnicos dos desmontes monitorizados durante o estudo, aplicando a técnica da amostragem linear nas superfícies expostas para a avaliação do grau de compartimentação e caracterização geotécnica-geomecânica através da *Basic Geotechnical Description of Rock Masses* (BGD)¹. Para o efeito, foi utilizada a aplicação informática desenvolvida em 2008, a **ScanGeoData|BGD** (Ramos, 2008; Fonseca, 2008; Fonseca et al., 2010), que permite a compilação, o tratamento e a análise dos inúmeros dados geológicos e geotécnicos das superfícies expostas no terreno. Realização de ensaios geomecânicos “in situ”, nomeadamente o ensaio esclerométrico através do “Martelo de Schmidt” (tipo L), para estimar a resistência do material rochoso nas zonas desmontadas do maciço em estudo. Assim, foi utilizada a aplicação informática **SchmidtData|UCS** (Ramos, 2008; Fonseca, 2008), que permite a compilação, o tratamento e a análise dos ensaios geomecânicos de resistência à compressão uniaxial (“Uniaxial Compressive Strength”) recolhidos no terreno;
- Com base na consulta da base de dados desenvolvida em 2008, a **GeoHole|Data** (Ramos, 2008) para realizar a caracterização da distribuição ponderada dos tipos de desvios tipicamente frequentes do maciço rochoso de Serdedelo. Esta aplicação apresenta a capacidade para um conjunto de análises por filtragem dos parâmetros que o utilizador bem entender, permitindo leituras de desvios para diferentes condições, ferramentas, geometrias e maciços;
- Aferir a correlação efectiva do comportamento do furo em função do ângulo de intercepção do mesmo com as descontinuidades do maciço rochoso, analisando em dois quadrantes perpendiculares correspondentes à direcção e inclinação do furo;
- Aferir uma correcção na direcção e inclinação do furo que contrarie e corrija a tendência do desvio de perfuração tipicamente característica daquele maciço, distribuindo o mais precisamente possível a carga de explosivo pelo volume desmontado com conseqüente impacto na optimização do resultado do desmonte.

¹ BGD proposta pela *International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981)* e outras recomendações propostas pela *ISRM (1978, 2007)*, pela *Geological Society Engineering Group Working Party Report (GSE, 1995)*, pelo *Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (CFCFF, 1996)* e pela *International Association for Engineering Geology (IAEG, 1981a,b,c)*.

1.3 Materiais e métodos

Em termos metodológicos, o trabalho teve, essencialmente, três fases. Na primeira fase, começamos por efectuar o reconhecimento de campo com o intuito de definir os constrangimentos geológicos do maciço em estudo e área envolvente.

Numa segunda fase do trabalho, efectuamos a recolha, o tratamento, a análise e a interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos do maciço. Esta abordagem integrada possibilitou a descrição e o zonamento geotécnico dos maciços em estudo, tendo-se seguido, essencialmente, as recomendações da ISRM (1978, 1981, 2007), da GSE (1995) e do CFCFF (1996). Os parâmetros geológico-geotécnicos do maciço rochoso e a caracterização das suas descontinuidades foram objecto de estudo através da aplicação da técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço rochoso (ver pormenores da descrição da técnica, por exemplo, em (Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004 e Martins et al., 2006). Para a caracterização geomecânica dos maciços foi concretizada recorrendo, nomeadamente, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial (esclerómetro portátil ou “Martelo de Schmidt”). A aplicação das bases de dados dinâmicas **ScanGeoData|BGD** e **SchmidtData|UCS** (Figuras 1 e 2) relativas a parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos conduziu à realização do cruzamento exaustivo de toda a informação e à interpretação de todos os dados obtidos e compilados no sentido de apoiar a elaboração de uma proposta de zonamento geotécnico de pormenor do maciço em estudo. Seguidamente, enquadraram-se os resultados do estudo da rede de fracturação de toda a pedreira efectuados nas investigações de Ramos (2008) e de Fonseca (2008). Para o efeito, confrontaram-se os resultados obtidos no sentido de averiguar a presença de um padrão de fracturação no sector de pormenor estudado.

No que concerne à terceira fase, destaca-se a realização dos ensaios Boretrak (i.e., medição dos desvios de perfuração), o registo dos parâmetros ligados ao diagrama de fogo, equipamento e acessórios de perfuração, bem como outras condicionantes de bancada. Consequentemente, foi aplicada a base de dados dinâmica **GeoHole|Data** (Figura 3), na qual se anotaram os parâmetros geológico-geotécnicos, as ferramentas de execução e a geometria do diagrama de fogo associados aos resultados dos ensaios de perfuração Boretrak. Nesta base de dados inclui-se ainda um tratamento geoestatístico exploratório, que permitirá aferir a variabilidade dos desvios em função das ferramentas de execução, das características geométricas do diagrama de fogo e das características do maciço rochoso.

DATA	PEDREIRA	BANCAIDA	PIEGA	HOLE	ROD	RESULTADOS BORETRAK									
						TDEPTH	OFFSET	ROD DEPTH	X	Y	PITCH (Y)	ROLL (X)	DIP	AZIMUTH	ANULAR
						9,767	-0,054	10,016	0,624	1,931	1,876	-0,562	10,847	43,688	32
12-07-08	SRD	1	1	1	1	1,958	-0,059	2,000	-0,039	0,406	-11,720	1,130	11,533	354,600	V
12-07-08	SRD	1	1	1	2	3,920	-0,099	4,000	-0,046	0,793	-11,160	0,210	10,956	358,900	
12-07-08	SRD	1	1	1	3	5,861	-0,230	6,000	-0,120	1,271	-13,830	2,190	13,599	351,200	
12-07-08	SRD	1	1	1	4	7,779	-0,445	8,000	-0,156	1,834	-16,350	1,060	15,752	356,400	
12-07-08	SRD	1	1	1	5	9,681	-0,713	10,000	-0,233	2,450	-17,920	2,320	17,228	352,900	
12-07-08	SRD	1	1	1	6	11,570	-1,021	12,000	-0,281	3,105	-19,110	1,480	18,175	355,700	
12-07-08	SRD	1	1	1	7	13,423	-1,426	14,000	-0,286	3,857	-22,090	0,150	20,610	359,600	
12-07-08	SRD	1	1	1	8	15,253	-1,885	16,000	-0,239	4,663	-23,790	-1,470	22,002	3,300	
12-07-08	SRD	1	1	1	9	16,330	-2,203	17,200	-0,187	5,190	-26,000	-2,770	14,805	5,700	
12-07-08	SRD	1	1	1	10	16,330	-2,203	17,200	-0,187	5,190	-26,000	-2,770	14,805	5,700	

Figura 3. Exemplo de aplicação da base de dados **GeoHole|Data** (Ensaio de medição do desvio de perfuração Boretrak), (segundo Ramos, 2008).

O estudo em apreço teve início, formalmente, em Abril de 2010, com a compilação de toda a bibliografia e documentação diversa sobre a pedreira em estudo. Os trabalhos de campo e de laboratório da presente investigação decorreram, fundamentalmente, durante os meses de Abril e Junho de 2010 (incluindo fins-de-semana), totalizando cerca de 8 dias. Estes englobaram, então, o trabalho de reconhecimento e inspecção visual dos maciços, da cartografia geo-aplicada, dos levantamentos geológico-geotécnicos para o estudo do estado da compartimentação do maciço e da qualidade geomecânica, ensaios geomecânicos “in situ” para avaliar a resistência do maciço. Os levantamentos de campo foram realizados pelo signatário desta dissertação, coadjuvado pela supervisão do Mestre Eng.º Luís Ramos (MonteAdriano – Agregados SA) e, ainda, tivemos o apoio no terreno dos colegas do curso André Martins e José Torres, sob coordenação do Professor Doutor Helder I. Chaminé (ISEP). Foi dado apoio, em várias fases desta investigação, em todos os aspectos relacionados com o desmonte e perfuração pelo Eng.º A. Carlos Galiza (ISEP).

Nos levantamentos de GPS de alta-precisão, geológico-geomecânicos e no tratamento da cartografia aplicada, recorreu-se aos equipamentos e instalações do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP).

A figura 4 apresenta de uma forma esquemática as diferentes etapas de investigação do maciço rochoso de Serdedelo.

Zonamento geotécnico / geomecânico do maciço

Definição dos parâmetros geológico-geotécnicos do maciço rochoso
Aplicação da técnica da amostragem linear à cartografia das superfícies expostas



Caracterização geomecânica

Ficha de levantamento geológico-geotécnico

Ficha de levantamento geomecânico



Ensaios laboratoriais

Ensaios à matriz rochosa

<p>Petrografia</p>	<p>Ensaio Carga Pontual (Point Load Test)</p>	<p>Ensaio de desgaste (Los Angeles)</p>	<p>Ensaios de Perfurabilidade (DRI)</p>
--------------------	---	---	---

Gestão de dados

Processamento / tratamento / análise de dados

<p>Base de Dados Geológico-Geotécnica (ScanGeoData BGD)</p>	<p>Base de Dados Geomecânica (Esclerômetro de Schmidt)</p>
--	---

Figura 4. Representação esquemática das diferentes etapas para a caracterização geológica, geotécnica e geomecânica do maciço rochoso: i) zonamento geotécnico / geomecânico do maciço; ii) ensaios laboratoriais (in situ e laboratório); iii) gestão racional de dados, com recurso a base de dados dinâmicas dos elementos geológico-geotécnicos e geomecânicos (ScanGeoData/BGD / SchmidtData/UCS), segundo Fonseca et al. (2010).

CAPÍTULO 2



2 GEOTECNIA DE MACIÇOS ROCHOSOS: CARACTERIZAÇÃO E DESMONTE

2.1 Caracterização da matriz rochosa

Designa-se por matriz rochosa, a rocha intacta que surge naturalmente impressa pelas distintas descontinuidades que a circundam, constituindo em conjunto com estas o maciço rochoso (Rocha, 1981). A caracterização de campo do maciço rochoso é um exercício progressivo que começa com uma descrição geral das condições do terreno e com a identificação e classificação dos materiais que formam os maciços. As observações posteriores mais complexas sobre propriedades e factores concretos podem aumentar o grau de interpretação e, por isso, o grau de subjectividade (Brady & Brown, 2004). Através de uma cuidada e objectiva inspecção visual, a matriz rochosa permite-nos obter alguma informação acerca da sua génese e respectiva mineralogia, possibilitando ainda determinar outras propriedades petrofísicas, tais como a dureza, a densidade, a forma e o tamanho dos blocos, etc. Habitualmente, os aspectos a destacar no terreno são os seguintes (González de Vallejo et al., 2002):

- Caracterização e identificação meso e macroscópica (por vezes, até microscópica) dos constituintes da matriz;
- Textura e estrutura;
- Grau de alteração / alterabilidade;
- Grau de compartimentação e fracturação;
- Resistência do material.

2.2 Descrição das descontinuidades

Denomina-se por descontinuidade qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso (Rocha, 1981; Brady & Brown, 2004). Estas entidades são extremamente relevantes, uma vez que, ao seccionarem um dado maciço rochoso, vão influenciar as propriedades geomecânicas deste, conferindo-lhe um comportamento, em termos de deformabilidade, de permeabilidade e de resistência ao corte, muito diferente do estágio imaginado como inicial, podendo ainda ser controlada toda a estabilidade do meio rochoso. Deste modo, é comumente utilizado o termo descontinuidade em mecânica das rochas, como uma designação geral para descrever a maior parte das superfícies estruturais (tais como falha, diaclase, estratificação, xistosidade, superfícies de

contacto entre formações, etc.) de um dado maciço que apresentam uma resistência relativamente baixa à tracção (ISRM, 1978).

O termo descontinuidade referencia, assim, qualquer plano de separação no maciço rochoso, podendo este ter origem sedimentar (como as superfícies de estratificação ou laminação), diagenética (como as estruturas filonianas) ou tectónica (como as diaclases e falhas).

No quadro 1, classificam-se os distintos tipos de descontinuidades, tendo estes sido agrupados em sistemáticas, quando aparecem em famílias, e em singulares, quando surge um único plano que intersecta o maciço rochoso.

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

DESCONTINUIDADES		Sistemáticas	Singulares
PLANARES		Planos de estratificação Planos de laminação Planos de xistosidade Diaclases e fissuras	Falhas Filões Discordâncias
LINEARES		Intersecção de descontinuidades planares Lineações	Eixos de dobras

O estudo da distribuição espacial das descontinuidades, através da investigação geológico-estrutural, compreende a definição dos sistemas de famílias e respectivas atitudes geológicas, espaçamento e persistência. Um conjunto de descontinuidades com a mesma atitude caracteriza uma **família de descontinuidades**. Um conjunto de famílias que é característico de uma dada zona do maciço define um **sistema**. A **atitude** de uma descontinuidade é dada pela sua direcção (intersecção da descontinuidade com um plano horizontal) e inclinação (pendor do plano com a horizontal).

As diaclases são os planos de descontinuidade mais frequentes nos maciços rochosos e correspondem, segundo a ISRM (1978), a superfícies que ocorrem no material-rocha ao longo das quais não existe rejeito entre os blocos rochosos. No entanto, o movimento ao longo das diaclases, mesmo sendo praticamente imperceptível, não reúne o consenso na comunidade

científica. Do ponto de vista da mecânica das rochas, importa determinar a amplitude da abertura da diaclase e a sua variação ao longo do plano de diaclasamento (em particular, verificar se ocorrem, ou não, pontos de contacto entre as duas superfícies separadas pelo diaclasamento). Quando preenchida, a natureza do preenchimento tem de ser muito bem especificada (em particular, as suas características mecânicas). Se a diaclase não estiver preenchida, é importante, ainda do ponto de vista geotécnico, caracterizar a sua rugosidade (ISRM, 1981): verificar se as suas paredes são lisas, estriadas ou polidas e se são planas, onduladas, ou denteadas. Destas características dependerá o comportamento mecânico das discontinuidades.

Classificadas, igualmente, como fracturas mas de menor ocorrência, referem-se as falhas nas quais, contrariamente ao verificado nas diaclases, ocorreram movimentos relativos dos bordos.

2.3 Descrição de Maciços Rochosos

Os estudos básicos de geotecnia de maciços devem descrever e caracterizar os maciços rochosos aflorantes, com o intuito de se conhecer as propriedades geológico-geotécnicas das rochas do maciço. Estes trabalhos realizam-se durante a fase inicial da investigação “in situ”.

As descrições dos maciços rochosos com fins geotécnicos exigem atenções e medidas adicionais às geológicas, impondo-se a necessidade de estabelecer uma sistemática orientação metodológica que uniformize critérios e facilite a comunicação entre todos os profissionais que tenham de realizar trabalhos semelhantes. Estas descrições podem implicar um certo grau de subjectividade que se deve evitar, na medida do possível, realizando observações sistemáticas e utilizando uma terminologia padronizada (ISRM, 1987, 1981), tendo em conta os seguintes aspectos:

- todos os factores devem ser examinados sistematicamente e numa sequência lógica;
- não se deve omitir nenhuma informação básica sobre o afloramento;
- 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 orientação sistemática para a descrição dos afloramentos de maciços rochosos pode-se resumir nas seguintes etapas (ISRM, 1987, 1981):

- descrição das características gerais do afloramento – geologia estrutural, tipo de discontinuidades, composição mineralógica e textural do material-rocha, grau de alteração;
- divisão em zonas geotécnicas e descrição geral de cada zona – a divisão em zonas mais ou menos homogêneas 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. Dever-se-ão descrever as características gerais de cada zona;
- descrição pormenorizada de cada zona geotécnica, 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; CFCCF, 1996);
- descrição dos parâmetros geológicos e geométricos do maciço rochoso, que permite realizar-se a partir de dados recolhidos em cada estação geológico-geotécnica; para a sua consecução, devem estabelecer-se parâmetros referentes ao número de famílias de discontinuidades, orientação e características representativas de cada uma delas, determinando a sua importância relativa, o tamanho e a forma dos blocos, o grau de alteração, etc.;
- caracterização global e classificação geomecânica do maciço rochoso com o objectivo de definir a qualidade e resistência do maciço, através da quantificação de parâmetros geológico-geotécnicos e da modelação físico-matemática.

O primeiro passo a seguir no estudo de um afloramento de um maciço rochoso deverá ser a identificação do mesmo e a sua descrição geral. Posteriormente, leva-se a cabo a divisão em zonas – denominadas por zonas geotécnicas – e faz-se a descrição das mesmas (por exemplo, a heterogeneidade litológica, os elementos geológico-estruturais, o grau de fracturação, o grau de alteração, etc.). É de extrema utilidade a realização de fotografias e desenhos esquemáticos do afloramento, onde se deverá indicar as características geológico-geotécnicas básicas de cada zona. A divisão em zonas geotécnicas de maciços rochosos, mais ou menos homogêneas, realiza-se a partir de critérios essencialmente litológicos, geológico-estruturais e geotécnicos. A descrição de cada zona deve ser o mais objectiva e clara possível, recorrendo-se,

normalmente, a uma terminologia recomendada para efeitos de geologia aplicada à engenharia (e.g., ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCFF, 1996).

Em determinadas ocasiões, podem existir poucos afloramentos ou estes apresentarem uma extensão reduzida, o que dificultará a tarefa de estudo desse maciço. Nestes casos, recomenda-se as seguintes metodologias de acção (Ferrer & González de Vallejo, 1999):

- 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: o estudo realizar-se-á com base em critérios litológicos e estruturais considerando os sectores mais ou menos homogéneos do afloramento; não é conveniente estabelecer demasiadas zonas;
- Identificação de zonas singulares: são aquelas zonas, 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; por exemplo, falhas, filões, zonas de brecha, cavidades, zonas de fluxo de água, etc. Estas zonas devem ser tratadas e descritas de forma individualizada.

2.4 Parâmetros do maciço rochoso

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 discontinuidades, devem ser considerados outros aspectos representativos do conjunto, tais como (ISRM, 1978, 1981, 2007):

- número e orientação das famílias de discontinuidades;
- tamanho de blocos e intensidade da fracturação;
- grau de alteração.

O maciço pode classificar-se, como se referiu, pelo número de famílias, variando entre maciços rochosos maciços, com apenas uma família de descontinuidades, e maciços com três ou mais famílias de descontinuidades (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	Duas famílias de descontinuidades.
V	Duas famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VI	Três famílias de descontinuidades.
VII	Três famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades.
IX	Maciço de rocha esmagada, com o aspecto idêntico ao de um solo.

As características das paredes dos blocos de material-rocha adjacentes à descontinuidade são outro aspecto a ter em conta por serem condicionantes da sua resistência e das características de condutividade hidráulica (ISRM, 1978). Deste modo, 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, em regra, 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, sendo a dureza determinada com esclerómetro portátil (martelo de Schmidt), ou simplesmente por resposta ao toque com o martelo de Geólogo (Quadro 3).

Quadro 3. Terminologia para caracterização do estado de resistência (ISRM, 1978).

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

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).

As rochas apresentam-se à superfície, normalmente, meteorizadas, e, por vezes, alteradas por processos hidrotermais e erosivos. A meteorização (ou alteração meteórica; Aires-Barros, 1991), geralmente, afecta as paredes das discontinuidades de um modo mais vincado que o interior da massa rochosa. Resulta daqui a necessidade de avaliar tanto o grau de alteração do

maciço rochoso como do material-rocha que constitui a parede. O quadro 4 apresenta uma metodologia qualitativa que permite descrever o grau de alteração meteórica do material rochoso e das descontinuidades.

Quadro 4. Estados de alteração (adaptado de ISRM, 1978).

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

A determinação do estado de alteração de um maciço rochoso ou do material-rocha é também um factor importante a considerar. Este aspecto pode ser determinado de uma maneira quantitativa, recorrendo à medição de parâmetros como a resistência da rocha, a velocidade de propagação de ultra-sons (e.g., ensaios geofísicos de refração sísmica) ou outros. A ISRM (1978, 1981) propôs que os graus de alteração a considerar fossem constituídos por 5 termos; porém, a GSE (1995) prefere aplicar 6 termos. No entanto, considera-se em geotecnia (ISRM, 1981), frequentemente, a utilização de uma versão simplificada com 3 termos (quadro 5).

Na versão simplificada, as três classes poderão ter as seguintes designações (ISRM, 1981):

- W_{1-2} – rocha sã a pouco alterada;
- W_3 – rocha medianamente alterada;
- W_{4-5} – rocha muito alterada a decomposta.

Quadro 5. Graus de alteração propostos pela ISRM (1981).

Grau de alteração	Nomenclatura	Características	Grau de alteração	
Sã ou não alterada.	W_1	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa.	W_{1-2}	
Ligeiramente alterada.	W_2	Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração). Registrar qual o mineral com mudança de coloração e se possível indicar o grau de descoloração.		Rocha sã a pouco alterada.
Moderadamente alterada.	W_3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original.	W_3	Rocha medianamente alterada.
Muito alterada.	W_4	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo. A rocha é muito friável.	W_{4-5}	Rocha muito alterada a decomposta.
Completamente alterada.	W_5	Todo o material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo residual.		

Na descrição das diferentes famílias de descontinuidades num maciço rochoso incluem-se os seguintes parâmetros geológico-geotécnicos (figura 5):

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

Alguns destes parâmetros, como a rugosidade, a abertura e o enchimento, determinam o comportamento mecânico e a resistência dos planos de descontinuidade, a descrição e medições destes parâmetros são realizados, em regra, no campo.

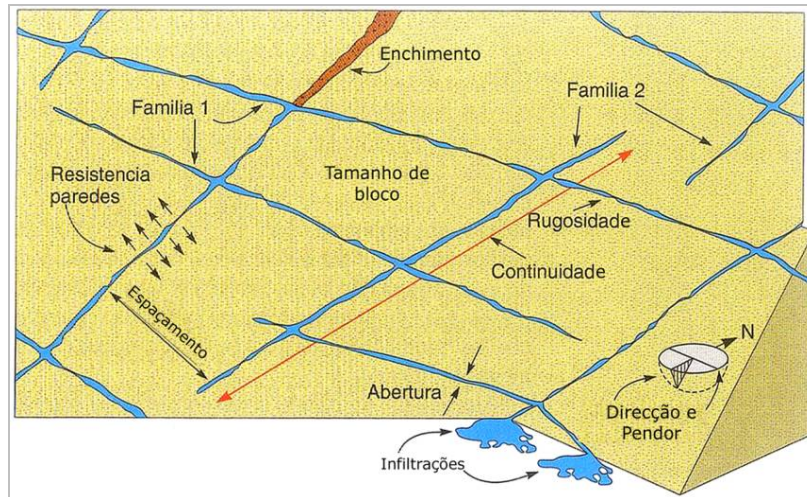




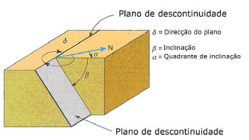
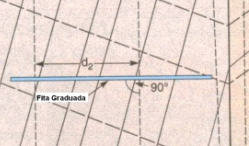
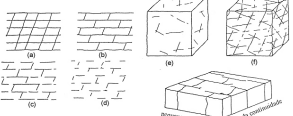

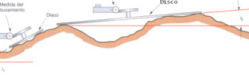
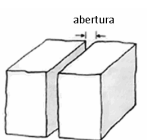


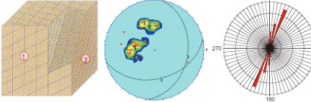


Figura 5. Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

O quadro 6 sintetiza, de uma forma esquemática e resumida, os diferentes parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos, bem como resume as principais características de cada um dos parâmetros.

Quadro 6. Síntese esquemática e resumida dos diferentes parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos.

Características da matriz rochosa	Breve descrição (adaptado ISRM, 1978, 1981, 2007; GSE, 1995)	Procedimentos/Equipamentos	Observações	Esquema
Identificação: Textura, petrofábrica	A identificação visual de uma rocha estabelece-se a partir da sua composição e da sua textura ou relações entre os seus minerais. A este critérios descritivos acrescentam-se as características genéticas, quando estas podem ser deduzidas da paragénesis mineral, composição química, forma e estrutura do reservatório, e relações temporais e espaciais com outras rochas. Na prática observa-se a composição mineralógica, a forma e tamanho dos grãos, a cor e transparência e a dureza.	Inspeção visual; martelo de geólogo; lupa	Para uma correcta observação destas propriedades é necessário limpar a rocha de forma a eliminar qualquer película superficial de alteração. Segundo o tipo de rocha, pode ser determinada a possível presença de foliação e qual o tipo (foliação magmática, de fluxo, tectónica)	
Grau de alteração	A alteração é extremamente importante, na medida em que condiciona fortemente as propriedades mecânicas, tais como a porosidade, permeabilidade e deformabilidade, diminuindo, simultaneamente, a sua resistência. A alteração de uma rocha consiste na sua desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes químicos e físicos naturais, que transformam a rocha noutro produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente.	Inspeção visual; martelo de geólogo		
Resistência à compressão	Os parâmetros de resistência podem ser determinados nos afloramentos rochosos a partir de ensaios geomecânicos, quer em laboratório (PLT), quer <i>in situ</i> (esclerómetro portátil).	Ensaio com esclerómetro portátil (ou "Martelo de Schmidt") e Ensaio de Carga Pontual (PLT)		 
Características das discontinuidades	Breve descrição	Equipamentos	Observações	Esquema
Atitude geológica (direcção e inclinação)	A direcção é o ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético; a inclinação é o ângulo que a recta de maior declive do plano (perpendicular à direcção) define com o plano horizontal.	Bússola de Geólogo	Para a leitura da direcção a bússola deverá estar o mais horizontal possível, para que a leitura seja o mais rigorosa possível.	
Grau de fracturação (fracture intercept / espaçamento; ISRM, 1981)	É a distância média entre discontinuidades sucessivas, medida segundo a intersecção com a linha de amostragem (<i>scanline</i>) - espaçamento. Este conceito não pressupõe, tal como refere a ISRM (1981), uma estimativa do espaçamento entre todas as discontinuidades da mesma família, mas sim, como referido pela ISRM (1981, 2007), o espaçamento entre todas as discontinuidades cartografadas, se possível segundo uma linha de amostragem no maciço.	Fita graduada	Sempre que possível dever-se-á registar o grau de fracturação global (independentemente das famílias consideradas) e, se possível, o espaçamento entre cada família (ISRM, 1981)	
Continuidade ou persistência	Continuidade ou persistência é o comprimento superficial de uma dada discontinuidade. É um parâmetro difícil de quantificar em afloramentos pois geralmente apenas se observam dimensões aparentes.	Fita graduada	Deve-se sempre observar a extremidade da superfície, i.e., se termina em rocha ou noutra discontinuidade. Característica muito importante na definição de potenciais superfícies de rotura.	
Resistência das paredes das discontinuidades	A resistência das paredes das discontinuidades influencia directamente a sua resistência ao corte e deformabilidade. O factor mais condicionante da resistência num plano de discontinuidade é o tipo de material que resulta da meteorização da face exposta do maciço ou algum preenchimento que esta possa conter. Uma superfície lisa, limpa e pouco alterada terá uma resistência idêntica à resistência da própria matriz rochosa.	Esclerómetro portátil ou "Martelo de Schmidt"	A superfície do plano de discontinuidade deverá ser limpa antes do ensaio esclerométrico, uma vez que caso a discontinuidade apresente algum preenchimento este poderá deturpar os valores de resistência obtidos.	
Rugosidade	A rugosidade corresponde à ondulação nas superfícies das discontinuidades. De acordo com a ISRM (1978, 1981) há três tipos de superfícies de discontinuidade: denteada, ondulada e plana, as quais podem ser subdivididas em três subclasses: rugosa, lisa e estriada. Este parâmetro influencia directamente a resistência ao corte do maciço; uma maior irregularidade das superfícies implica um maior atrito entre as paredes e, assim, uma possibilidade inferior de ocorrência de rotura.	Método dos discos/ Inspeção visual	A percolação de água através das discontinuidades é fortemente influenciada pela rugosidade, uma vez que influencia o regime de escoamento.	
Abertura	Entende-se por abertura a distância entre as duas paredes de uma dada discontinuidade medida perpendicularmente ao plano da discontinuidade. Este parâmetro influencia não só a resistência ao corte do maciço, como a deformabilidade e a permeabilidade.	Fita graduada		
Preenchimento	O preenchimento das discontinuidades corresponde ao material que se encontra entre as aberturas das próprias discontinuidades. Frequentemente estes materiais são de origem argilosa, totalmente distintos da origem da matriz rochosa, no entanto, por vezes pode-se observar o próprio material-rocha, alterado e esmagado, entre as discontinuidades. O tipo de preenchimento condiciona as condições de circulação da água no maciço, bem como a sua resistência ao corte.	Inspeção visual		
Percolação de água	A percolação de água através do maciço rochoso resulta sobretudo do fluxo de água através da rede de discontinuidades. A presença de água nos maciços está muitas vezes na origem de problemas de estabilidade e de rotura.	Inspeção visual		
Número e orientação das famílias de discontinuidades	O número de famílias de discontinuidades e o seu espaçamento determinam a intensidade do grau de fracturação e o tamanho dos blocos da matriz rochosa, os quais são responsáveis pelo comportamento mecânico do maciço. A orientação média de uma família é avaliada mediante técnicas de projecção estereográfica ou de diagramas de rosetas, a partir de dados registado no campo. A orientação das famílias de discontinuidades pode condicionar a estabilidade do próprio maciço, bem como de estruturas implantadas nesse maciço	Blocos-diagrama; diagramas de contorno estrutural (estereogramas) e diagramas de rosetas	Nos reconhecimentos de campo devem ser registadas todas as famílias presentes. O grau de importância relativa é função da continuidade, espaçamento, abertura, etc.	

2.5 Técnica de amostragem linear aplicada às superfícies de descontinuidades

Descreve-se, em seguida, a técnica de amostragem linear de superfícies de descontinuidades ocorrentes em superfícies expostas do maciço rochoso (figura 6). Esta técnica está descrita, entre outros, por Priest & Hudson (1981), Hudson & Priest (1983), Chaminé, H. I. & Gaspar (1995), Peacock et al. (2003) e Brady & Brown (2004).

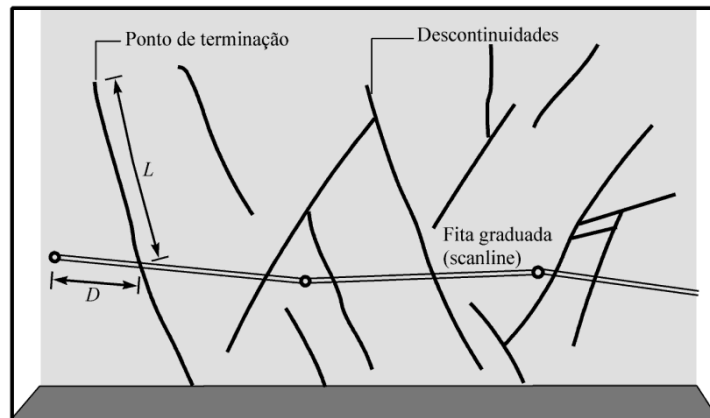


Figura 6. Esquema do dispositivo para levantamento de descontinuidades pela técnica de amostragem linear (adaptado de Brady & Brown, 2004). **D** – distância à origem da fita; **L** – semi-comprimento exposto.

A técnica de amostragem linear consiste, basicamente, na colocação de uma fita graduada em faces expostas do maciço e no registo de algumas características (geométricas e mecânicas) de todas as descontinuidades por ela intersectadas. Para cada descontinuidade que intersecta a linha de amostragem, registam-se as seguintes grandezas (ISRM, 1978, 1981; Brady & Brown, 2004):

- D: distância à origem da fita graduada;
- L: semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face de rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
- T: tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R: na rocha; D: noutra descontinuidade; O: obscura);
- Atitude da descontinuidade (direcção/inclinação), medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem com a descontinuidade;
- C: curvatura, numa escala de C1 a C5, em que C1 representa superfícies planas e C5 superfícies muito curvas;
- R: rugosidade, numa escala de R1 a R5, representando R1 uma superfície lisa e R5 uma superfície muito rugosa.

Além destas grandezas, podem ser ainda eventualmente registadas outras características das discontinuidades, tais como abertura, tipo de preenchimento, presença de água e qualquer outra característica que se entenda relevante.

Todos os dados respeitantes a cada linha de amostragem são devidamente registados numa ficha de levantamento de discontinuidades da qual constam, além das grandezas já mencionadas, as seguintes: número da linha de amostragem; localização da linha de amostragem; atitude da linha de amostragem; direcção do hasteal (ou talude) estudado; litologia; grau de alteração; data do levantamento; rubrica do responsável pelo levantamento. A figura 7 representa a ficha de levantamento geomecânico de campo, com aplicação da técnica de amostragem linear.

FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO																	CÓDIGO (ID):				
Técnica de Amostragem Linear (Scanline)																					
ORIENTAÇÃO:		do talude: N E		UNIDADE GEOLÓGICA			NOME(S):				LOCALIZAÇÃO:										
SENTIDO:		da 'Scanline': N E		ZONA GEOTÉCNICA:			DATA: / /				PEDREIRA:										
ALTURA À 'SCANLINE'/SOLO (m):		PEGA/BANCADA:																			
DESCONTINUIDADE NÚMERO	DISTÂNCIA A ORIGEM (p) (m)	LITOLOGIA	TIPO DISCONTINUIDADE	ATTITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRACTURAÇÃO	ABERTURA			TIPO DE ENCRIMENTO	RUGOSIDADE			CONTINUIDADE	TERMINAÇÃO	CURVATURA	PRESEÇA DE ÁGUA	OBSERVAÇÕES		
				N	Q			F ₁	F ₂	F ₃		F ₄	F ₅	F ₆						F ₇	F ₈

Figura 7. Ficha tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo, com aplicação da técnica de amostragem linear.

Para a determinação da resistência à compressão uniaxial (σ_c) do material-rocha, recorre-se ao designado ensaio esclerométrico. O esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) foi desenvolvido, em 1948, como ensaio de natureza não destrutiva de dureza do betão (Schmidt, 1951), sendo usado, mais tarde, para calcular a resistência das rochas (Cargill & Shakoore, 1990). Este ensaio é executado com um aparelho portátil de campo denominado *Martelo de Schmidt*, que dispõe de uma massa de aço no seu interior e de uma ponta retráctil, a qual, ao ser pressionada contra a superfície da rocha, faz com que a massa de aço ressalte. Para que o

ensaio se realize em perfeitas condições, é fundamental uma correcta limpeza do local do ensaio, a ausência de fissuras, bem como a eliminação da patine de rocha meteorizada. Este ensaio permite estimar, de forma aproximada, a resistência à compressão simples, sendo aplicado fundamentalmente à matriz rochosa e também às descontinuidades. A aplicabilidade deste ensaio é bastante elevada, devido à sua simplicidade, rapidez e fácil portabilidade.

Na execução do ensaio, o aparelho deve colocar-se perpendicularmente ao plano de ensaio. Em função da dureza da rocha, a massa de aço sofre um maior ou menor ressalto, sendo o valor registado numa escala do aparelho (10-100). Em cada ponto, registam-se 10 percussões com o martelo e eliminam-se os 5 valores mais baixos; por fim, considera-se o valor médio destas medições. Seguidamente, recorre-se ao ábaco de Miller para determinar a resistência à compressão simples, a partir da dureza de Schmidt e da densidade média do material-rocha (ISRM, 1978), sendo classificada de acordo com o quadro 7.

Quadro 7. Resistência à compressão simples (segundo a ISRM, 1978, 1981).

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

2.6 Desmonte de maciços rochosos

Generalidades

A perfuração do maciço rochoso é a primeira actividade no processo de transformação que vai desde a identificação do georrecurso (maciço) até ao que resultará num produto final. A forma como esta operação é executada, é, numa primeira fase, determinante para o sucesso do desmonte com recurso a explosivos e, conseqüentemente, terá igualmente uma influência determinante em todas as actividades subsequentes, nomeadamente no carregamento e detonação, na granulometria obtida após detonação, na fragmentação secundária, na carga e transporte e na britagem (Figura 8).

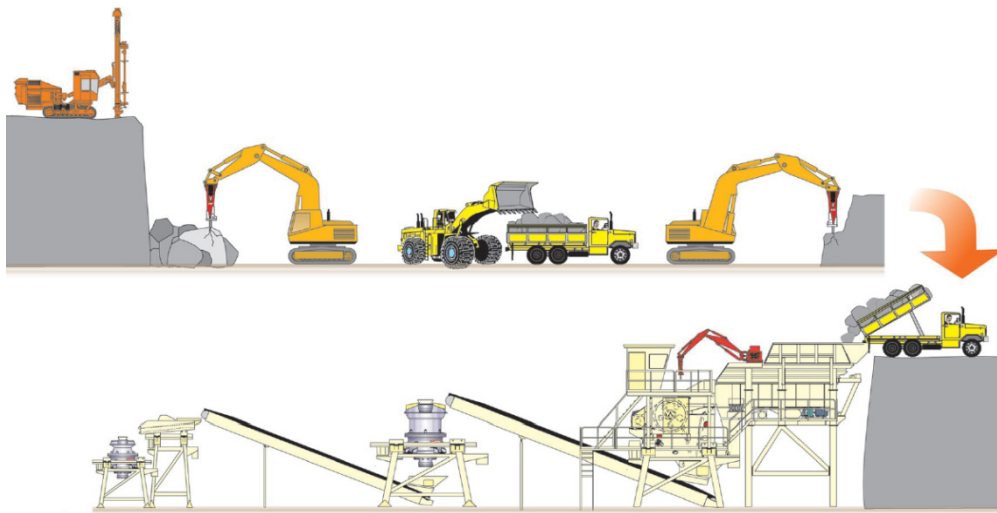


Figura 8. Operações da indústria extractiva e transformadora de rocha industrial (adaptado de *Rock Excavation Handbook*, Sandvik/Tamrock 1999).

A perfuração é uma das actividades do processo de extracção e transformação, tendo a particularidade de ser a actividade que se encontra no “topo da pirâmide”, relativamente à cronologia de execução de todas os processos que culminam no produto final. Neste contexto, a perfuração assume um papel de extrema importância, tornando-se a optimização desta actividade fundamental, pois, para além de ter uma consequência directa no seu resultado técnico-económico, a sua interligação com as actividades subsequentes (nomeadamente: 2) Carregamento e detonação; 3) Fragmentação secundária; 4) Carga e transporte e 5) Britagem) faz com que o desempenho/resultado destas esteja intimamente ligado com o sucesso da perfuração (Galiza et al. 2008).

Esta operação envolve três grupos de parâmetros, a saber (e.g., Persson et al. 1993, Jimeno 1995, Dinis da Gama 1971, 1995, 1996, Singh et al. 1998, Holmberg 2003, Brady e Brown 2004,

Hoek 2007): i) geológico-estruturais, geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso; ii) conjunto carro, martelo e ferramentas de execução; iii) geometria do diagrama de fogo. As percentagens, que as principais operações envolvidas nesta indústria representam, em termos de custo, não são equitativamente distribuídas (perfuração, carregamento/detonação, fragmentação secundária; carga e transporte e britagem) (Figura 9).



Figura 9. Representação esquemática das actividades de Extração e Transformação de pedra natural e das consequências que a execução da perfuração tem nas actividades subsequentes (adaptado de Fonseca,2008).

A operação de britagem representa cerca de metade dos custos totais de operação, mas é, de facto, a operação mais atractiva para optimização, devido ao seu peso. Por outro lado, é a última do processo de extração e transformação, estando a sua rentabilidade dependente da qualidade com que as operações antecedentes tenham sido executadas. A rentabilidade ou produtividade com que a carga e o transporte do material desmontado são executados depende essencialmente do resultado do desmonte, em que uma boa fragmentação perspectiva um bom rendimento em termos de factor carga. Apesar desta operação se apresentar como a segunda mais dispendiosa, continua a depender bastante das anteriores. A fragmentação secundária depende do resultado granulométrico obtido no desmonte com recurso a explosivos.

A perfuração, carregamento, detonação e fragmentação secundária, em conjunto representam menos encargos financeiros que as duas restantes. Individualmente, no entanto,

o seu papel é preponderante na rentabilidade de todo o processo de transformação. A perfuração é a primeira operação a ser executada, e, apesar de representar um dos menores custos de operação, a par do carregamento e rebentamento, é das que mais influencia a optimização das restantes. As cinco principais operações de extracção e transformação funcionam em cadeia, de uma forma sequencial, sendo que a qualidade/rentabilidade com que uma operação é realizada depende da anterior e influencia a seguinte (Galiza et al., 2008; Fonseca et al., 2010). A natureza desta operação, juntamente com a posição de topo que ocupa na cadeia de produção, torna-a merecedora de uma atenção e dedicação especial. Em particular, o desmonte de maciços rochosos com recurso a explosivos é constituído por um ciclo que engloba duas das operações supracitadas (perfuração, carregamento e detonação) resultantes de um enquadramento e análises técnicas fundamentais (Galiza, 2001). A detonação é a última operação antes de atingir o objectivo final do desmonte – a fragmentação do maciço rochoso (Figura 10). A granulometria resultante dessa fragmentação, juntamente com as vibrações transmitidas ao terreno, ruído e onda aérea, projecção de blocos e poeiras que possam existir, ditará o sucesso com que o desmonte é realizado.

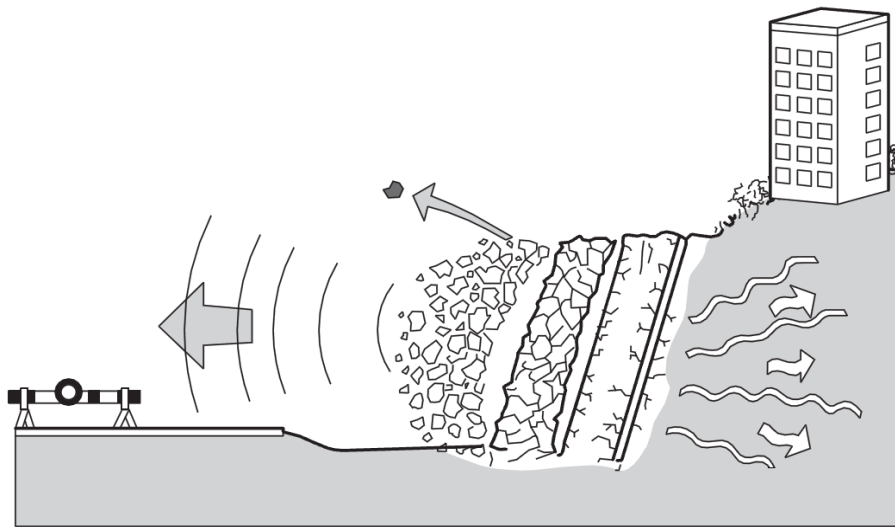


Figura 10. Factores resultantes do desmonte de maciços rochosos (adaptado de *Rock Excavation Handbook*, Sandvik/Tamrock, 1999).

Pelo supracitado, fica comprovado que a perfuração tem, de facto, uma importância especial em todos estes processos, que se traduzem em inúmeros benefícios técnico-económicos ao longo do processo de desmonte e transformação de rocha para fins industriais.

Os benefícios de uma perfuração alinhada nas várias operações de desmonte, carga, transporte e britagem são, em regra, os seguintes (Figura 11):

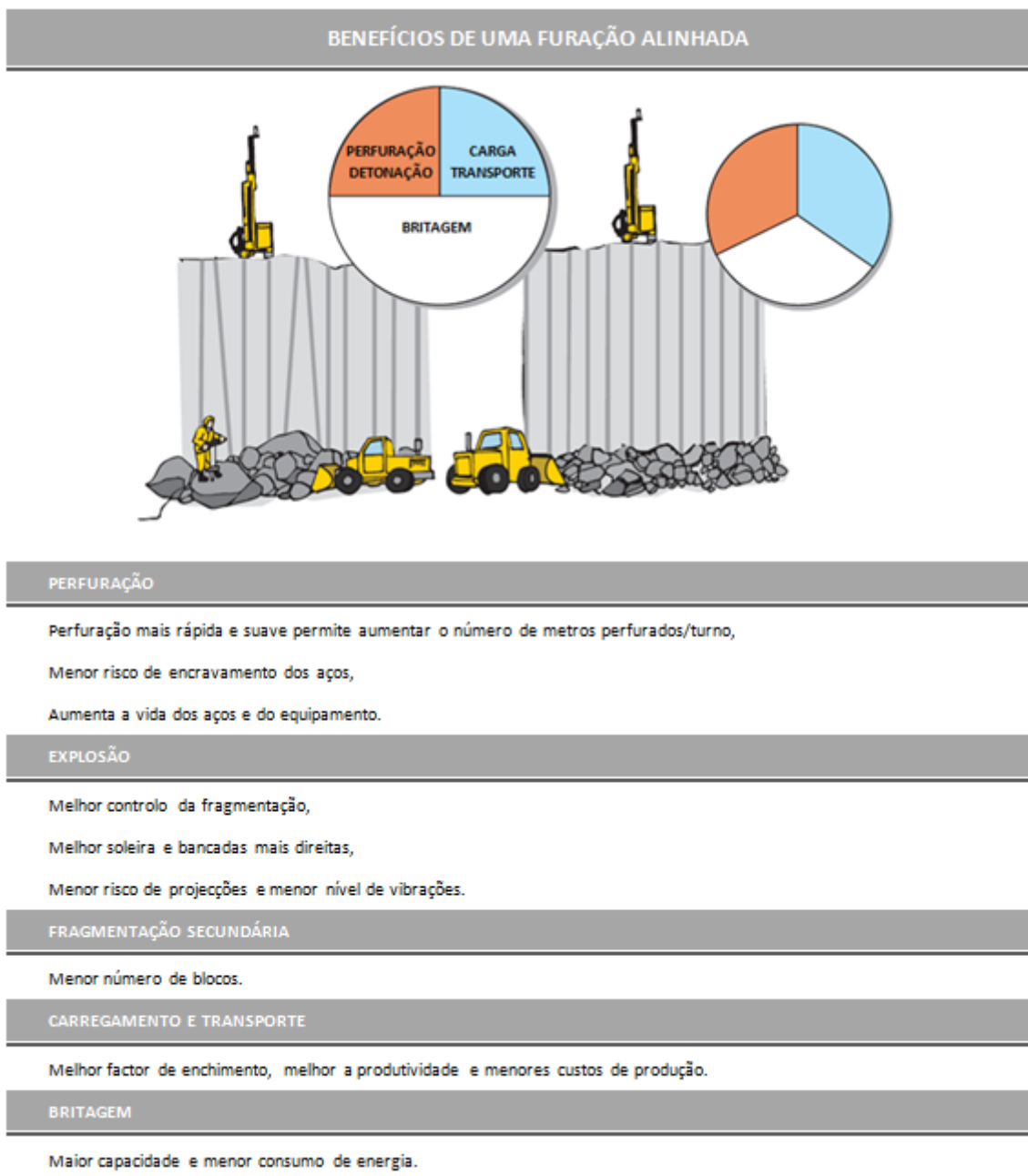


Figura 11. Benefícios de uma perfuração alinhada.

A optimização de qualquer operação de desmonte com explosivos requer o conhecimento prévio do grau de fracturação natural, do grau de alteração e do grau de resistência, no intuito de se definir a compartimentação do maciço rochoso, ou seja, da caracterização geológico-estrutural e geotécnica do maciço (Rocha, 1981; ISRM, 1981; Dinis da Gama, 1995) (Figura 12).

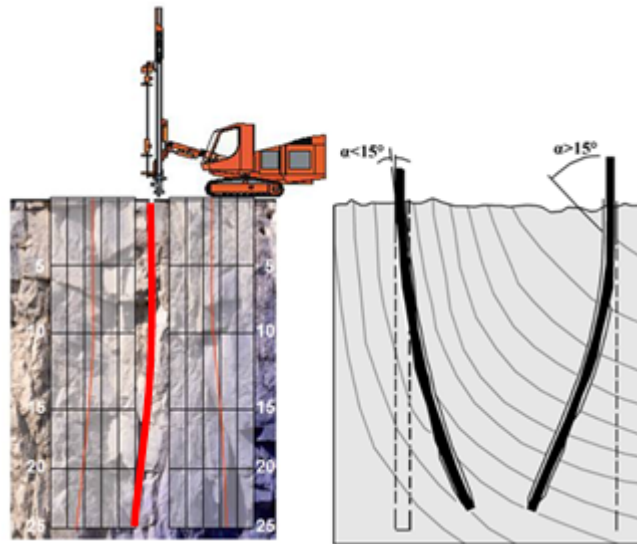


Figura 12. Esquematização visual dos parâmetros do maciço rochoso na análise dos desvios de perfuração.

Durante a realização de um furo, a interacção entre as ferramentas de execução e o meio descontínuo e anisotrópico, como é um maciço rochoso fracturado, pode ser imprevisível do ponto de vista teórico, principalmente quando a caracterização do factor “maciço rochoso” é escassa. Neste aspecto, as características geológicas, geotécnicas e geomecânicas do maciço rochoso, as ferramentas de execução, assim como a geometria do próprio diagrama de fogo, são parâmetros influentes na qualidade da perfuração. A linearidade do furo é fundamental para uma boa distribuição do explosivo na massa rochosa que se pretende desmontar, como, aliás, se poderá analisar mais adiante. É um desafio aliciante compreender a forma como estes parâmetros interagem entre si e de que forma poderão contribuir para os desvios de perfuração, i.e., compreender que tipo e amplitude de desvio poderão causar a conjugação de determinadas características dos grupos referidos (Ramos, 2008). Existem fórmulas empíricas que estimam o desvio em função do diâmetro e comprimentos do furo, considerando que apenas estes dois parâmetros geométricos do diagrama de fogo têm influência no desmonte (Figura 13). Segundo Langefors & Kihlstrom (1978), o desvio expectável durante a perfuração é representado pelas fórmulas seguidamente apresentadas, que permitem estimar o desvio obtido apenas em função do diâmetro e/ou comprimento do furo, onde F representa o desvio expectável para um determinado comprimento de furo (H) e d , o diâmetro de furação.

$$F = (d/1000) + 0,03.H \quad (1)$$

$$F = 0,05 + 0,03.H \quad (2)$$

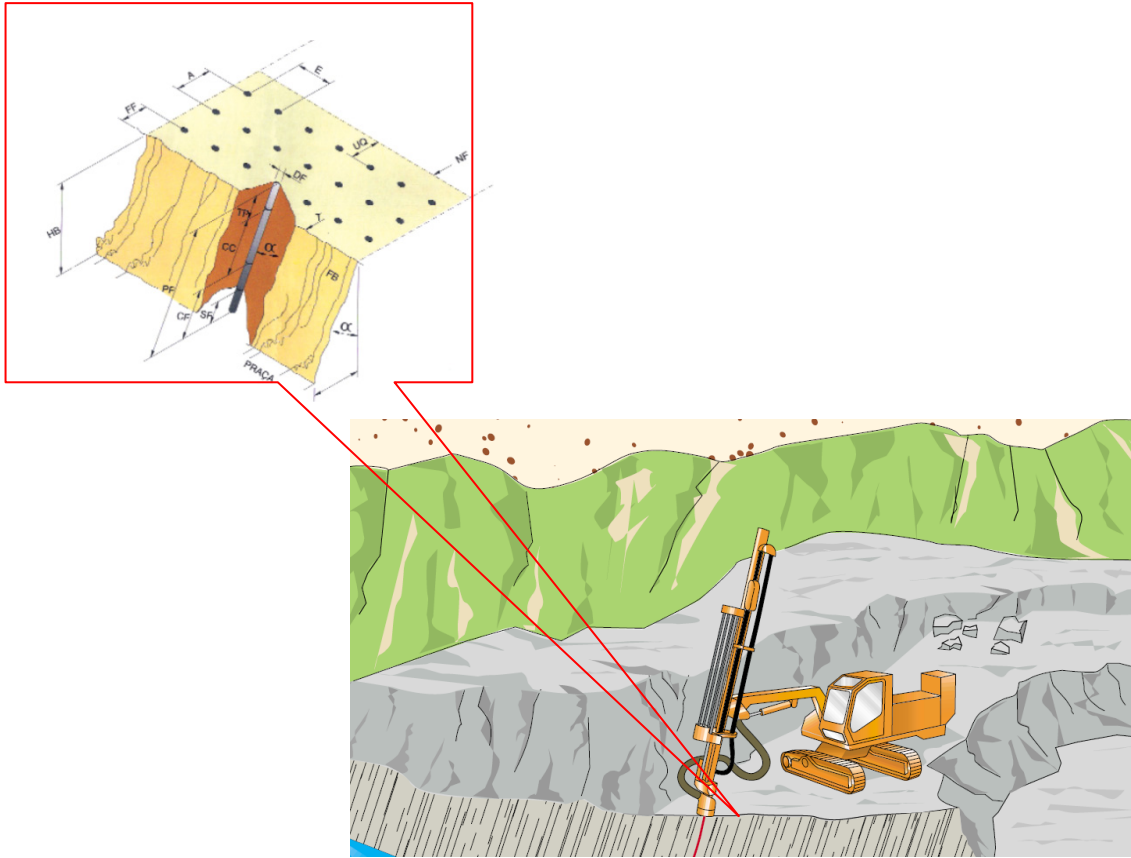


Figura 13. Parâmetros geométricos do diagrama de fogo e ferramentas de execução (equipamento de perfuração mais acessórios)

Perfuração vs Desvio

Na operação de perfuração deve-se partir do seguinte pressuposto: mesmo sem a influência de um qualquer erro humano de perfuração, todos os furos apresentam desvio, por menor que seja (Ramos, 2008), (Figura 14).

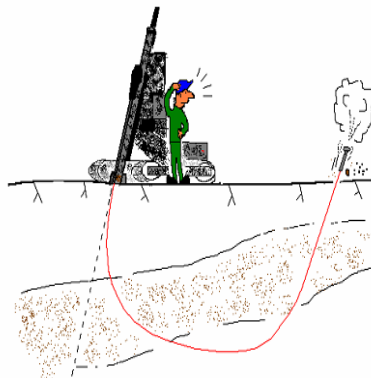


Figura 14. Desvio de perfuração.

Ao abordar-se a operação de perfuração na vertente da qualidade da sua execução, devem ser avaliados dois aspectos importantes: a posição e a trajectória do furo. Isto porque, mais do que avaliar a posição em que o furo se encontra ao atingir a cota pretendida (Figura 15), é preciso avaliar a trajectória que ele segue, para melhor se compreender os erros ou factores de diferentes naturezas que podem estar na génese do tipo e amplitude do desvio.

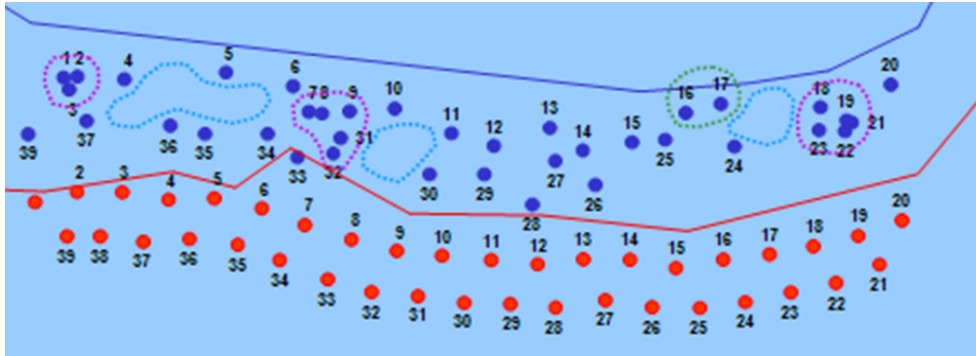


Figura 15. Exemplo de posicionamento dos furos à superfície (a vermelho) e à cota pretendida (a azul).

Em primeiro lugar, há que diferenciar erro e desvio de perfuração: o erro está associado a factores que se podem corrigir ou evitar, e, normalmente, a um erro está associado um desvio; o desvio sem origem num erro está normalmente ligado a factores que não se poderão evitar como, por exemplo, a anisotropia do maciço rochoso ou mesmo um parâmetro geométrico da pega, sendo que talvez se possam minimizar ou contornar. Os erros de perfuração devem ser perfeitamente identificados para posteriormente serem corrigidos e evitados. Os desvios de perfuração devem ser estudados para, *a posteriori*, serem minimizados ou contornados.

Tipos de desvios

Desvio associado a erros de execução da perfuração e/ou erros motivados pelas condicionantes da própria bancada (regularidade e limpeza da bancada):

- 1) Posicionamento
- 2) Emboquilhamento
- 3) Direcção
- 4) Inclinação
- 5) Comprimento/Cota

Desvio associado à anisotropia do próprio maciço rochoso e suas características geológicas, geotécnicas e geomecânicas:

- a) Flexão – desvios progressivos mas constantes ao longo do furo.
- b) Pontual – desvios pontuais da trajectória do furo inerentes às anisotropias do maciço rochoso.

Os quadros 8 a 11 descrevem os cinco tipos de erros de perfuração, apontando as suas possíveis causas e propondo medidas de correcção ou de minimização. Posteriormente, na fase de análise de resultados, poderá verificar-se a percentagem de furos a que estão associados os tipos de erros 2, 3 e 4, visto que os erros do tipo 1 e 5 são pouco relevantes para este estudo.

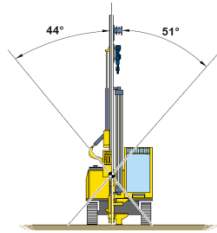
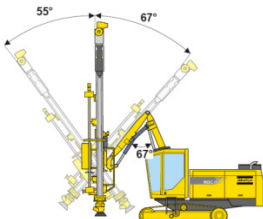
Quadro 8. Erro de posicionamento (adaptado de Ramos, 2008).

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
1) POSICIONAMENTO	Este tipo de erro é o primeiro erro possível de se cometer na execução de um furo. Consiste em não iniciar o furo no ponto previamente marcado.	Técnicas de marcação pouco eficazes e inequívocas. A utilização de conjuntos de pedras encasteladas da própria bancada para a marcação dos furos não é aconselhável pela susceptibilidade de deslocamento das mesmas, devido à própria movimentação do carro de perfuração.	Deve-se utilizar sempre spray para marcação dos furos, sempre que possível, no próprio maciço. Caso o estado da bancada não o permita, deve-se fazer uma marca numa pedra o mais achatada possível de forma a não se deslocar com a movimentação do carro de perfuração.
		A própria marcação da pega não respeita os parâmetros geométricos definidos, que neste caso serão o espaçamento (E) e a distância à frente (V).	Utilização de ferramentas de auxílio, como é o caso de uma corda para o alinhamento das fiadas e uma fita ou vara graduada para marcação do espaçamento e distância à frente. Implementação dos furos com sistema GPS.

Quadro 9. Erro de emboquilhamento (adaptado de Ramos, 2008).

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
2) EMBOQUILHAMENTO	Considera-se como emboquilhamento a zona entre a boca do furo e um comprimento de 1 a 2m de vara introduzida no maciço (dependendo do estado da bancada), ao qual poderá estar associado um erro relacionado com as condicionantes da mesma, como é o caso da regularidade e/ou altura de material partido e solto na superfície.	Bancadas irregulares com zonas de difícil estabilização do carro de perfuração e coluna. Bancadas com elevada altura (1, 2, 3m) de material deixado depositado na superfície da bancada para a tornar mais regular.	Para uma bom emboquilhamento é importante uma bancada regular sem material partido e/ou solto na sua superfície. Para tal é de evitar os excessos ou défices de sub-furação assim como deixar depositado material do próprio desmonte ou depositar material de outra proveniência na bancada para a tornar mais regular.

Quadro 10. Erro de direcção e inclinação (adaptado de Ramos, 2008).

DIRECÇÃO		INCLINAÇÃO	
			
ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
3) DIRECÇÃO	A direcção do furo não está de acordo com o ângulo previamente definido.	Estes tipos de erros estão directamente ligados com os dispositivos de controlo e monitorização que o equipamento de perfuração dispõe.	Devem-se avaliar sempre os instrumentos de controlo e monitorização que os equipamentos de perfuração dispõem, verificando que tipos de dispositivos comportam, que parâmetros controlam e com que fiabilidade o fazem. No caso dos equipamentos mais antigos, com dispositivos limitados, deve-se ter bastante rigor em relação ao posicionamento do carro e consequentemente da coluna, de forma a minimizar ao máximo os erros de direcção e inclinação.
4) INCLINAÇÃO	A inclinação do furo não está de acordo com o ângulo previamente definido.		

Quadro 11. Erro de Comprimento/Cota (adaptado de Ramos, 2008).

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
5) COMPRIMENTO/COTA	O comprimento do furo e/ou a cota atingida pelo furo não estão de acordo com o previamente definido.	Estes tipos de erros podem estar directamente ligados com os dispositivos de controlo e monitorização que o equipamento de perfuração dispõe, assim como podem ser gerados pela influência de desvios de perfuração e/ou outros erros, como direcção e/ou inclinação.	Caso o equipamento de perfuração possua um sistema de controlo de cotas, este tipo de erros deixa de existir. Caso o equipamento possua dispositivo de controlo de comprimento do furo, deve-se ter em consideração o relevo da superfície da bancada que se pretende desmontar para definir com rigor o comprimento com que cada furo deve ser executado. Nestes casos, a utilização de uma corda esticada e nivelada poderá facilitar a definição do comprimento de cada furo.

Para identificação das causas e dos parâmetros que poderão estar na génese dos desvios, a cada plano de análise dos furos [direcção (x) e inclinação (y)] foi atribuído um código para cada tipo de desvio, em função de três vertentes de análise: 1) Desvio devido a erro de emboquilhamento; 2) Desvio pontual; 3) Desvio de flexão.

Quadro 12. Matriz de avaliação do tipo de desvio (adaptado de Ramos, 2008).

CODIFICAÇÃO DOS FUROS NOS DOIS PLANOS DE ANÁLISE (X) e (Y)					
Desvio	Tipo	Esquema	Sentido	Código	Avaliação
X	Emboquilhamento		Para a esquerda	1	Primeiros 2m
			Centrado	2	Primeiros 2m
			Para a Direita	3	Primeiros 2m
	Pontual		Para a esquerda	1	Ao longo do furo
			Não apresenta	2	Ao longo do furo
			Para a direita	3	Ao longo do furo
	Flexão		Para a esquerda	1	Ao longo do furo
			Não apresenta	2	Ao longo do furo
			Para a direita	3	Ao longo do furo
Y	Emboquilhamento		Para a frente	1	Primeiros 2m
			Centrado	2	Primeiros 2m
			Para a retaguarda	3	Primeiros 2m
	Pontual		Para a frente	1	Ao longo do furo
			Não apresenta	2	Ao longo do furo
			Para a retaguarda	3	Ao longo do furo
	Flexão		Para a frente	1	Ao longo do furo
			Não apresenta	2	Ao longo do furo
			Para a retaguarda	3	Ao longo do furo

A título de exemplo, um furo que apresente um desvio de emboquilhamento para a direita acompanhado por uma flexão para o mesmo lado e sem desvio pontual, segundo a matriz de classificação (Quadro 12), é um furo com o código 332 no plano de análise da direcção (x). A

codificação de todos os furos permitirá atribuir cotas de representatividade aos tipos de desvio mais frequentes, para os quais se pretende identificar as causas.

Serve, como exemplo de codificação, o tipo de desvio do furo apresentado no gráfico da Figura 16 para melhor compreensão da sua aplicabilidade.

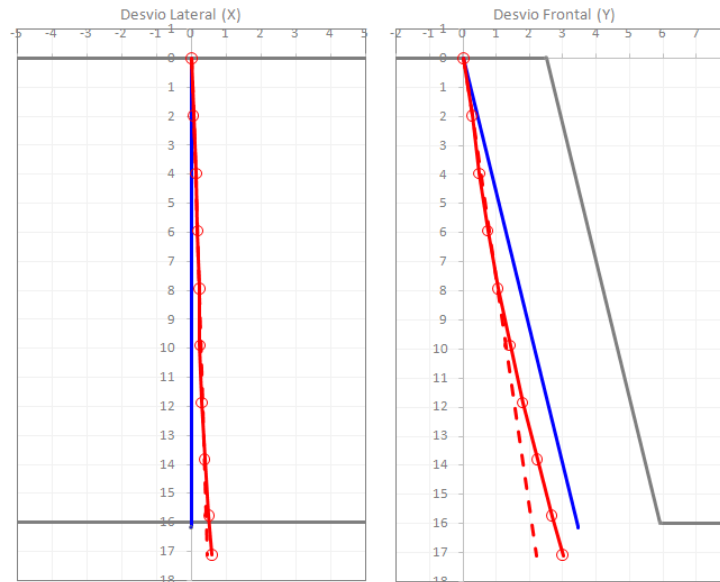


Figura 16. Desvio lateral (COD:222) e frontal (COD:211).

Esta codificação permitirá uma fácil identificação dos tipos de desvio mais frequentes e posteriormente uma análise de causas focada nos pontos mais problemáticos, permitindo uma actuação mais concisa e eficaz na atenuação dos desvios resultantes. Esta identificação do tipo de desvios associada a cada furo nas três vertentes de análise do mesmo (emboquilhamento, pontual e flexão), nos dois planos de análise (X e Y), permite uma inventariação transversal de todos os desvios medidos, perspectivando inúmeras análises dinâmicas mas sempre na mesma linha de classificação.

Parâmetros intervenientes na génese do tipo e amplitude dos desvios de perfuração

A operação de perfuração ou, mais restritivamente, o furo, surge de uma interacção entre as ferramentas de execução e o maciço rochoso, segundo uma geometria imposta pelo diagrama de fogo. Nesta interacção, estão envolvidos vários factores com intervenção na qualidade da perfuração. A estes factores estão associados determinados parâmetros influentes (Figura 17) que, posteriormente, serão criteriosamente parametrizados, de forma a facilitar a posterior análise da origem dos desvios de perfuração.

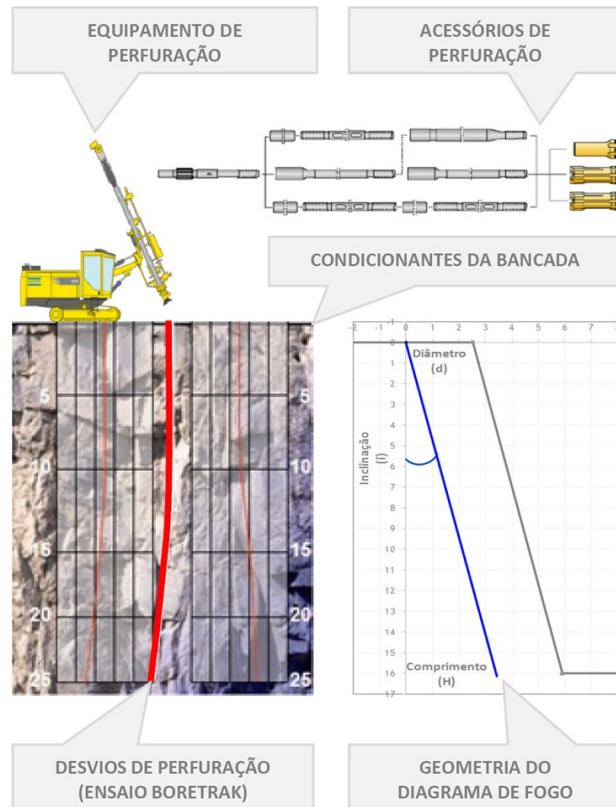



Figura 17. Parâmetros influentes nos desvios de perfuração (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).

Equipamento de perfuração

O equipamento de perfuração foi dividido em três pontos de avaliação e cada um desses pontos foi subdividido em dois ou mais parâmetros de avaliação, consoante o caso, dando origem à seguinte matriz de avaliação proposta no Quadro 13.

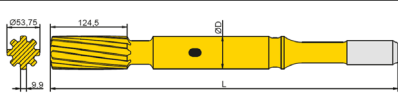
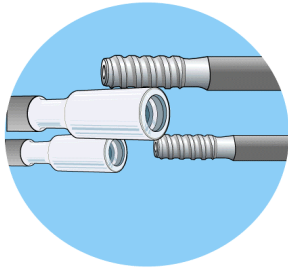
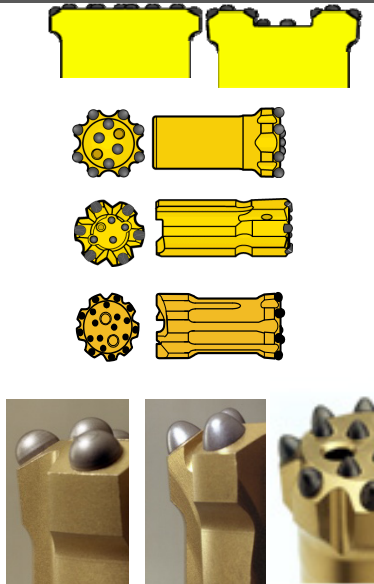
Quadro 13. Matriz de avaliação do equipamento de perfuração (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).

EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO				
Carro de perfuração		Modelo	Atlas Copco D7	
		Martelo superfície	Cop 1840HE	
Sistema de controlo e monitorização		Direcção	Não possui	
			Pouco fiável	
			Fiável	X
			Muito fiável	
Coluna		Inclinação	Não possui	
			Pouco fiável	
			Fiável	
			Muito fiável	X
Coluna	Comprimento	Sim	X	
		Não		
Coluna	Profundidade	Sim		
		Não	X	
Coluna	Rigidez	Ferro		
		Alumínio	X	
		Apoios	Insuficiente (1)	
		Suficiente (2)	X	
		Bom (3)		

Acessórios de perfuração

Os acessórios de perfuração são os responsáveis pela transmissão da energia disponível proveniente do martelo de perfuração à rocha, provocando a sua fragmentação e, por consequência, a sua perfuração. Os acessórios de perfuração considerados para estudo são: encabadouro, varas e bit. Estas ferramentas foram divididas em parâmetros, dando origem à matriz de avaliação que se apresenta no Quadro 14.

Quadro 14. Matriz de avaliação dos acessórios de perfuração (adaptado de Fonseca, 2008).

ACESSÓRIOS DE PERFURAÇÃO			
Encabadouro		Tipo	T38 T45 T51
			X
Varas		Tipo	T38 T45 T51
		Modelo	Standard Número de Varas Guia
		Marca	A B C
Uniões	As uniões não foram consideradas, visto não se utilizar este tipo de acoplamento em detrimento do actual acoplamento de rosca macho-fêmea.		
Bit		Tipo	Flat Face Drop Center
		Modelo	Standard Retrac Guia
		Marca	A B C
		Botão	Esférico Semi-Balístico Balístico
			Metros lineares executados
		Estado	Novo Afiado (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10) Usado

Geometria do diagrama de Fogo

Na figura 18, encontram-se os parâmetros da geometria do diagrama de fogo, sendo que apenas três têm influência na génese dos desvios de perfuração. O diâmetro do furo o comprimento e a inclinação, são os parâmetros que apresentam uma influência directa nos desvios de perfuração relacionados com a dimensão e disposição do furo no maciço rochoso.

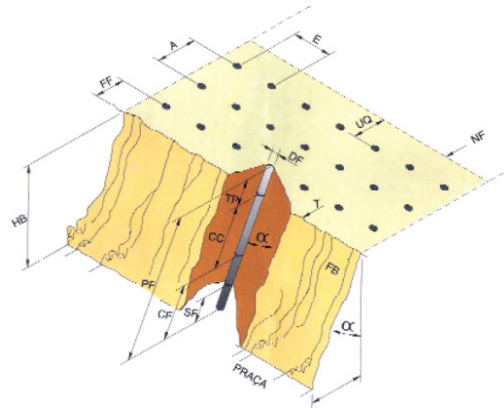


Figura 18. Parâmetros do diagrama de fogo registados na BD.

Diâmetro do furo

O diâmetro do furo é o primeiro parâmetro da geometria do diagrama de fogo que pode influenciar os desvios de perfuração. Em algumas fórmulas utilizadas para estimar o desvio expectável ($F=(d/1000)+0,3.H$, segundo Langefors & Kihlstrom, 1978) está presente, como variável influente na resultante dos desvios, o diâmetro do furo. No caso da expressão referida, o aumento do diâmetro do bit faz aumentar os desvios expectáveis, o que na prática não acontece, sendo precisamente o contrário.

Comprimento do furo

Este será provavelmente o parâmetro da geometria do diagrama de fogo que mais poderá influenciar os desvios de perfuração, principalmente a partir de uma certa profundidade. À medida que o furo avança, o ponto de emissão de energia (martelo à cabeça) está cada vez mais afastado do ponto de actuação de energia (maciço rochoso), ou seja, maior é o comprimento de varas entre esses dois pontos e maior o número de uniões, potenciando mais varejamento e maior susceptibilidade à flexão das varas, logo, provavelmente, maiores desvios de perfuração (Figura 19).

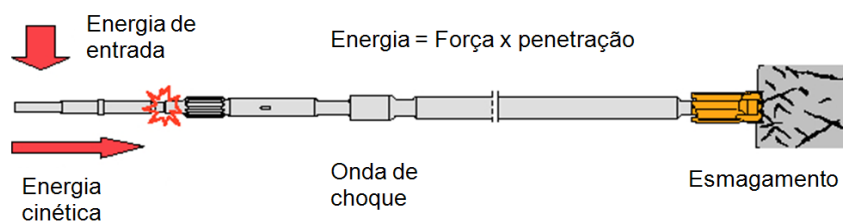


Figura 19. Esquema de transmissão de energia através dos acessórios de perfuração.

Inclinação do furo

A inclinação do furo tem principal influência no desvio frontal, tendo como um dos pontos influentes no desvio a interação ao nível do ângulo de intercepção, no plano perpendicular à frente livre, entre o furo e os elementos de descontinuidade que atravessam o maciço rochoso. Alguns autores consideram que o ângulo de intercepção, entre o furo e as descontinuidades, que determina a fronteira dos diferentes comportamentos do desvio que o furo sofre, é 15° (Figura 20).

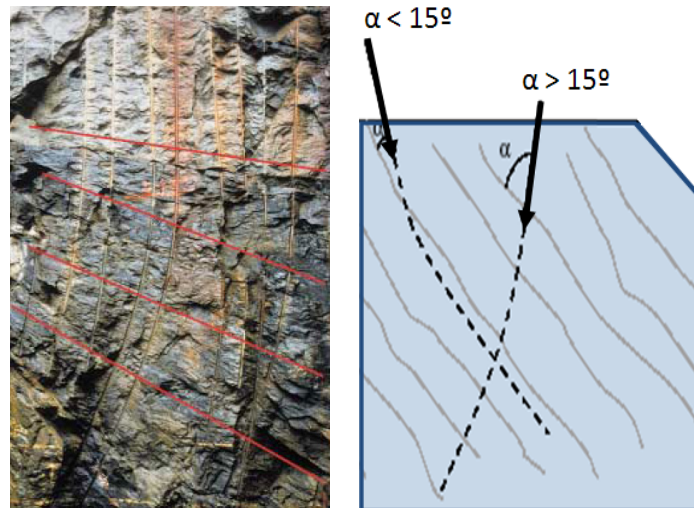


Figura 20. Ângulo de intercepção entre o furo e as descontinuidades do maciço, comportamento do desvio.

Outros parâmetros para avaliação

Existem outros parâmetros importantes de avaliar no estudo dos desvios de perfuração. Parâmetros que não estão directamente ligados às ferramentas de execução mas se encontram indirectamente ligados ao maciço remanescente resultante da interacção do desmonte e do maciço rochoso que sofre a intervenção, denominados por condicionantes do maciço rochoso (Ramos, 2008; Fonseca, 2008).

Limpeza da bancada (emboquilhamento)

A bancada deve estar o mais limpa possível, isto é, com o mínimo de material solto e/ou partido depositado na sua superfície. Por vezes, a operação de limpeza dá origem a uma bancada irregular. Mesmo assim, essa irregularidade representa um mal menor, visto que a altura de material partido que pode estar depositado na bancada prejudica mais a qualidade da perfuração do que propriamente a irregularidade da mesma. Em suma, se possível, bancadas limpas e regulares, senão bancadas limpas mesmo que irregulares (Quadro 15).

Quadro 15. Vantagens e desvantagens de bancadas limpas, mas irregulares (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).

BANCADAS LIMPAS MAS IRREGULARES	
Desvantagens	Vantagens
Maior cuidado na movimentação do equipamento;	Permite a realização do emboquilhamento directamente no maciço;
Aumento do tempo de movimentação do equipamento de furo para furo;	Melhor qualidade da perfuração que passa a depender quase que exclusivamente do equipamento e do manobrador;
Potencia erros de profundidade de perfuração.	Diminuição do tempo de ciclo total de execução do furo.

Como a limpeza da bancada tem grande influência na qualidade do emboquilhamento (Figura 21), optou-se por escalonar este parâmetro em função da profundidade a que o furo é emboquilhado em relação à superfície média da bancada.

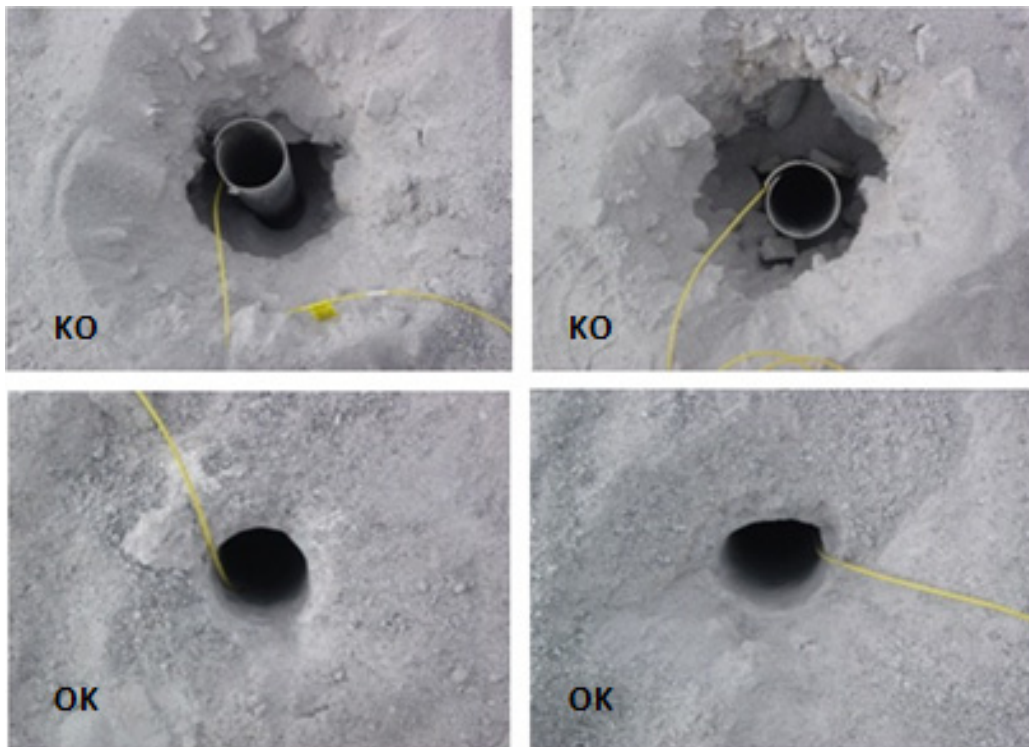


Figura 21. Exemplos de bons (OK) e maus (KO) emboquilhamentos.

Regularidade da bancada

A regularidade da bancada é importante principalmente para avaliação da estabilidade do carro de perfuração na altura de execução do furo (Figura 22). Para classificar este parâmetro optou-se pela medição de intervalos de desnível entre furos, permitindo desta forma ter uma percepção da maior ou menor dificuldade de estabilização do equipamento que o operador poderá ter na execução do furo.



Figura 22. Exemplo de instabilidade do equipamento.

Alguns dos parâmetros supracitados são bastante difíceis de avaliar, pois existem sempre condicionantes, pormenores, situações que não estão contempladas na imposição de uma classificação, por mais abrangente e/ou versátil que ela seja. Fica a noção de que alguns destes parâmetros apenas serão inequívoca e completamente monitorizados com um acompanhamento exaustivo e constante da operação de perfuração.

Medição dos desvios

Para a realização deste trabalho, existe um equipamento que tem especial relevância, na medida em que permite a medição dos desvios de perfuração. O Boretrak é um equipamento que permite o levantamento contínuo de desvios laterais [ângulo real perpendicular à frente de desmonte (Norte/Sul)] e desvios frontais [ângulo real medido paralelamente à frente de desmonte (Este/Oeste)], permitindo também saber a profundidade real de cada furo.

Este equipamento é constituído por uma sonda “Sensor Probe” com dois inclinómetros colocados perpendicularmente um ao outro, por um ou dois conjuntos de varas articuladas com um suporte para as varas “Single (m) Rack” e por um dispositivo de controlo “Control Display Unit” (Figura 23).

O Boretrak é constituído por:

- ✓ Uma sonda com dois inclinómetros perpendiculares, eixos (“pitch & roll”);
- ✓ Um conjunto de varas articuladas leves com 1 m de comprimento cada e respectivo suporte;
- ✓ Um dispositivo de controlo (notebook e bateria electrónica);
- ✓ PC com software compatível.

A medição é construída a partir da sonda de aço inoxidável e alumínio. As varas são feitas de fibra de vidro. O peso total de um sistema de 30 m de varas é de 11,5 kg.

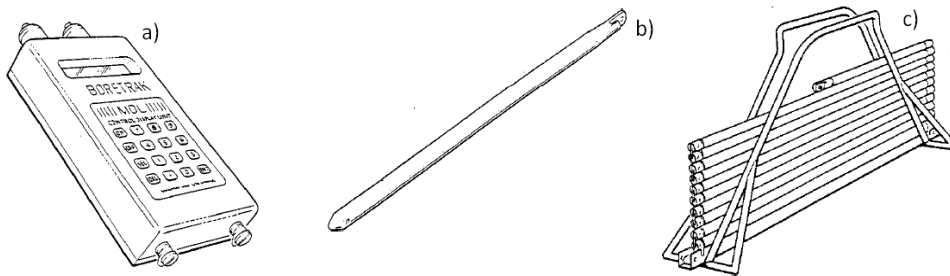


Figura 23. Partes constituintes do equipamento Boretrak, a) Control Display Unit; b) Sensor Probe; c) Single (m) Rack.

Princípio de medição

O equipamento Boretrak tem integrado uma tecnologia com um único chip microprocessador que utiliza sensores electrolíticos de gravidade para determinar a inclinação. Este equipamento deve ser criteriosamente colocado perpendicular ou paralelamente ao sentido da furação, consoante o azimute definido, a sonda faz duas leituras em cada registo, “Pitch” e “Roll”, que representam duas inclinações medidas perpendicularmente entre si, a partir das quais se consegue calcular os desvios laterais e frontais. Posto isto, é de fácil dedução que a mínima distorção na colocação do equipamento Boretrak se reflecte numa leitura pouco fidedigna das inclinações e conseqüentemente dos desvios de perfuração. O comprimento do furo é indicado através da contagem do número de varas introduzidas no furo.

Modo de operar

A sonda é conectada à primeira vara e posteriormente introduzida no furo até à profundidade pretendida de leitura, que pode ser de 1 a 9 m. As varas têm 1 m cada, permitindo controlar fácil e rigorosamente a profundidade da leitura. Após colocação da sonda à profundidade pretendida para a primeira leitura, apenas se tem que imobilizar o conjunto (varas mais sonda) e, com a ajuda do dispositivo de controlo, registar a primeira leitura, sendo que o intervalo de leitura é definido no início do ensaio e mantém-se constante ao longo do mesmo. Este processo é repetido até atingir a cota final, altura em que é corrigida a profundidade do furo e assim sucessivamente até ao fim do ensaio. Depois de o ensaio feito, são descarregados os resultados para um PC com *software* compatível, o qual faculta uma primeira análise gráfica do estado da furação (Figura 24).



Figura 24. Modo de operação do Boretrak.

CAPÍTULO 3



3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE COMPARTIMENTAÇÃO DA PEDREIRA DE SERDEDELO: ZONAMENTO GEOTÉCNICO DE PORMENOR DO MACIÇO ROCHOSO, BANCADAS NORTE

3.1 Considerações iniciais e enquadramento regional

A presente investigação teve como objectivo estudar e avaliar, numa perspectiva interdisciplinar, os desvios de perfuração em maciços rochosos. Além disso, abordou-se, do ponto de vista metodológico, até que ponto há uma interdependência entre o tipo/amplitude dos desvios de perfuração e os parâmetros geológico-geotécnicos dos maciços, as ferramentas de execução e a geometria do diagrama de fogo. Para atingir em pleno esse objectivo procedeu-se ao estudo geotécnico e geomecânico de pormenor de uma série de bancadas do topo Norte da pedreira de Serdedelo. Efectuaram-se, nesse sector, estudos geológicos fundamentais e levantamentos geotécnicos-geomecânicos de pormenor para se definir o grau de compartimentação do maciço rochoso. O trabalho de campo, referido anteriormente, foi realizado na pedreira granítica de Serdedelo (Ribeira, Ponte Lima), situada no Alto Minho.

O maciço rochoso da área em estudo faz parte de uma faixa de granitóides relacionados com a orogenia Varisca (ou Hercínica), com uma orientação geral NW-SE, que se estende desde o Alto Minho até às Beiras e encontram-se distribuídos segundo faixas de cisalhamento dúcteis bem definidas. Do ponto de vista geotectónico inserem-se na Zona Galiza – Trás-os-Montes do Maciço Ibérico (e.g., Ferreira et al., 1987; Dias et al., 2000; Ribeiro et al., 2007).

A área em estudo, segundo Teixeira et al. (1972), enquadra-se, em termos gerais, numa faixa de granitóides porfiróides, de grão grosseiro a médio, por vezes biotíticos (figuras 25 e 26). Uma importante rede de fracturação regional intersecta o granitóide em estudo e fácies graníticas envolventes, obedecendo fundamentalmente aos seguintes sistemas de fracturação regionais, a saber: NW-SE; NNE-SSW a NE-SW e ENE-WSW. O mais antigo, do ponto de vista geológico, e mais importante tem orientação geral NW-SE (coincidente com a falha regional de Vigo-Vila Nova de Cerveira-Régua) e o mais recente tem orientação média NNE-SSE a NE-SW. Estes granitos apresentam uma intensa fracturação geológica, exibindo uma tonalidade cinza-azulada, pontuada por biotite, o que confere ao granitóide um tom cinza-escuro.

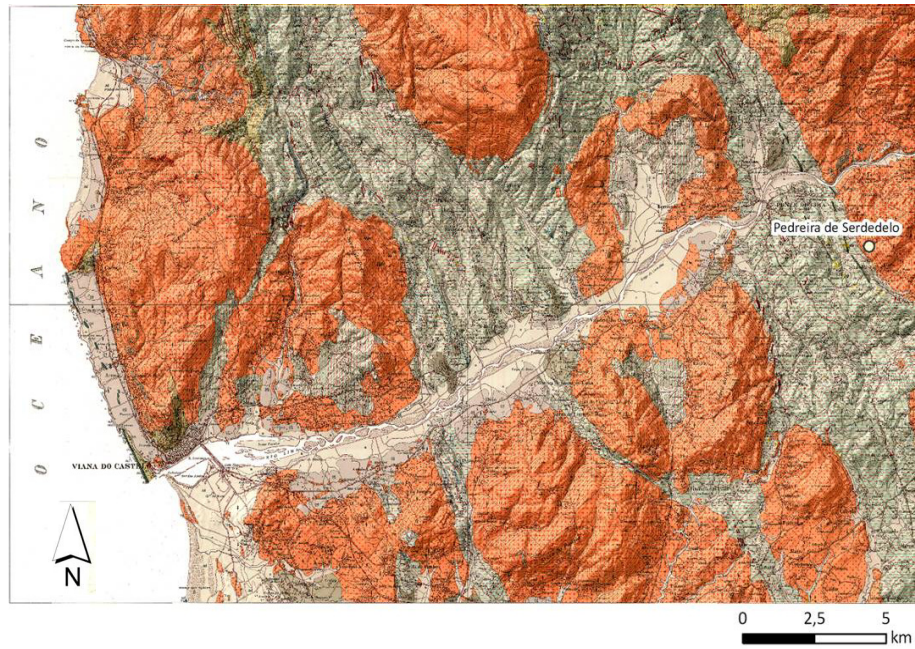


Figura 25. Enquadramento da geologia regional do sector a Norte de Viana do Castelo [fotomontagem, com carta de relevo sombreado, adaptada da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50.000, folha 5-A (Viana do Castelo); Teixeira et al., 1972]. Os tons avermelhados representam os granitóides, as tonalidades cinza-esverdeados são rochas metassedimentares e tons cinza claro são os depósitos sedimentares.

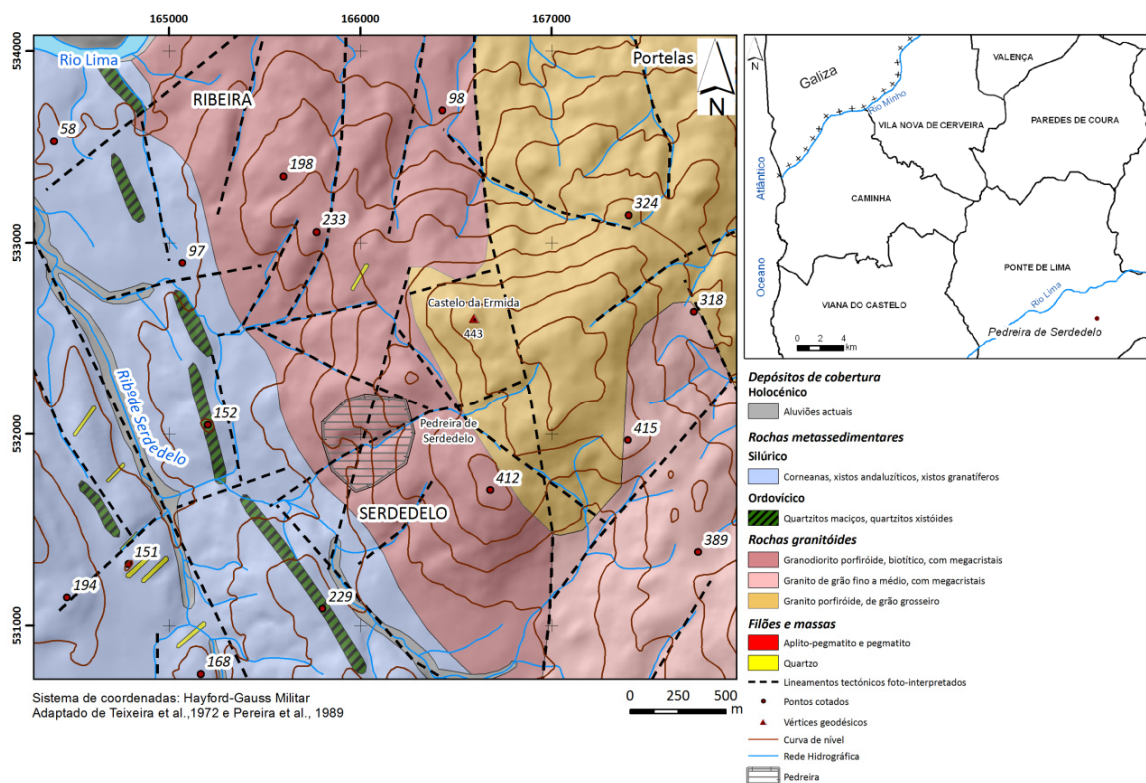


Figura 26. Enquadramento geológico regional da pedreira de Serdedelo, Sudeste de Ponte de Lima (base cartográfica: adaptada/revista de Teixeira et al., 1972; Pereira et al., 1989).

3.2 Pedreira de Serdedelo

A Pedreira de Serdedelo encontra-se licenciada pela Direcção Geral de Geologia e Minas n.º 4441, localizando-se no Distrito de Viana do Castelo, Concelho de Ponte de Lima, freguesia da Ribeira, junto da delimitação desta freguesia com a de Serdedelo (Ramos, 2008). A área em estudo insere-se na bacia hidrográfica do rio Lima, ficando a Pedreira de Serdedelo situada a cerca de 2 km da margem esquerda do referido rio. É, ainda, de referir que a área delimitada pela actual Pedreira de Serdedelo intersecta uma pequena linha de água de carácter torrencial (ribeira da Boca). Esta linha de água encontra-se situada no limite da pedreira, no sentido Sul-Sudeste, desaguando na Ribeira de Serdedelo, que por sua vez desagua no Rio Lima. O ponto notável de relevo na área é o v.g. de Castelo da Ermida (443 m) e o ponto mais elevado da área da pedreira ronda os 310 m e a base da pedreira situa-se a uma cota média de 190 m (Figura 27).

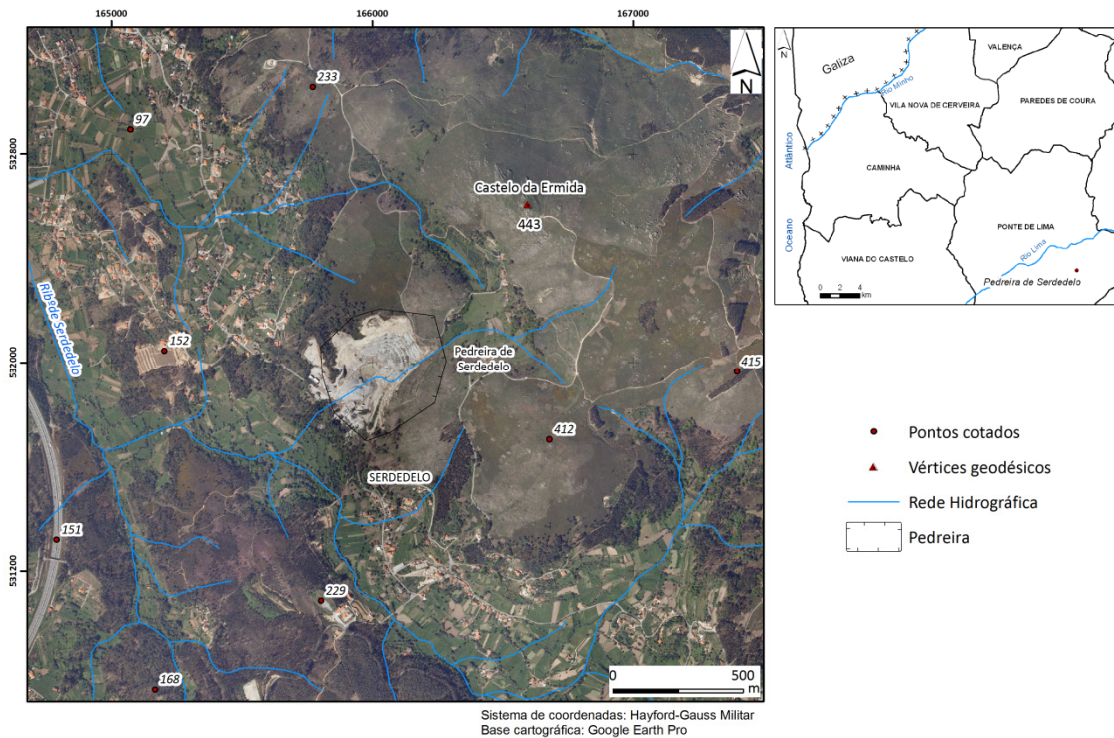


Figura 27. Localização da pedreira de Serdedelo, Sudeste de Ponte de Lima (base cartográfica: adaptada do *Google Earth Pro* [Setembro de 2010]).

A pedreira de Serdedelo localiza-se a SSE da freguesia da Ribeira (a Sudeste da cidade de Ponte de Lima), entre as localidades de Barrio e Serdedelo. A referida exploração, situada junto da EM-534 (que constitui o único acesso à pedreira), a aproximadamente 3 km da bifurcação da EN-203 para a EM-534, abrangerá uma área total de cerca de 16,5 ha (165.000 m²), incluindo a actual área de exploração, área de reservas de exploração, área de

equipamentos e área de futura ampliação da pedreira, dos quais 8,5 ha são referentes à área da ampliação que se pretende efectuar. A extracção propriamente dita decorre a céu aberto em flanco de encosta seguindo a direcção de desmonte NE, por bancadas com altura média de 16 metros (Ramos, 2008; Fonseca, 2008). A principal actividade desenvolvida na Pedreira de Serdedelo refere-se à extracção de rocha granítica e fabrico de agregados de diferentes granulometrias e seus derivados destinados à construção civil e obras públicas, através de uma central de britagem e classificação. A Pedreira de Serdedelo iniciou a sua actividade há pelo menos 30 anos, encontrando-se actualmente a ser explorada pela empresa MonteAdriano – Agregados, SA.

3.3 Parâmetros geológico-geotécnicos

No presente trabalho, tentou-se adoptar, sempre que possível, os procedimentos, normas e terminologias utilizados na realização de estudos geotécnicos de maciços rochosos, como por exemplo:

- ✓ As técnicas e métodos gerais de campo propostos por ISRM (1978), GSE (1995), Ferrer & González de Vallejo (1999);
- ✓ A “Basic Geotechnical Description of Rock Masses” (BGD) proposta pela ISRM (1981), para a caracterização geológico-geotécnica da compartimentação de maciços rochosos com recurso à técnica de amostragem linear em superfícies expostas de descontinuidades do maciço (e.g., ISRM, 1981; Chaminé & Gaspar, 1995; Dinis da Gama, 1995).

Foi observada e estudada a seguinte base topográfica: a folha 28, IGeoE, Carta Militar de Portugal, à escala 1/25000 e os ortofotomapas do Google Earth Pro (imagem de satélite de 2010). No que concerne à cartografia geológica fundamental (em particular, litologia e estrutura) e geotécnica, foi realizado um minucioso reconhecimento de terreno, procedendo-se de seguida ao registo de minutas de cartografia de pormenor.

Devido à dificuldade, do ponto de vista prático, de se executar uma análise profunda da compartimentação do maciço rochoso na totalidade da área correspondente à pedreira em questão, decidiu-se realizar esse estudo através de uma amostragem expressiva que fosse representativa de todo o maciço, através da técnica da amostragem linear (ISRM, 1978, 1981; Chaminé & Gaspar, 1995; Dinis da Gama, 1995; Brady & Brown, 2004).

No seguimento da aplicação desta técnica ao maciço granítico da pedreira, procedeu-se à colocação de uma fita graduada (em metros) a, aproximadamente, 1.50 m do chão da bancada. Posteriormente, a partir da origem, devidamente geoposicionada por um GPS de

alta-precisão Trimbe Geexplorer do LABCARGA|ISEP, foram cartografadas de uma forma sistemática todas as descontinuidades (diaclasses, falhas, estruturas filonianas, ...) que intersectavam essa linha de amostragem. Cada uma das descontinuidades foi descrita e registada nas fichas de levantamento geológico-geomecânico (Anexo I) segundo os parâmetros geológico-geotécnicos propostos pela ISRM (1981).

Dos parâmetros determinados para a caracterização das descontinuidades do maciço, destacam-se entre outros, os seguintes: a atitude, a abertura, o espaçamento (através do “fracture intercept”), a continuidade, o preenchimento, a rugosidade e a presença de água no maciço. Deste modo, com o intuito de estudar a compartimentação de um sector do maciço rochoso da pedraira, foi utilizada a técnica de amostragem linear em superfícies expostas dos taludes de algumas bancadas previamente seleccionadas tendo em atenção determinados critérios, tais como (Ramos, 2008; Fonseca, 2008):

- Acessibilidade aos locais com condições técnicas e de segurança viáveis para aplicação da técnica de amostragem linear ao longo de uma série de taludes da pedraira em estudo. A pedraira encontrava-se em plena lavra e, portanto, o levantamento geológico-geomecânico de campo não poderia perturbar o normal funcionamento do centro de produção, por isso houve necessidade de coordenação por parte de todos os envolvidos;
- Foi importante que o estudo se focasse sobre um sector da exploração com uma perspectiva de vida útil no sentido do estudo contribuir para a exploração racional do georrecurso;
- Realizou-se uma amostragem linear, transversal e longitudinal, de toda a zona de exploração eleita para o estudo, ou seja, tentou-se, na medida do possível, que o conjunto dos painéis cartografados, a diferentes cotas, permitisse uma amostragem contínua e representativa do sector em estudo.

Além do equipamento de campo, referido no capítulo 2, onde se destacam o martelo de geólogo, o spray, os pregos, a fita métrica, a bússola com clinómetro e o martelo de Schmidt, são indispensáveis as fichas de registo das observações de campo, que devem ser expeditas mas o mais completas possível. Foram utilizadas as fichas desenvolvidas por Ramos (2008) e Fonseca (2008), ou seja, as fichas do levantamento geológico-geomecânico e do levantamento do ensaio com o esclerómetro portátil (martelo de Schmidt, tipo L). As bases de dados utilizadas (ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS) permitiram coligir e manipular inúmeros dados de terreno.

Esta aplicação em *Ms. Excel Office 20007* possibilitou também realizar analiticamente o que o programa geoinformático Dips da RocScience mostra graficamente, ou seja, definir as

principais famílias de descontinuidades calculando a sua representação em termos de número de descontinuidades contempladas por intervalo e percentagem através de um quadro de pesquisa.

A definição das diferentes famílias para os maciços foi conseguida através da realização de diagramas geológico-estruturais — diagramas de contorno estrutural e diagramas de rosetas, tendo-se usufruído para o efeito do programa geoinformático Dips versão 5.1 da RocScience. Na digitalização da informação geológico-geotécnica recorreu-se ao programa informático OCAD for Cartography (version 9.5.2, de 2005), bem como ao software da ESRI ArcGis versão 9.3. Os programas mencionados anteriormente estão licenciados, para fins académicos, ao Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP) do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

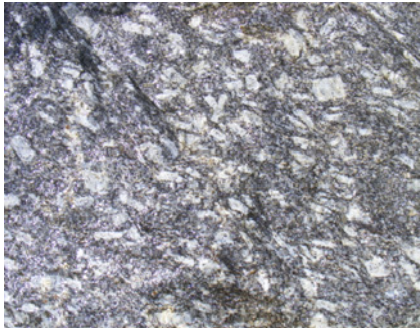
Com o intuito de determinar a resistência à compressão simples dos maciços, foram efectuados ensaios geomecânicos em diversas estações, recorrendo ao ensaio com o Esclerómetro Portátil ou Martelo de Schmidt, tendo sido registados todos os dados em fichas de levantamento (Anexo II), segundo as propostas da ISRM (1978, 1981, 1987, 2007) e ASTM (2001).

3.3.1 Caracterização do material rochoso presente na Pedreira de Serdedelo

A Pedreira de Serdedelo apresenta um maciço constituído essencialmente por um granito porfiróide, grão grosseiro a médio, biotítico, manifestando uma foliação de fluxo concretizada acima de tudo pelo alinhamento dos cristais de biotite e, por vezes, de megacristais de plagioclase.

Quadro 16. Resumo do estudo micropetrográfico das amostras do granito de Serdedelo (adaptado de Ramos, 2008; Fonseca, 2008).

Parâmetro	Descrição	
Classificação	Granitóide da Pedreira de Serdedelo.	
Estrutura	Minerais leucocratas (feldspato e quartzo) e melanocratas (biotite); destacam-se os megacristais de feldspato.	
Textura	Predomina o grão grosseiro, mas por vezes apresenta uma granularidade média.	
Mineralogia Básica	Feldspato potássico	34%
	Plagioclase	28%
	Quartzo	23%
	Biotite	8%
	Moscovite	4%
	Zircão	<1%
	Apatite	<1%
	Silimanite	<1%



3.3.2 Grau de alteração

Uma vez que estamos perante um maciço rochoso que foi sendo explorado no decurso dos anos num âmbito industrial mais concretamente para a produção de agregados, sendo a zona demarcada para o estudo, coincidente com as frentes em exploração, seria expectável encontrar um maciço de boa qualidade. Devido ao baixo grau de alteração do maciço, o material-rocha apresenta globalmente uma tonalidade cinza azulada. O tamanho do grão é, em geral, grosseiro com alguns dos seus minerais constituintes (megacristais de feldspato) orientados segundo um intervalo azimutal N135°-140°E. Tendo-se visualizado ainda que os cristais de biotite materializam, segundo o mesmo azimute referido, uma foliação de fluxo (Ramos, 2008; Fonseca, 2008).

Relativamente ao grau de alteração do maciço, poder-se-á referir que se encontra são a muito pouco alterado, W_1 (99,4%), com um reduzido número de descontinuidades ligeiramente alteradas, W_2 (0,6%), nomeadamente em zonas em que evidenciam sinais de oxidação e em zonas vizinhas às descontinuidades (Figura 28).

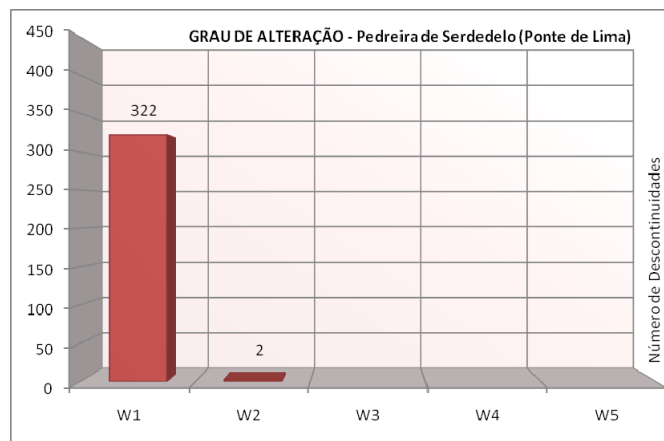


Figura 28. O estado do grau de alteração para a pedreira em estudo.

Ao analisar o grau de alteração das diferentes famílias, não se verificam variações significativas em relação à análise geral, ou seja, a predominância do grau de alteração W1, i.e., material rochoso são e fresco sem sinais significativos de alteração (Figura 29).

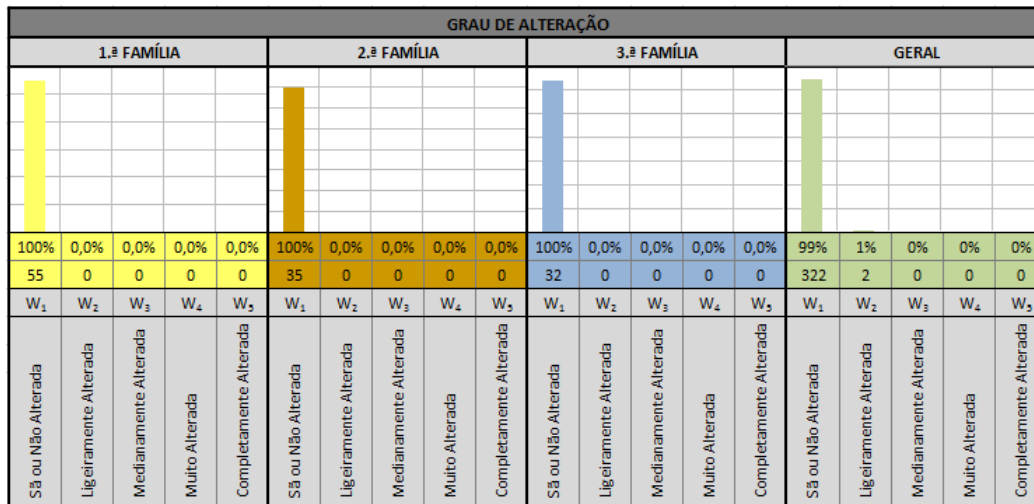


Figura 29. Análise do grau de alteração das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

3.3.3 Estado da fracturação e espaçamento

A técnica da amostragem linear (Figura 30) utilizada no terreno permitiu cartografar 324 descontinuidades, tendo sido examinadas relativamente à sua orientação espacial e, de seguida, analisadas em estereogramas e diagramas de rosetas, o que possibilitou determinar o número e atitude das famílias principais de descontinuidades, bem como a sua persistência e espaçamento. A figura 31 permite evidenciar o grau de fracturação intenso de material rochoso.



Figura 30. Exemplo da aplicação de uma linha de amostragem graduada no estudo da compartimentação da pedra granítica de Serdedelo, Ponte de Lima.

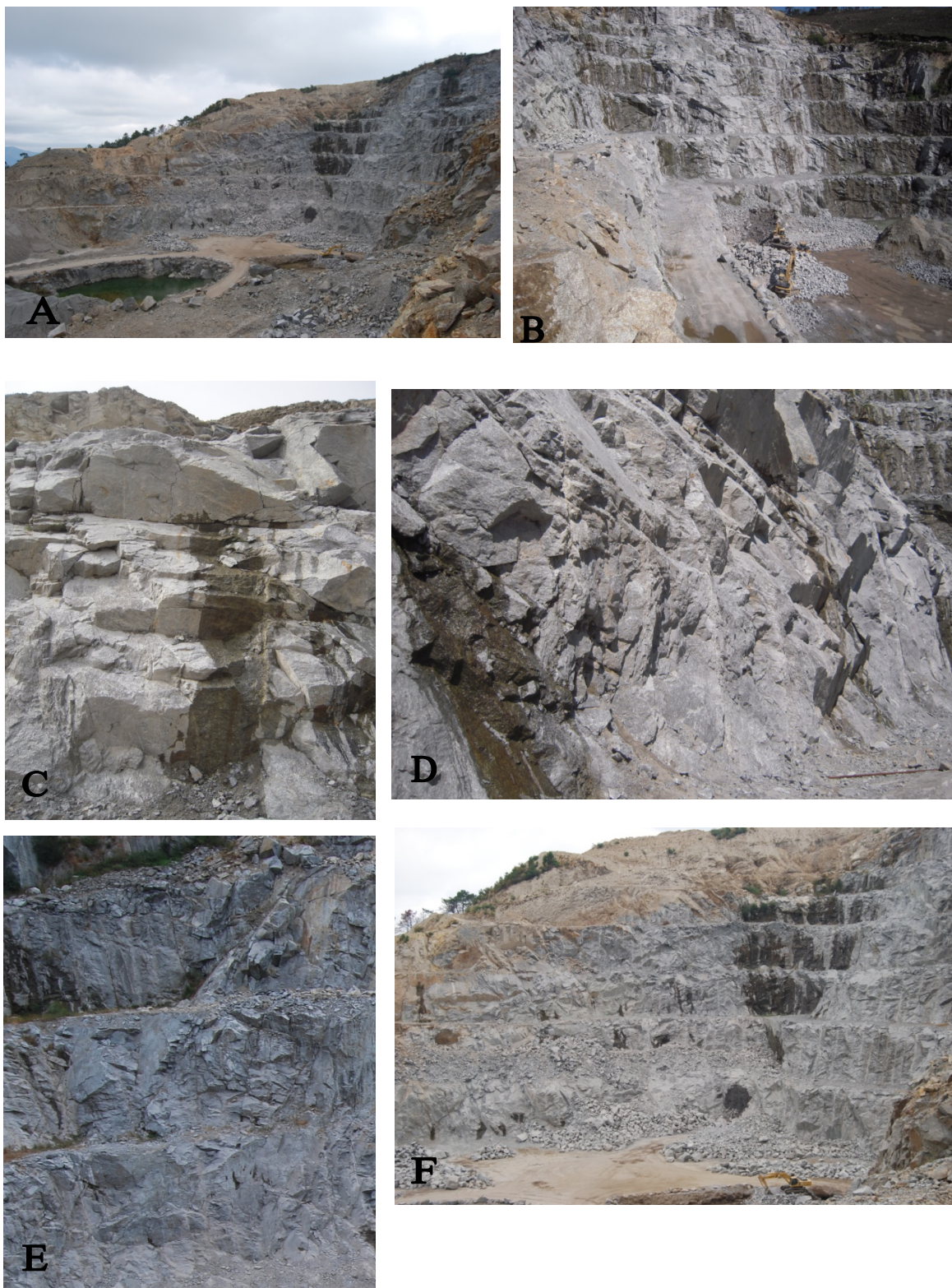


Figura 31. Aspectos do grau de fracturação e de alteração da pedreira de Serdedelo. A) Perspectiva geral da pedreira; B) Perspectiva do topo Nordeste da pedreira; C) Aspecto da compartimentação do maciço rochoso; D) Aspecto do maciço com um grau de alteração são ou praticamente não alterado (W_1); E) Plano de falha, no topo Leste da pedreira; F) Aspecto da zona de desmonte, no topo Noroeste da pedreira.

A pedra de Serdedelo é constituída por um maciço rochoso com uma predominância de diaclases (95,7%), com uma representação pouco significativa de falhas (4,3%) (Figura 32).

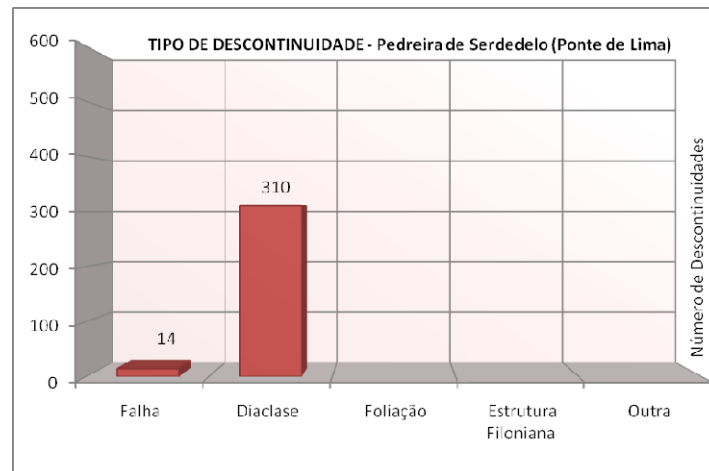


Figura 32. Tipos de descontinuidades nas bancadas da pedra de Serdedelo.

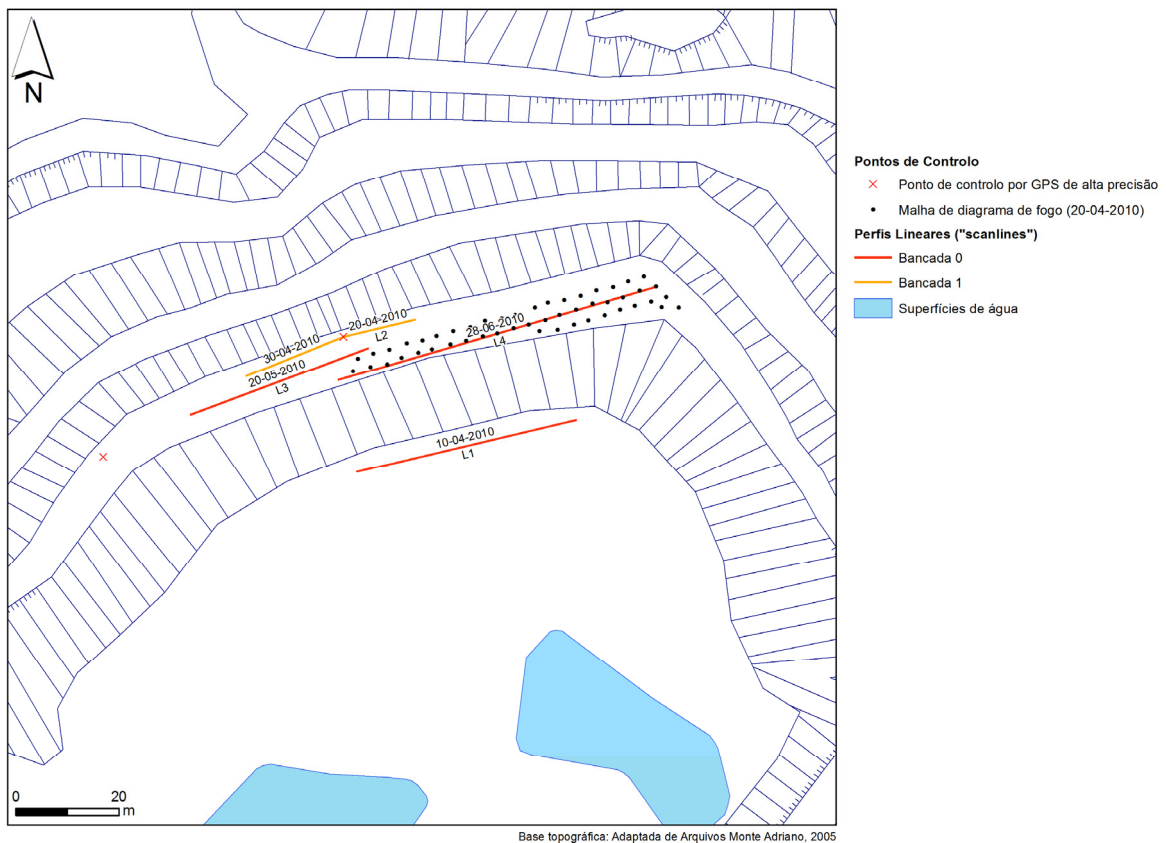


Figura 33. Localização dos perfis lineares ("scanlines") da zona em estudo (Pedreira de Serdedelo).

BANCADA N.º 0

A análise dos diagramas geológicos estruturais da bancada n.º 0 da Pedreira de Serdedelo, possibilita aferir que as descontinuidades se concentram em três famílias principais (Figura 34): a mais representativa N140°-150°E, com inclinações que oscilam entre 75°-85°, maioritariamente para o quadrante NE; a segunda família N20°-30°E com inclinações que variam entre 70°-80° para SE; e uma terceira família N50°-60°E com pendores que variam entre 70°-80°NW.

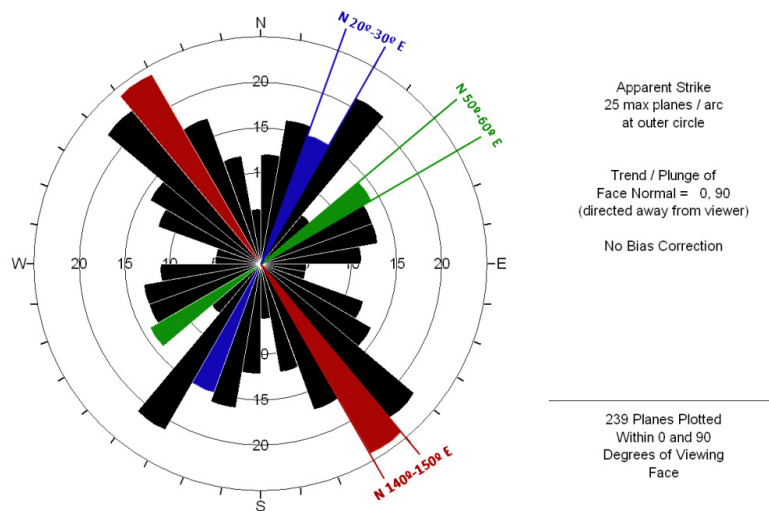


Figura 34. Diagrama de rosetas da bancada n.º 0 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima), com 239 descontinuidades projectadas em intervalos (pétalas) com 11° de amplitude, sendo o primeiro intervalo [0°;10°].

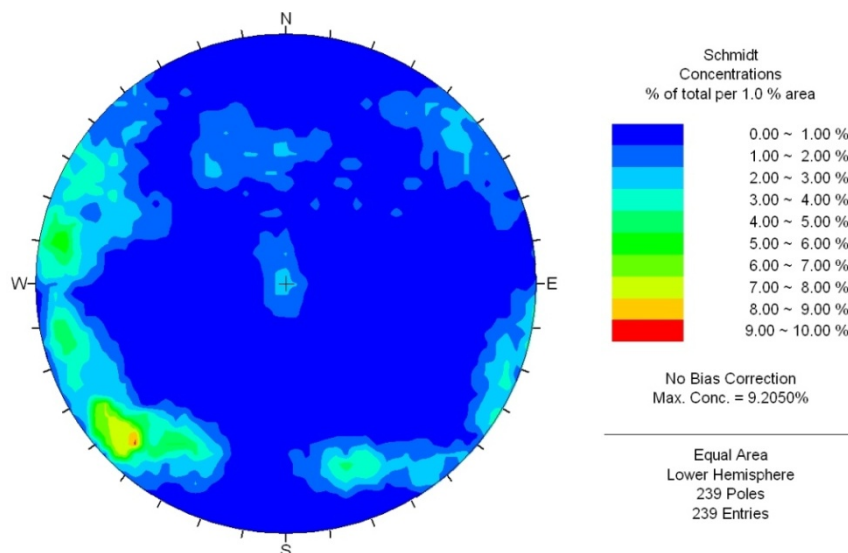


Figura 35. Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 239 descontinuidades medidas na bancada n.º 0 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Na projecção e análise das descontinuidades, em diagramas de rosetas, está normalmente determinado por defeito um intervalo com amplitude de 10° com início em 0° , sendo o primeiro intervalo (pétala) constituído por todas as descontinuidades com as seguintes direcções: N 0° , 1° a 9° E (Quadro 17). Esta análise nem sempre garante uma definição das principais famílias, isto é, será que, ao analisar num intervalo $[1^\circ; 10^\circ]$, por exemplo, não se englobará um maior número de descontinuidades? Isto implica poder cometer erros na atribuição da ordem das principais famílias, assim como no rigor do intervalo definido para as mesmas. Para que tal não aconteça, verificou-se, para cada conjunto de pétalas, todos os intervalos possíveis, com amplitude de 11° , de forma a garantir que o intervalo definido para cada uma das três famílias delimitadas seja o que contem o maior número de descontinuidades contempladas. Definiu-se uma amplitude de 11° inicialmente, por ser um intervalo aceitável para a caracterização geral do maciço.

Quadro 17. Síntese dos dados geológico-estruturais da pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Família	Direcção	Número Descontinuidades Contempladas	Diagrama de Rosetas	Direcção Média	Diagrama de Contorno Estrutural	Inclinação Média	
Intervalo - 11°		80	33,4%				
1ª	[N140°/150°E]	34	14,2%			N 143° E	79° NE
2ª	[N20°/30°E]	28	11,7%			N 26° E	72° SE
3ª	[N50°/60°E]	18	7,5%			N 54° E	74° NW

Como se pode constatar no Quadro 17 depois de se analisar todos os intervalos possíveis com amplitude de 11° , verifica-se o seguinte:

- ✓ As três famílias apresentam a sua maior representatividade em diferentes intervalos com 11° de amplitude, o que impossibilita a sua representação gráfica no mesmo diagrama de rosetas;

- ✓ Apesar da dimensão da pétala não ser a de maior destaque no intervalo [10°;40°], devido à maior representatividade a nível de descontinuidades, a família definida terá a seguinte direcção: N20°/30°E (como se pode observar na figura abaixo indicada).

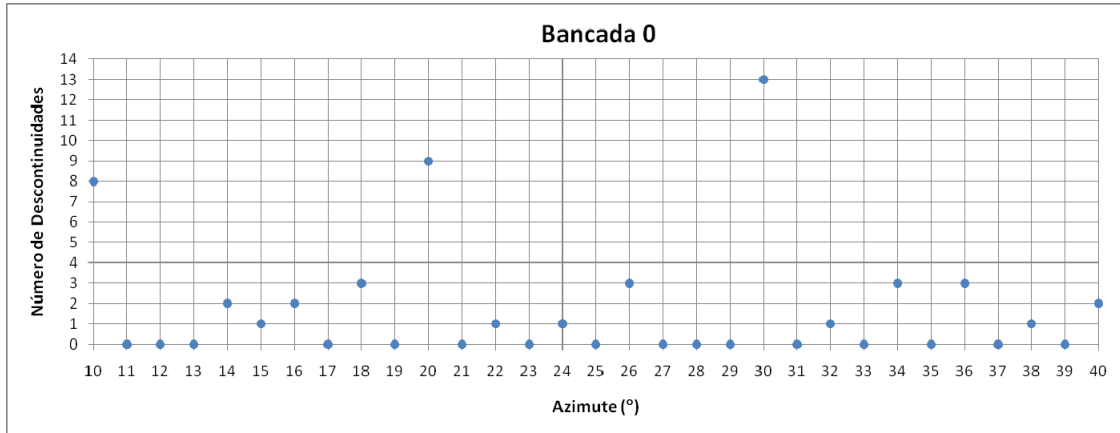


Figura 36. Ilustração da variação do azimute das descontinuidades (n=239) do maciço da bancada n.º 0 da pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Quadro 18. Espaçamento médio das descontinuidades para o maciço de Serdedelo.

Família	Direcção	Espaçamento Médio	Correcção	Espaçamento Médio Corrigido (ISRM, 1981, 2007)
		(cm)	$S_1 = d_1 \cdot \text{sen}(\alpha_1)$	(cm)
BANCADA 0				
1.ª	N140°/150°E	114		49
2.ª	N20°/30°E	45		22
3.ª	N50°/60°E	129		41
G	Geral	72		62

A bancada n.º 0 é caracterizada pela “scanline 1” realizada no dia 10/04/2010. Os valores obtidos indiciam baixa representatividade, pelo facto de o levantamento executado ser constituído por apenas 63 descontinuidades. O conjunto das três famílias é formado por 20 descontinuidades (1.ª Família (N140°/150°), 9 descontinuidades; 2.ª Família (N20°/30°E), 5 descontinuidades; 3.ª Família (N50°/60°E), 6 descontinuidades).

BANCADA N.º 1

A análise dos diagramas geológico-estruturais da bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo possibilita aferir que as descontinuidades se concentram em duas famílias principais (Figura 37): a mais representativa N140°-150°E, com inclinações que oscilam entre 80°-90°, particularmente para o quadrante NE; a segunda família N60°-70°W com inclinações que variam entre 75°-85° para NW.

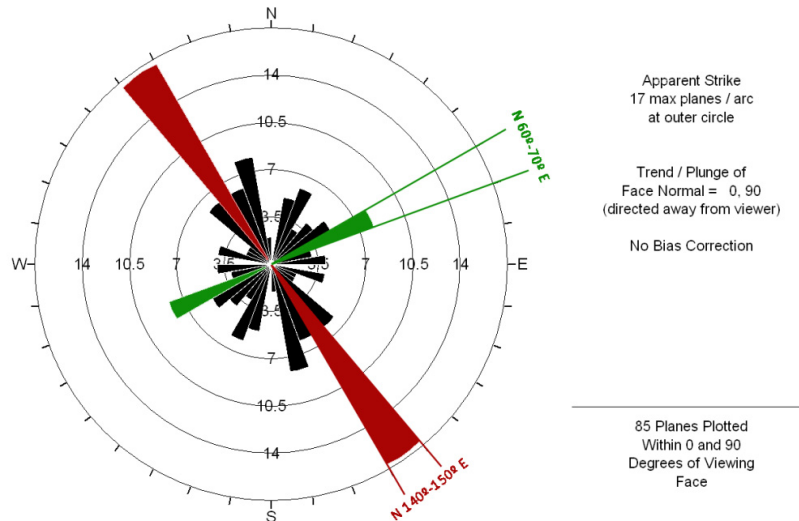


Figura 37. Diagrama de rosetas da bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima), com 85 descontinuidades projectadas em intervalos (pétalas) com 11° de amplitude, sendo o primeiro intervalo [0°;10°].

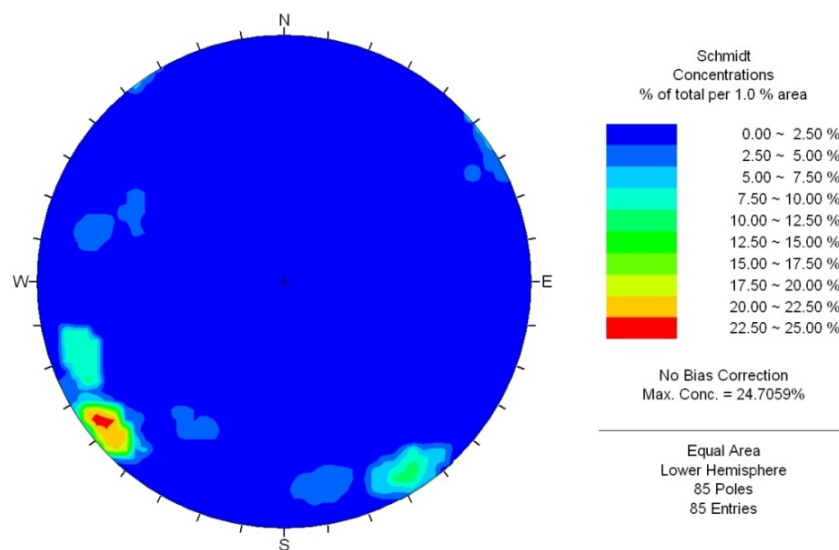
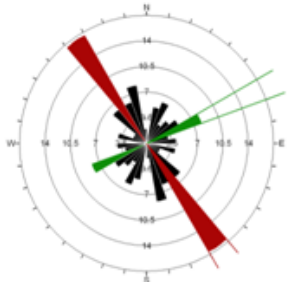
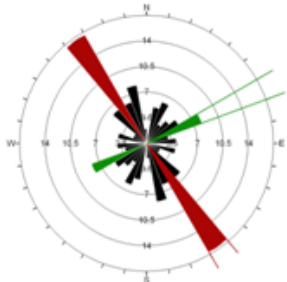
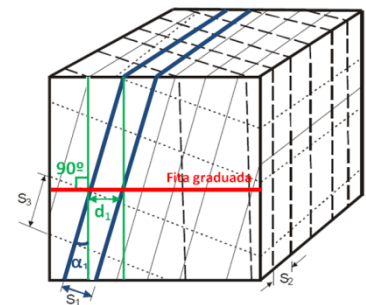


Figura 38. Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 85 descontinuidades medidas na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Quadro 19. Síntese dos dados geológico-estruturais da pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).

Família	Direcção	Número Descontinuidades Conte em placas	Diagrama de Rosetas	Direcção Média	Diagrama de Contorno Estrutural	Inclinação Média
Intervalo - 11°		32	37,7%			
1ª	[N140°/150°E]	22	25,9%		N 143° E	82° NE
2ª	[N60°/70°E]	10	11,8		N 63° E	76° NW

Quadro 20. Espaçamento médio das descontinuidades para o maciço de Serdedelo.

Família	Direcção	Espaçamento Médio	Correcção	Espaçamento Médio Corrigido
		(cm)	$S_1 = d_1 \cdot \text{sen}(\alpha_1)$	(cm)
BANCADA 1				
1.ª	N140°/150°E	57		44
2.ª	N60°/70°E	82		57
G	Geral	40		35

A bancada n.º 1 é definida pela “scanline 2” realizada nos dias 20/04/2010 e 30/04/2010.

GERAL

A análise dos diagramas geológico-estruturais da Pedreira de Serdedelo possibilita aferir que as descontinuidades se concentram em três famílias principais (Figura 39): a mais representativa N140°-150°E, com inclinações que oscilam entre 75°-85°, para o quadrante NE; a segunda família N20°-30°W com inclinações que variam entre 70°-80° para SE; e uma terceira família N60°-70°E com pendores que variam entre 70°-80°NW.

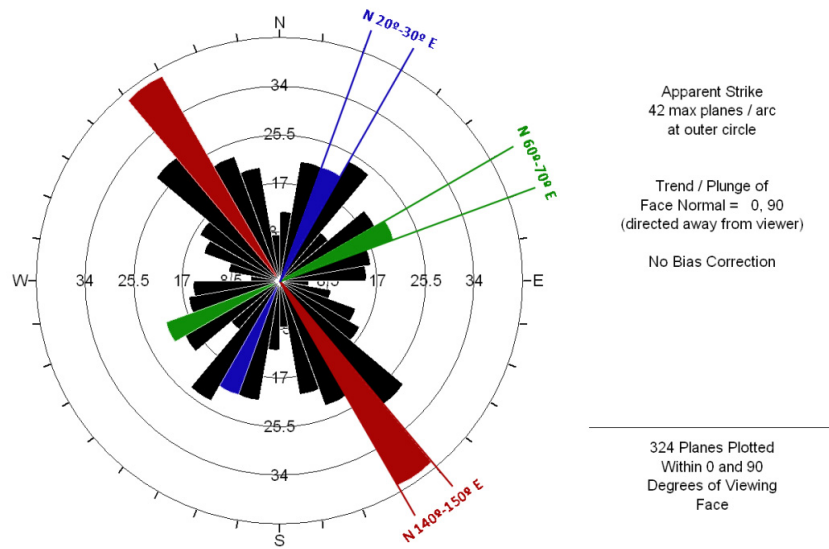


Figura 39. Diagrama de rosetas geral da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima), com 324 descontinuidades projectadas em intervalos (pétalas) com 11° de amplitude, sendo o primeiro intervalo [0°;10°].

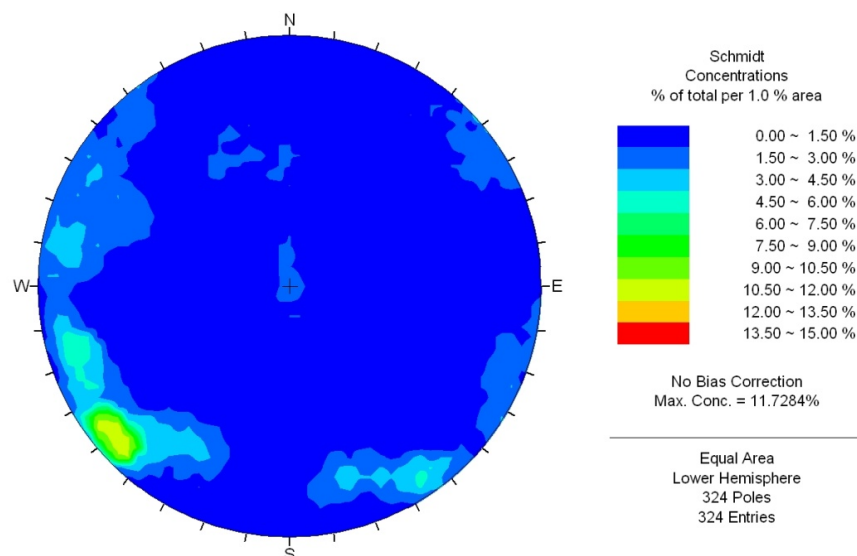


Figura 40. Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao tratamento estatístico das 324 descontinuidades medidas na Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Quadro 21. Síntese dos dados geológico-estruturais da pedraira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Família	Direcção	Número Descontinuidades Contempladas	Diagrama de Rosetas	Direcção Média	Diagrama de Contorno Estrutural	Inclinação Média	
Intervalo - 11°		121	37,5%				
1ª	[N140°/150°E]	56	17,3%		N 144° E		78° NE
2ª	[N20°/30°E]	35	10,9%		N 25° E		77° SE
3ª	[N50°/60°E]	30	9,3%		N 65° E		62° NW

Como se pode constatar no Quadro 21 depois de se analisar todos os intervalos possíveis com amplitude de 11°, verifica-se o seguinte:

- ✓ As três famílias apresentam a sua maior representatividade em diferentes intervalos com 11° de amplitude, o que impossibilita a sua representação gráfica no mesmo diagrama de rosetas.
- ✓ Apesar da dimensão da pétala não ser a de maior destaque no intervalo [10°;40°], devido à maior representatividade a nível de descontinuidades, a família definida terá a seguinte direcção: N20°/30°E (como se pode observar na figura abaixo indicada).

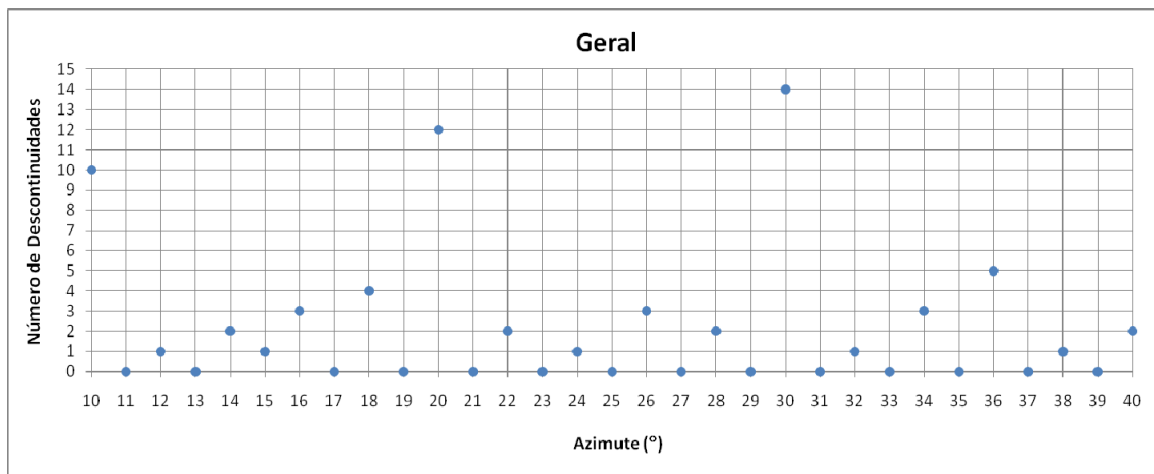


Figura 41. Azimute das descontinuidades (n=324) do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Ao analisar os tipos de discontinuidades mais frequentes das três famílias principais, verifica-se que em todas elas, pelos menos, 95,5% das discontinuidades são diaclases (Figura 42).

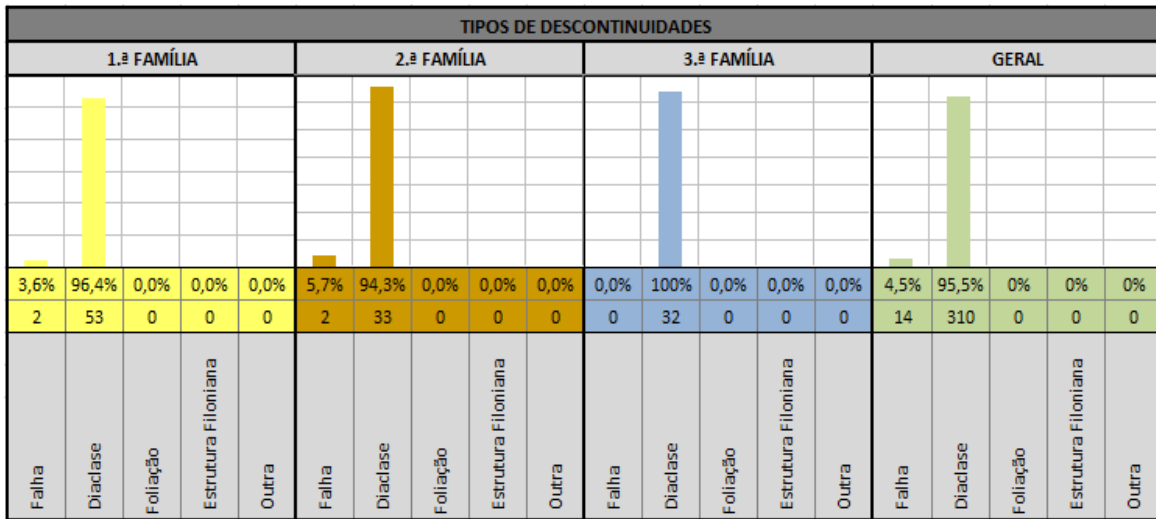


Figura 42. Análise dos tipos de discontinuidade das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

O espaçamento é caracterizado pela intensidade da fracturação num determinado volume de maciço rochoso. O espaçamento vai ser então um factor condicionante no tamanho dos blocos unitários e vai influenciar também o comportamento global do maciço. Como o espaçamento é uma característica muito variável no maciço, é necessário calcular a média do valor medido ou o valor mais provável, admitindo uma distribuição normal. Segundo a classificação ISRM (1978, 1981, 2007) posso constatar que a intensidade de fracturação encontra-se distribuída pelas cinco classes definidas, sendo as de maior expressão (33,0%) as discontinuidades afastadas (F2), com um espaçamento médio entre 60 e 200 cm (Figura 43). A estas seguem-se, em termos percentuais, as discontinuidades medianamente afastadas (F3) e próximas (F4). Havendo ainda a registar alguma expressão das discontinuidades muito próximas (F5) e muito afastadas (F1).

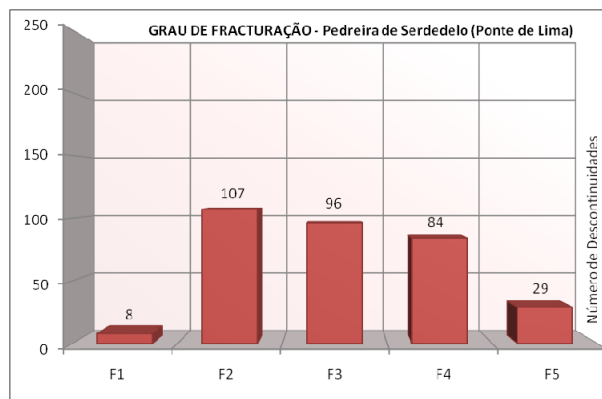


Figura 43. Espaçamento das discontinuidades nos painéis estudados.

Seguidamente (Figura 44), apresenta-se o grau de fracturação de cada família individualmente assim como uma análise das restantes famílias vs conjunto das famílias principais. Apesar de não existirem diferenças significativas na distribuição das descontinuidades nas classes de fracturação, fica explícita a distribuição da maioria de dados pelos dois conjuntos (famílias principais vs restantes famílias) assim como por cada uma das famílias principais.

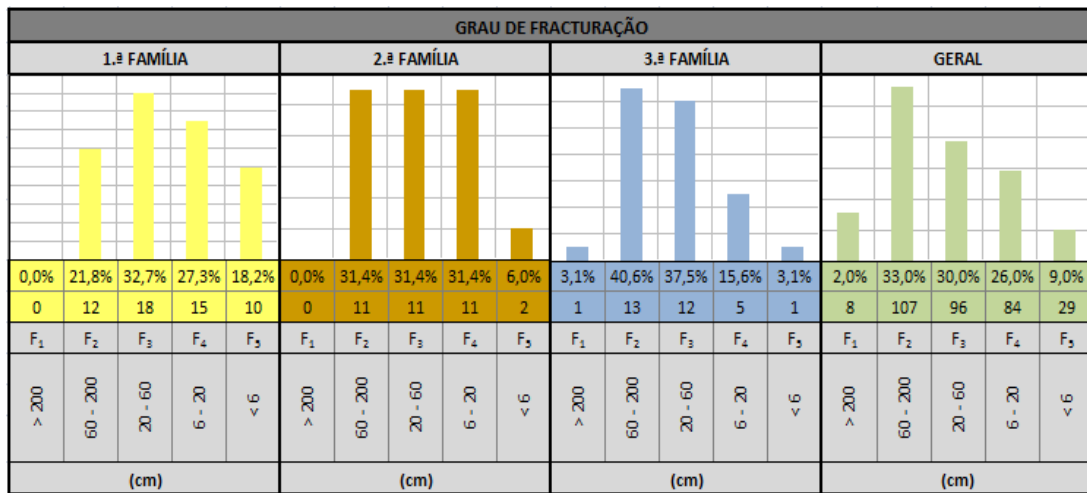


Figura 44. Análise do espaçamento das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

A definição do parâmetro “*Fracture Intercept*” (F_i), recomendado pela ISRM (1981, 2007) para os estudos de compartimentação de maciços rochosos é de extrema importância no enquadramento deste trabalho. Devido à anisotropia inerente ao elemento que se pretende estudar, maciço rochoso, a natureza dos dados que daí advêm, apresentam normalmente um elevado coeficiente de variação. É fundamental uma análise meticulosa dos dados recolhidos, mas também, uma análise estatística descritiva básica que permita tratar essa mesma informação de uma forma mais adequada obtendo consequentemente resultados mais fidedignos.

Quadro 22. Espaçamento médio das discontinuidades para o maciço de Serdedelo.

Família	Direcção	Espaçamento Médio	Correcção	Espaçamento Médio Corrigido
		(cm)	$S_1 = d_1 \cdot \text{sen}(\alpha_1)$	(cm)
GERAL				
1. ^a	N140°/150°E	123		110
2. ^a	N20°/30°E	128		113
3. ^a	N60°/70°E	159		108
G	Geral	59		50

A correcção do espaçamento médio das discontinuidades é fundamental; a amplitude da correcção é tanto maior quanto maior for a inclinação da descontinuidade. Como se pode verificar no Quadro 22, as correcções são bastante significativas. Os valores do espaçamento médio corrigido dão a ideia da ordem de grandeza em que o maciço rochoso estará compartimentado, sendo que se deve ter sempre presente que estes espaçamentos são valores médios e, como foi referido anteriormente, pela sua natureza anisotrópica, apresentam um elevado coeficiente de variação que possivelmente só um adequado tratamento estatístico poderia reduzir.

3.3.4 Continuidade

A continuidade caracteriza a extensão em área de uma descontinuidade num dado volume de rocha. As descontinuidades medidas no campo são geralmente muito pouco contínuas a pouco contínuas, cerca de 37,3% e 33,0% respectivamente; as restantes 29,7% de descontinuidades medidas classificam-se como contínuas a medianamente contínuas. Os valores médios obtidos foram para a família 1 (N140°-150°E) – 524 cm, para a família 2 (N20°-30°E) – 354 cm; e para a família 3 (N60°-70°E) – 224 cm. É ainda de referir, os valores extremos medidos: família 1 (máximo 1200 cm, mínimo 50 cm); família 2 (máximo 1100 cm, mínimo 70 cm); família 3 (máximo 1200 cm, mínimo 40 cm).

Não existem descontinuidades medidas com mais de 20 m de extensão. O estudo da continuidade das diaclases em taludes de bancadas poderá ter sempre um factor de distorção

que é a própria altura da bancada (K), ou seja, uma bancada de 20 m de altura apresenta uma área de amostragem muito mais rica e fiável do que uma bancada com 10 m; por este motivo, a leitura da continuidade das descontinuidades poderá ser complementada pelo parâmetro que seguidamente será apresentado, a terminação. Provavelmente um grande número de descontinuidades terminadas em rocha indicará, à partida, uma menor continuidade das mesmas; uma situação em que a terminação predominante é obscura, já poderá indicar o contrário, i.e., em termos de penetratividade da descontinuidade no maciço.

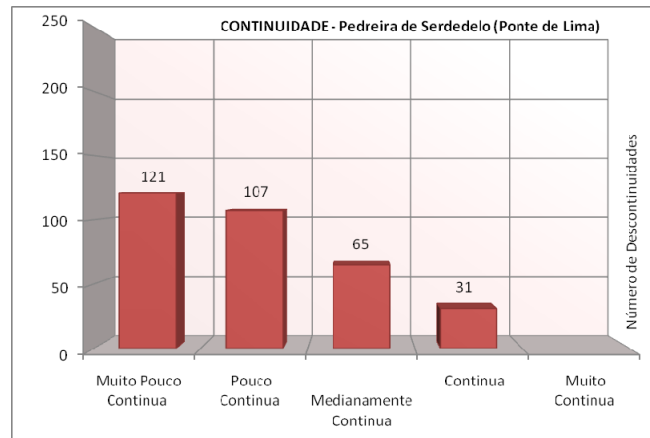


Figura 45. Tipo de continuidade das descontinuidades no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

CONTINUIDADE																			
1.ª FAMÍLIA					2.ª FAMÍLIA					3.ª FAMÍLIA					GERAL				
25,5%	36,4%	16,4%	21,8%	0,0%	42,9%	25,7%	28,6%	2,9%	0,0%	65,6%	18,8%	12,5%	3,1%	0,0%	37,0%	33,0%	20,0%	10,0%	0,0%
14	20	9	12	0	15	9	10	1	0	21	6	4	1	0	127	107	65	31	0
Muito Pouco Contínua	Pouco Contínua	Medianamente Contínua	Contínua	Muito Contínua	Muito Pouco Contínua	Pouco Contínua	Medianamente Contínua	Contínua	Muito Contínua	Muito Pouco Contínua	Pouco Contínua	Medianamente Contínua	Contínua	Muito Contínua	Muito Pouco Contínua	Pouco Contínua	Medianamente Contínua	Contínua	Muito Contínua
< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
(m)					(m)					(m)					(m)				

Figura 46. Análise da continuidade das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

3.3.5 Terminação

Este parâmetro encontra-se bastante distribuído segundo a classificação ISRM (1978, 1981). Cerca de 55,2% da terminação das descontinuidades é noutra descontinuidade, ocorrendo 28,4% com terminação em rocha e 16,4% termina em obscura (Figura 47).

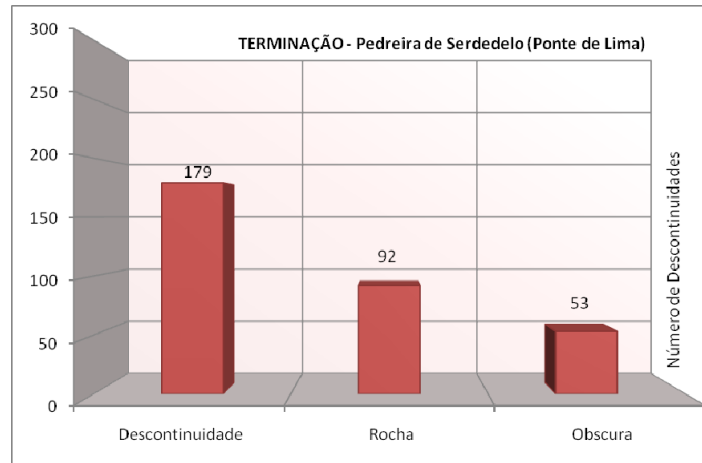


Figura 47. Tipo de terminação das descontinuidades no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

TERMINAÇÃO												
1.ª FAMÍLIA			2.ª FAMÍLIA			3.ª FAMÍLIA			GERAL			
30,9%	47,3%	21,8%	31,4%	57,1%	11,4%	43,8%	53,1%	3,1%	28,4%	55,2%	16,4%	
17	26	12	11	20	4	14	17	1	92	179	53	
R	D	O	R	D	O	R	D	O	R	D	O	
Rocha	Descontinuidade	Obscura	Rocha	Descontinuidade	Obscura	Rocha	Descontinuidade	Obscura	Rocha	Descontinuidade	Obscura	

Figura 48. Análise do tipo de terminação das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

3.3.6 Abertura

A abertura é definida como a distância média, medida na perpendicular, entre os bordos da descontinuidade (ISRM, 1978). A dimensão da abertura revela-se muito importante nos estudos relativos à permeabilidade e à resistência ao corte de um maciço rochoso. A rugosidade é um dos factores que mais influencia a variação da abertura ao longo de uma descontinuidade. As descontinuidades são do tipo diaclases, com aberturas dominantes apertadas – fechadas (<0,1 mm). As aberturas medidas com registos mais elevados são as zonas mais susceptíveis a processos de rotura, ou seja, em caso de um desabamento, muito provavelmente será um desses locais o responsável por essa ocorrência.

Cerca de 68,8% e 30,9% das descontinuidades classificam-se como fechadas e abertas respectivamente, segundo a classificação ISRM (1978, 1981). Apenas 0,3% das descontinuidades são classificadas como muito abertas (Figura 49).

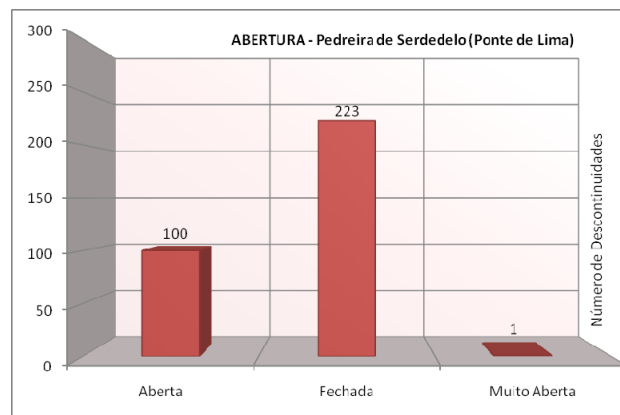


Figura 49. Abertura das descontinuidades no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

Cada uma das classes de abertura está dividida em três subclasses, que permite uma maior grau de refinamento na análise. Na generalidade do maciço, pode-se constatar, através da análise gráfica da base de dados do levantamento das descontinuidades, que as descontinuidades classificadas como “Fechada” encontram-se todas na subclasse “Muito Apertada”. As descontinuidades classificadas como “Aberta” encontram-se distribuídas entre as subclasses “Aberta” e “Razoavelmente Larga”. A primeira família de descontinuidades apresenta 0,59 mm de abertura média, a segunda família 0,42 mm e a terceira família 1,29 mm. O valor médio da abertura é 0,78 mm na generalidade do maciço, como tal, todas as descontinuidades situadas fora dos intervalos determinados para a definição das famílias principais de descontinuidades apresentam uma abertura média ligeiramente superior às mesmas (0,79 mm). Na figura 50 pode-se visualizar a análise da abertura geral das descontinuidades e das três famílias principais.

Cerca de 70,4% das descontinuidades cartografadas não possui qualquer tipo de preenchimento. Os preenchimentos de argila dura apresentam alguma expressão (13,3%), seguida de outro tipo de preenchimento (lodo, saibro, etc.) (10,8%). Contudo são menos expressivos os preenchimentos com argila “mole” (4%), rocha esmagada (cataclasito/milonito) e quartzo (Figura 52). Ao analisar os tipos de preenchimento nas diferentes famílias definidas, constata-se uma tendência constante de resultados (Figura 53).

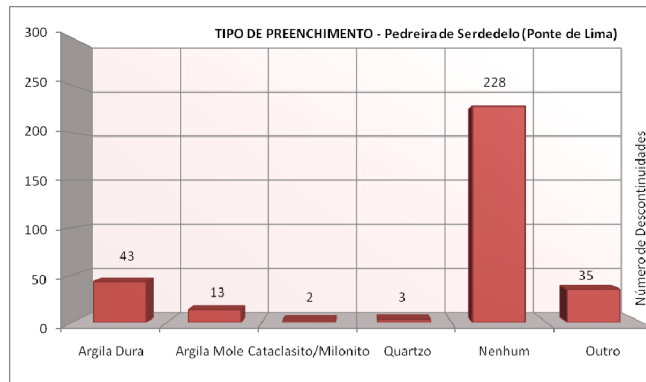


Figura 52. Tipo de preenchimento das descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

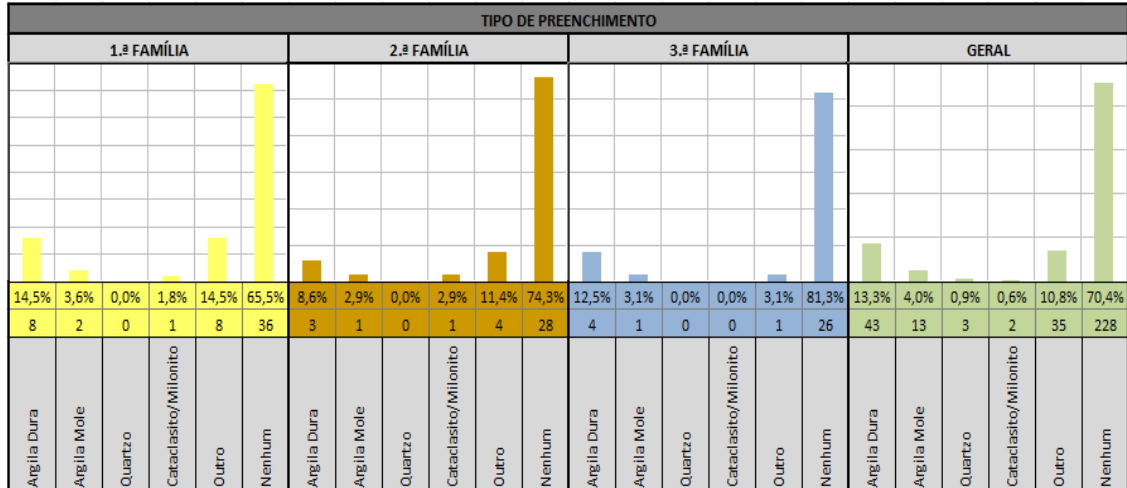


Figura 53. Análise dos tipos de preenchimento das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

3.3.8 Rugosidade

A rugosidade manifesta-se pela presença de irregularidades nas paredes das descontinuidades, podendo estas ser de diferentes tipos e de diferentes ordens (ISRM, 1978). A presença de rugosidade nas descontinuidades traduz-se na prática como um aumento da resistência de corte ao longo da superfície da descontinuidade, introduzindo perturbações na percolação e no conseqüente regime de escoamento instalado. No que diz respeito à rugosidade, é predominantemente do tipo plana (Figura 54), com cerca de 43,8% das descontinuidades. Na classe denteada e ondulada estão englobadas, respectivamente, 13,3% e 42,9% das descontinuidades cartografadas no campo.

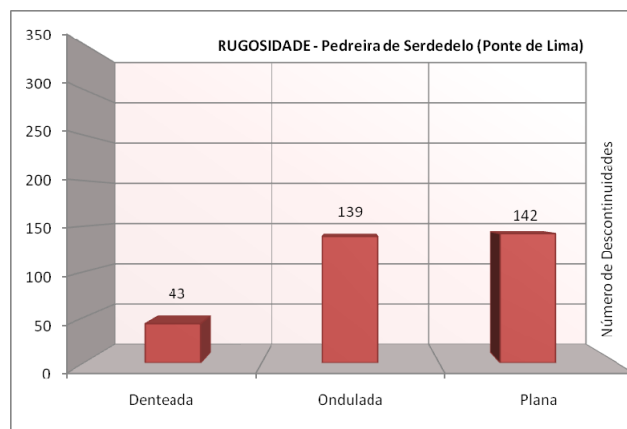


Figura 54. Tipo de rugosidade das descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

A três classes definidas para a rugosidade podem subdividir-se em três subclasses cada. No maciço da Pedreira de Serdedelo, dentro da classe plana destaca-se a subclasse lisa a algo rugosa (R_{1-2}). Ao analisar o parâmetro rugosidade das descontinuidades nas diferentes famílias verifica-se uma tendência que acompanha a globalidade do maciço, ou seja, a classe plana é a mais representativa em todas as famílias, destacando-se a subclasse lisa a algo rugosa (R_{1-2}) (Figura 55).

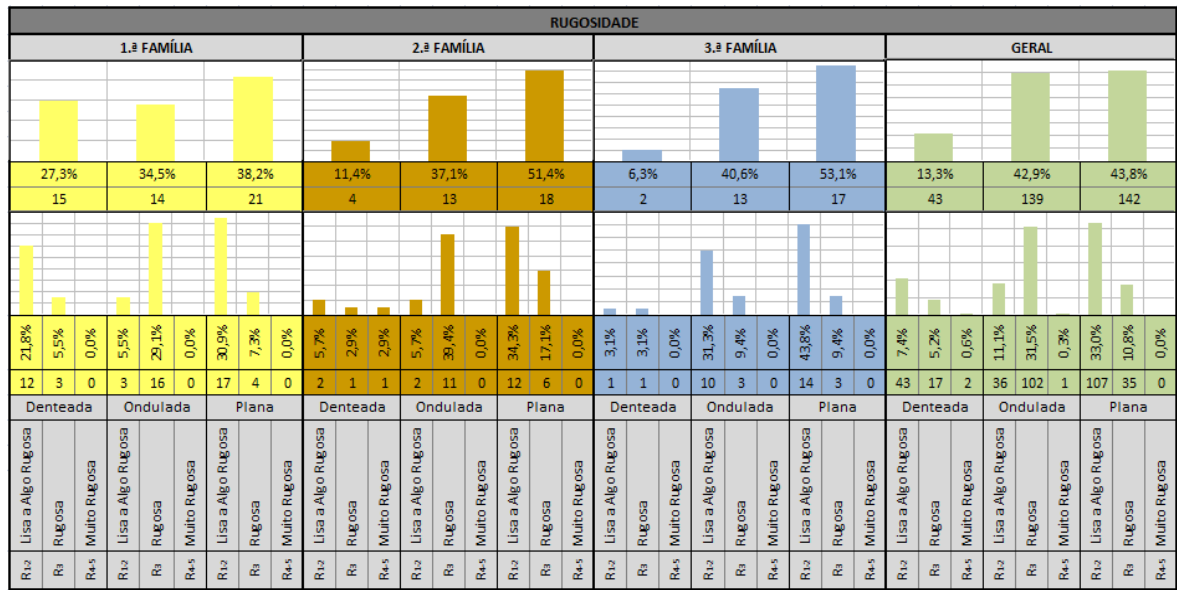


Figura 55. Análise dos tipos de rugosidade das famílias principais e no geral no maciço rochoso.

3.3.9 Curvatura

Em termos globais, a curvatura das descontinuidades é fundamentalmente do tipo planas ligeiramente curvas (C_{1-2}), com cerca de 49,4% de representatividade e do tipo curvas (C_3), com cerca de 46,9% (Figura 56). O maciço apresenta no geral pouca expressão de descontinuidades muito curvas (C_{4-5}).

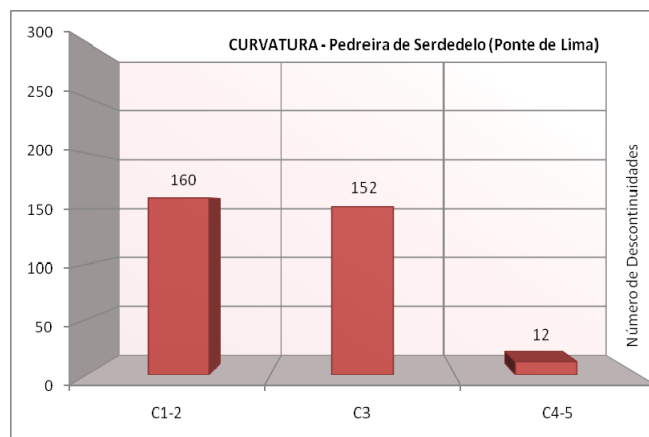


Figura 56. Tipo de curvatura das descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

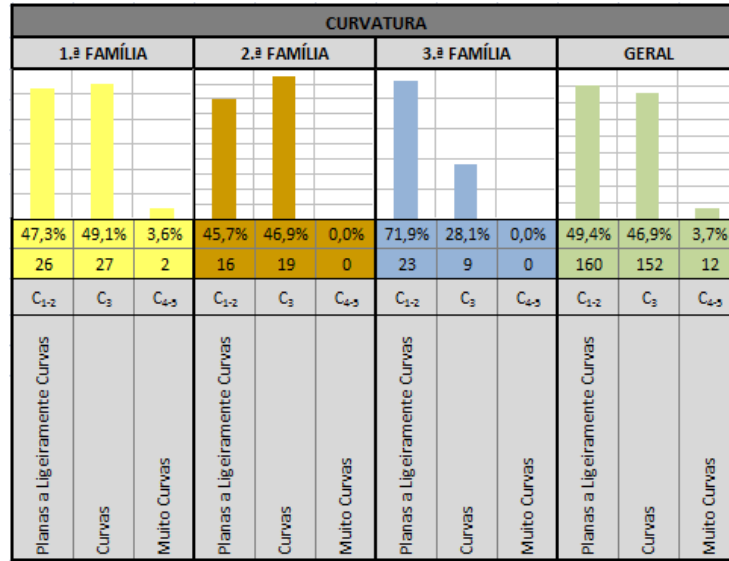


Figura 57. Análise do tipo de curvatura das descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

3.3.10 Presença de água

Quanto à presença de água, o maciço apresenta, de modo geral, alguma humidade, podendo pontualmente ocorrer alguma “escorrência”, “gotejamento” ou mesmo um baixo fluxo hidráulico. Esta última situação está relacionada com uma pequena linha de água de natureza torrencial, a ribeira da Boca, onde a água tende a circular nessas mesmas descontinuidades do maciço (Figura 58). É, ainda, de salientar que nesses mesmos pontos existia uma maior quantidade de vegetação que nos outros locais.



Figura 58. Presenças pontuais de água no maciço rochoso.

As descontinuidades apresentam-se maioritariamente secas (73,1%) com cerca de 17,0% de descontinuidades húmidas, sendo que no eixo da pedraira identificaram-se algumas descontinuidades gotejantes (9,6%) ou mesmo com algum fluxo.

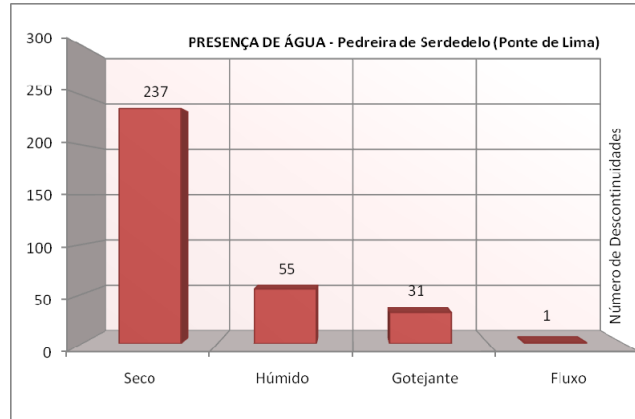


Figura 59. Tipo de presença de água nas descontinuidades do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

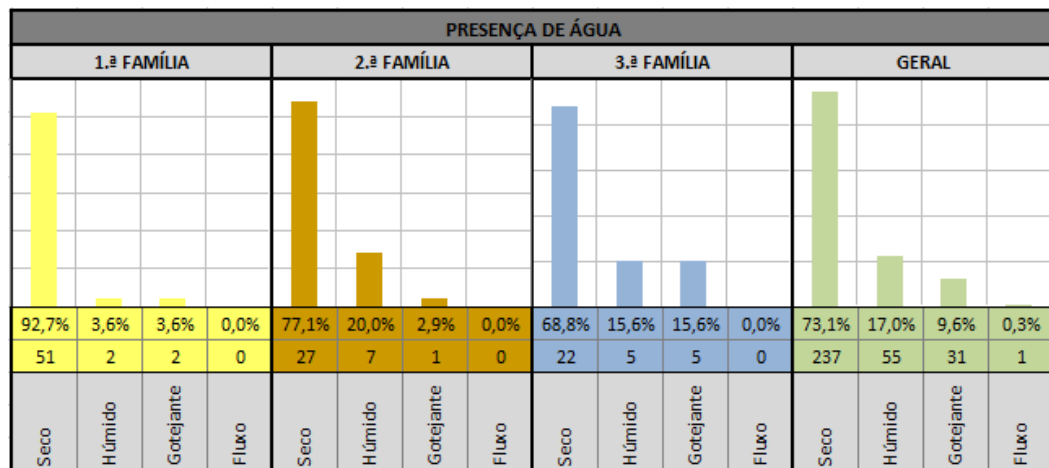


Figura 60. Análise do tipo de presença de água nas descontinuidades das famílias principais e no geral do maciço rochoso.

Quadro 23. Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos dos painéis cartografados com recurso à técnica de amostragem linear em superfícies expostas dos taludes das bancadas do maciço de Serdedelo.

Parâmetro	1.ª Família	2.ª Família	3.ª Família	Geral
Tipo de descontinuidade	Diaclases	Diaclases	Diaclases	Diaclases
Grau de alteração	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁
Grau de fracturação	F ₂	F ₂ a F ₃₋₄	F ₂	F ₂
Abertura	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada
	Muito apertada	Muito apertada	Muito apertada	Muito apertada
Tipo de preenchimento	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Rugosidade	Plana	Plana	Plana	Plana
	R ₁₋₂	R ₁₋₂	R ₁₋₂	R ₁₋₂
Continuidade	Pouco contínua	Muito pouco contínua	Muito pouco contínua	Muito pouco contínua
Terminação	Descontinuidade	Descontinuidade	Descontinuidade	Descontinuidade
Curvatura	C ₃	C ₃	C ₁₋₂	C ₁₋₂
Presença de água	Seco	Seco	Húmido	Seco

3.3.11 Caracterização do grau de compartimentação do maciço

O sistema de famílias de descontinuidades, que é característico de uma dada zona do maciço, é designado por sistema de compartimentação. O sistema de compartimentação de um maciço rochoso pode representar-se tridimensionalmente num bloco diagrama (ISRM, 1981). A intersecção das famílias de descontinuidades presentes num maciço rochoso define o seu *bloco unitário*. O cálculo do bloco unitário obteve-se pela análise do quadro anterior, pelos valores obtidos no estereograma e diagrama de rosetas e na média dos espaçamentos entre as descontinuidades sub-verticais e sub-horizontais.

Para o cálculo do bloco unitário utilizamos o Índice Volumétrico, Jv.

Espaçamento médio (cm)

Família 1 – 110 cm

$$J_v = (1/e_1) + (1/e_2) + (1/e_3)$$

Família 2 – 113 cm

$$J_v = (1/1,10) + (1/1,13) + (1/1,08)$$

Família 3 – 108 cm

$$J_v = 2,72 \text{ descontinuidades/m}^3$$

A partir dos factos constatados, é possível concluir que o sistema de compartimentação do maciço estudado, segundo os critérios ISRM (1981) (Quadro 24), é caracterizado por blocos de tamanho médio, com as medidas constantes de 1,10 m por 3,67 m (Figura 61).

Quadro 24. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha com base no índice volumétrico (ISRM, 1981).

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

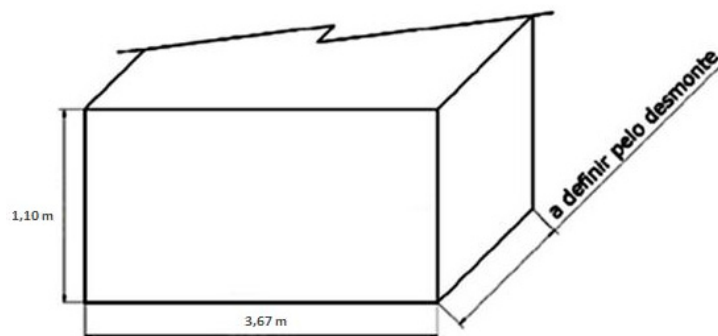


Figura 61. Representação esquemática do bloco unitário previsível na área investigada.

3.3.12 Ensaios de resistência “in situ”

Completaram-se os trabalhos de campo com a realização de ensaios de resistência com o Martelo de Schmidt, figura 62, no qual foram obtidos os seguintes resultados compilados no Anexo II.

Para a caracterização dum maciço rochoso é de grande utilidade o conhecimento da resistência à compressão do material-rocha, o qual se pode avaliar, como referido anteriormente, recorrendo à determinação da dureza com o esclerómetro portátil (ou martelo de Schmidt do tipo L), podendo conduzir à estimativa do valor da resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1985, 2007).



Figura 62. Exemplo de aplicação do martelo de Schmidt num maciço rochoso para avaliar a sua resistência à compressão.

Foram realizadas 46 estações geomecânicas para a realização dos ensaios de resistência de campo com esclerómetro portátil. Através das curvas de calibração (ábaco de Miller), adequadas ao modelo utilizado (Figura 63), e considerando uma densidade média da rocha de $26,65 \text{ KN/m}^3$ (Fonseca, 2008; Ramos, 2008), constatou-se assim (Figura 64) que o granitóide de Serdedelo se classifica, na sua maioria, como sendo do tipo S_2 (resistência elevada), segundo a classificação da ISRM (1981), sendo o valor médio da resistência de 122,2 MPa.

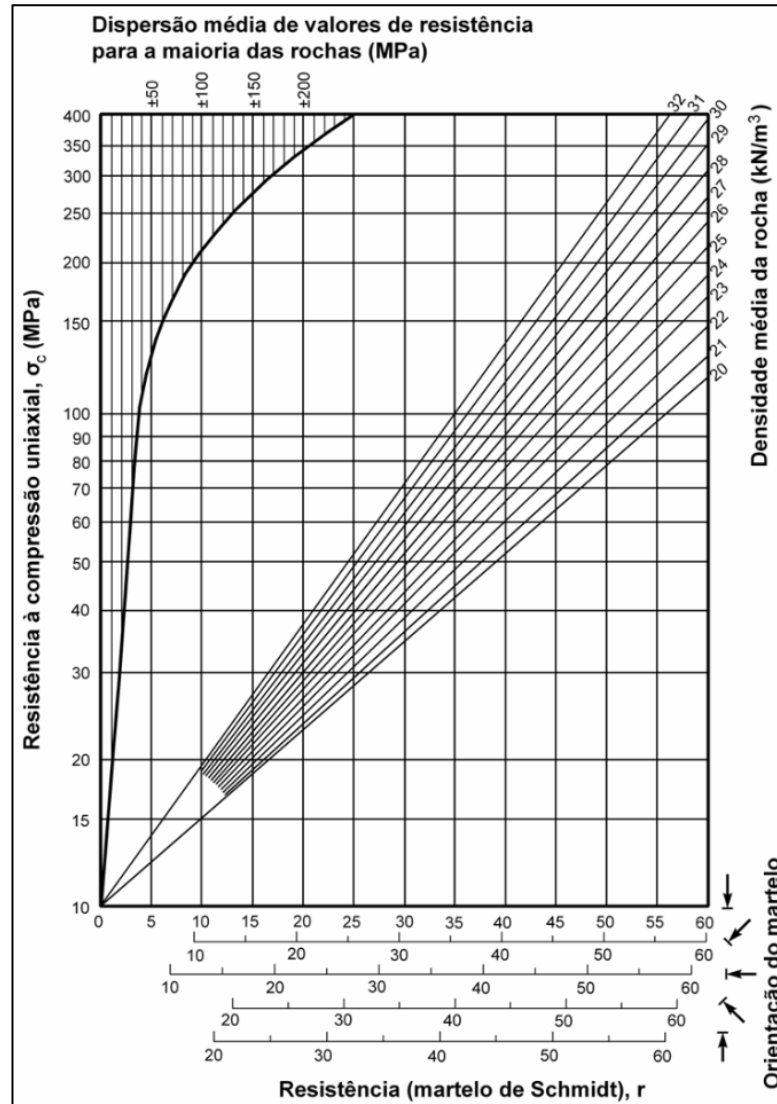


Figura 63. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo de Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

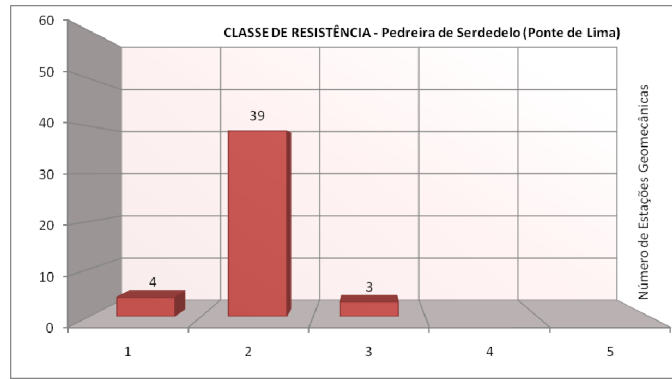


Figura 64. Classes de resistência à compressão uniaxial no maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

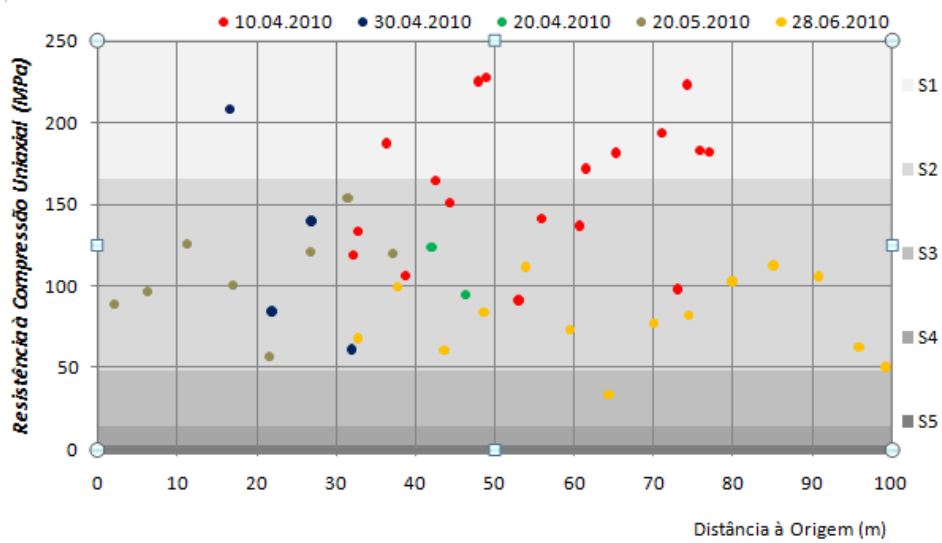


Figura 65. Projecção dos valores da resistência à compressão uniaxial segundo os perfis lineares das bancadas cartografadas do maciço da Pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

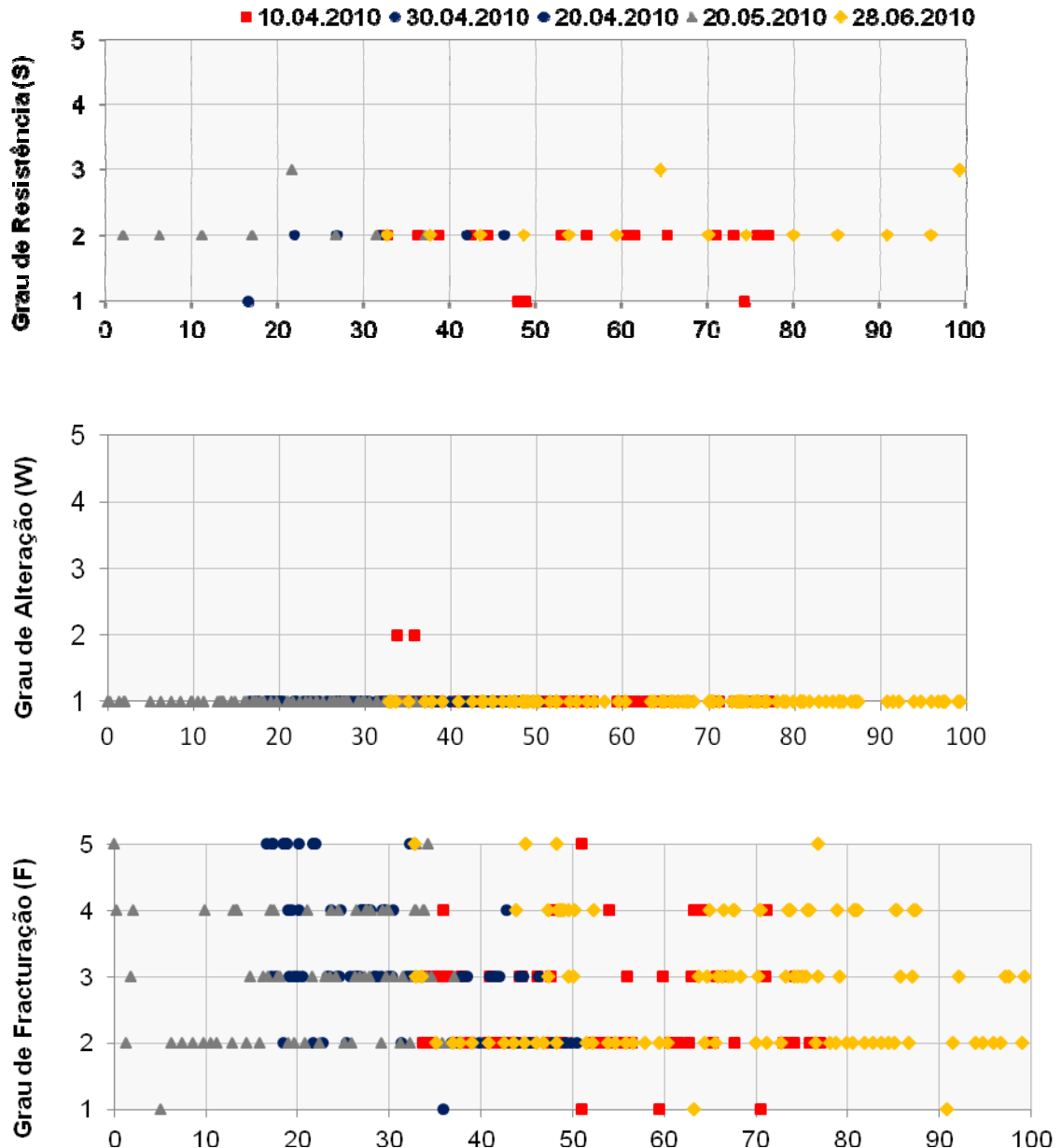


Figura 66. Análise conjunta dos parâmetros comumente utilizados para apoiar o zonamento geotécnico.

3.4 Esboço do zonamento geotécnico de pormenor

Foi efectuado um reconhecimento geológico e geomorfológico de superfície (ver pormenores em Ramos, 2008 e Fonseca, 2008), na área envolvente à pedreira de Serdedelo, com o objectivo de estimar a representatividade cartográfica da fácies granítica em afloramento e a qualidade geotécnica do material rochoso à (sub)superfície. Contudo, verificou-se que os terrenos adjacentes ao limite de exploração encontram-se com uma vegetação rasteira muito densa, o que impossibilitou em alguns sectores a inspecção visual e reconhecimento cartográfico pormenorizado do tipo de substrato rochoso.

Tendo em vista a melhor compreensão da rede de fracturação dominante na compartimentação do maciço rochoso da pedreira de Serdedelo, elaborou-se um esboço de zonamento geotécnico de (sub)superfície, em que se representa uma síntese da fácies granítica e as megaestruturas visíveis na referida pedreira. A escala de trabalho para a cartografia referida foi a de 1/1000. Com efeito, na cartografia apresentada esboçam-se as principais unidades geotécnicas locais, resultado do cruzamento e síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica que traduz uma tentativa de esboçar a qualidade geotécnica do maciço (Figura 67). Deste zonamento geotécnico (sub)superficial resultaram as seguintes unidades (Ramos, 2008; Fonseca, 2008; Fonseca et al., 2010):

- ✓ ZG I – Granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, alterado a muito alterado (W_{4-5}), com espaçamento afastado (F_{1-2}); resistência à compressão uniaxial muito baixa (<20 MPa);
- ✓ ZG II – Granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, medianamente alterado (W_3) a pouco alterado (W_2), com espaçamento afastado (F_2); resistência à compressão uniaxial média a elevada (50 a 80 MPa; S_3 a S_2);
- ✓ ZG IIIa – Granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, são a pouco alterado (W_{1-2}), com espaçamento afastado a medianamente afastado (F_{2-3}); resistência à compressão uniaxial elevada (100 - 140 MPa; S_2); Índice de Carga Pontual $IS_{(50)} = 6$ a 7 MPa;
- ✓ ZG IIIb – Granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, são a muito pouco alterado (W_1), com espaçamento afastado (F_2); resistência à compressão uniaxial elevada (120 - 160 MPa; S_2); Índice de Carga Pontual $IS_{(50)} = 11$ a 12 MPa.

O zonamento geotécnico de pormenor por nós realizado (consultar figura 68) permitiu enquadrar a área analisada em pormenor na zona geotécnica IIIb, corroborando os estudos desenvolvidos por Ramos (2008) e Fonseca (2008).

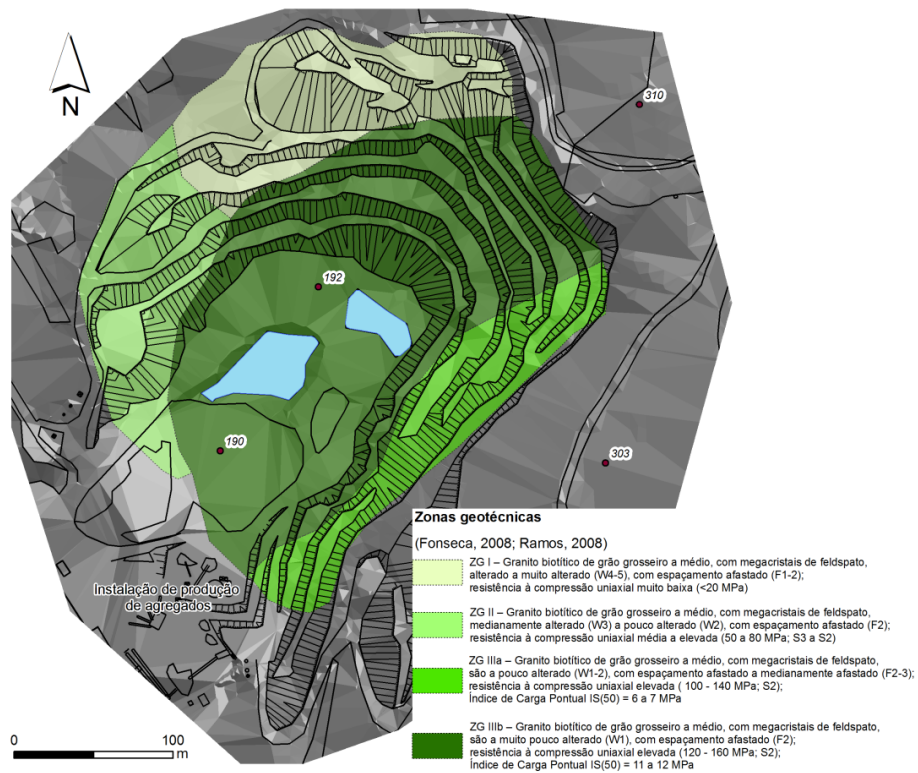


Figura 67. Esboço do zonamento geotécnico de superfície da área da pedra de Serdedelo (segundo Fonseca et al., 2010).

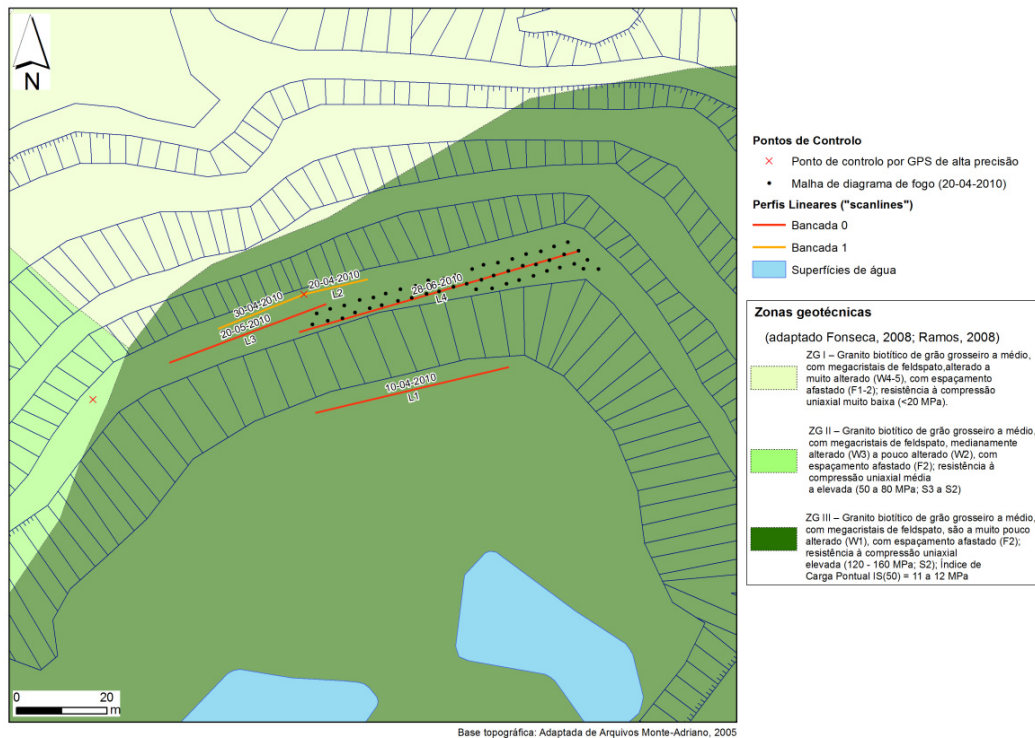


Figura 68. Esboço do zonamento geotécnico de pormenor do sector estudado na pedra de Serdedelo.

3.5 Análise dos desvios de perfuração

A análise dos desvios de perfuração será efectuada de acordo com três perspectivas, seguidamente apresentadas: o emboquilhamento, o desvio pontual e o desvio de flexão. Em cada uma delas serão descritos os critérios de classificação que irão definir o tipo de desvio que o furo apresenta. Os valores definidos para limites podem variar consoante o que se pretende analisar, com que rigor e em que circunstâncias. Consequentemente, os valores registados servem apenas de referência para a análise proposta nesta tese mas não são generalizáveis a outros contextos.

3.5.1 Emboquilhamento

→ **Desvio (X):** Avaliação do valor do ângulo de direcção do furo nos primeiros 2 m de perfuração. Considera-se erro de emboquilhamento (X) quando nos primeiros 2 m de perfuração o valor absoluto do ângulo de direcção do furo é maior que 2 graus.

- (+) Erro de emboquilhamento para a esquerda;
- (-) Erro de emboquilhamento para a direita.

→ **Desvio (Y):** Avaliação do valor do desvio do ângulo de inclinação do furo nos primeiros 2 m de perfuração. Considera-se erro de emboquilhamento (Y) quando nos primeiros 2 m de perfuração o valor do desvio absoluto do ângulo de inclinação do furo é maior que 2 graus.

- (+) Erro de emboquilhamento para a retaguarda;
- (-) Erro de emboquilhamento para a frente.

Os desvios de emboquilhamento são registados a partir da primeira leitura efectuada.

A figura 68 permite exemplificar a ocorrência de um desvio de emboquilhamento em (X), para a direita (-), enquanto a figura 69 apresenta um desvio de emboquilhamento (Y), para a retaguarda (+).

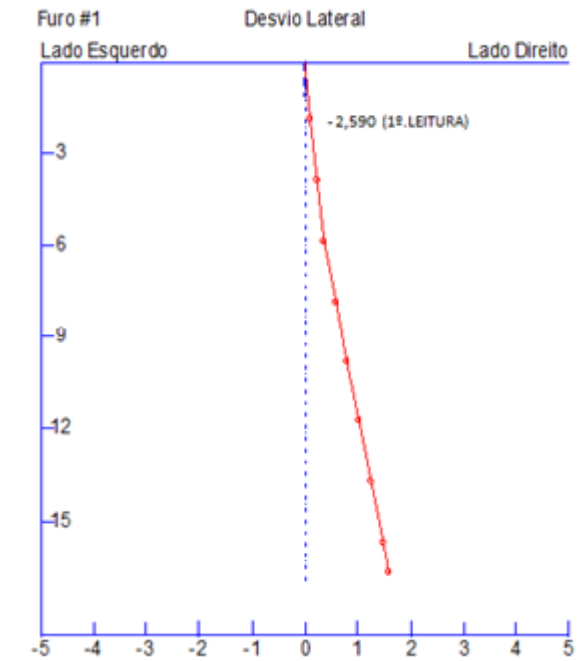


Figura 69. Exemplo de um desvio de emboquilhamento do ângulo de direcção (X) – furo n.º 1 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 20/04/2010, na pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).

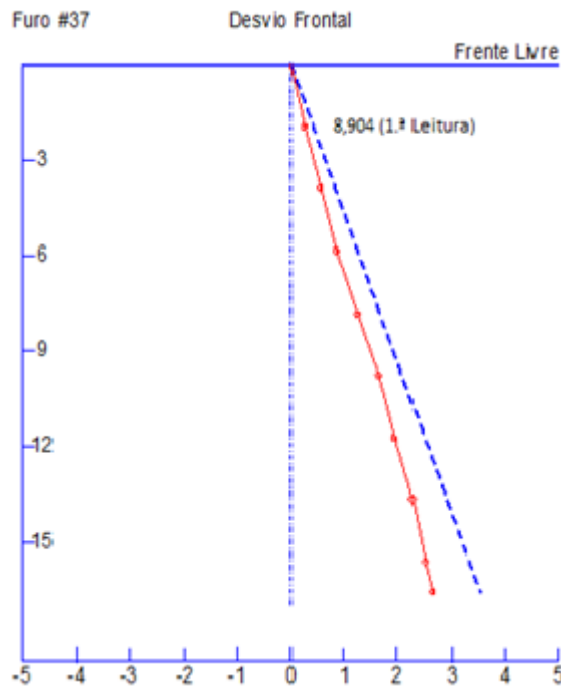


Figura 70. Exemplo de um desvio de emboquilhamento do ângulo de inclinação (Y) – furo n.º 37 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 20/04/2010, na pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).

3.5.2 Desvio Pontual

→ **Desvio (X):** Avaliação dos valores das variações do ângulo de direcção do furo ao longo do mesmo. Considera-se desvio pontual quando um dos valores das variações absolutas do ângulo de direcção do furo é maior que 2 graus.

- (+) Desvio pontual para a esquerda;
- (-) Desvio pontual para a direita.

→ **Desvio (Y):** Avaliação dos valores das variações do ângulo de inclinação do furo ao longo do mesmo. Considera-se desvio pontual quando um dos valores das variações absolutas do ângulo de inclinação do furo é maior que 2 graus.

- (+) Desvio pontual para a retaguarda;
- (-) Desvio pontual para a frente.

Os desvios pontuais são observados a partir da diferença entre duas leituras de ângulos.

A figura 71 permite exemplificar a ocorrência de um desvio pontual em (X), para a direita (-), enquanto a figura 72 representa um desvio pontual (Y), para a retaguarda (+).

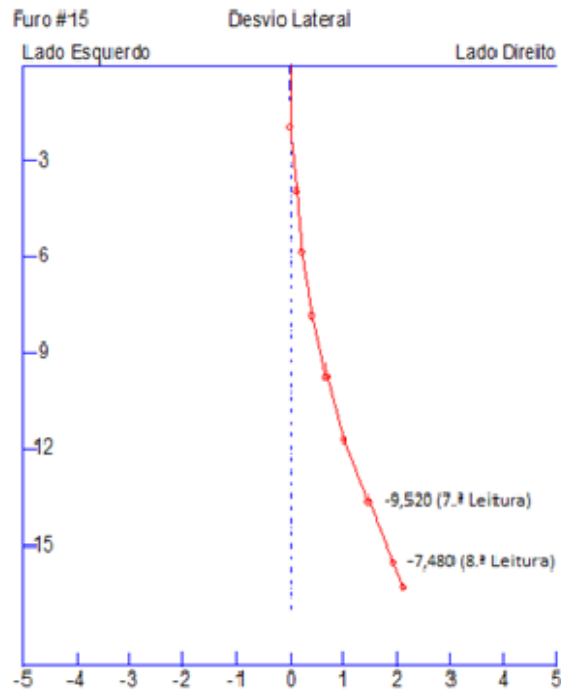


Figura 71. Exemplo de um desvio pontual do ângulo de direcção (X) – furo n.º 15 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 20/04/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

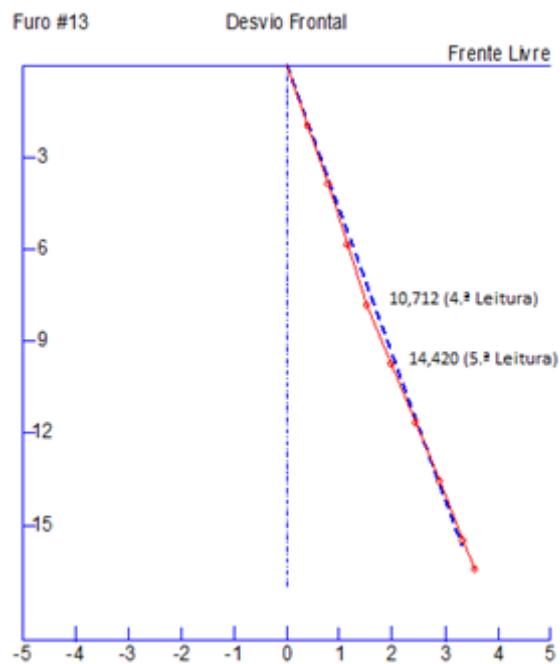


Figura 72. Exemplo de um desvio pontual do ângulo de inclinação (Y) – furo n.º 13 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 30/06/2010, na pedreira de Serdedelo (Ponte de Lima).

3.5.3 Desvio de Flexão

→ **Desvio (X):** Avaliação dos valores das variações do ângulo de direcção do furo ao longo do mesmo. Considera-se desvio de flexão quando, excepto o emboquilhamento, todos os restantes valores absolutos das variações do ângulo de direcção do furo são maiores que 1 grau e com o mesmo sentido (+ ou -).

- (+) Desvio de flexão para a esquerda;
- (-) Desvio de flexão para a direita.

→ **Desvio (Y):** Avaliação dos valores das variações do ângulo de inclinação do furo ao longo do mesmo. Considera-se desvio de flexão quando, excepto o emboquilhamento, todos os restantes valores absolutos das variações do ângulo de inclinação do furo são maiores que 1 grau e com o mesmo sentido (+ ou -).

- (+) Desvio de flexão para a retaguarda;
- (-) Desvio de flexão para a frente.

Os desvios de flexão são classificados a partir da diferença de 1 grau de 2 em 2 metros em pelo menos 5 leituras não consecutivas. A figura 73 permite exemplificar a ocorrência de um desvio de flexão em (X), para a esquerda (+), enquanto a figura 74 apresenta um desvio de flexão (Y), para a retaguarda (+).

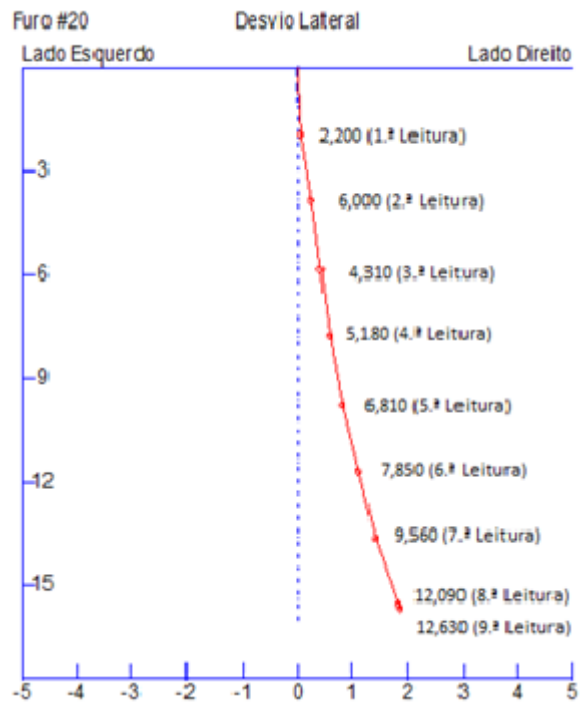


Figura 73. Exemplo de um desvio de flexão do ângulo de direcção (X) – furo n.º 20 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 30/06/2010, na pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).

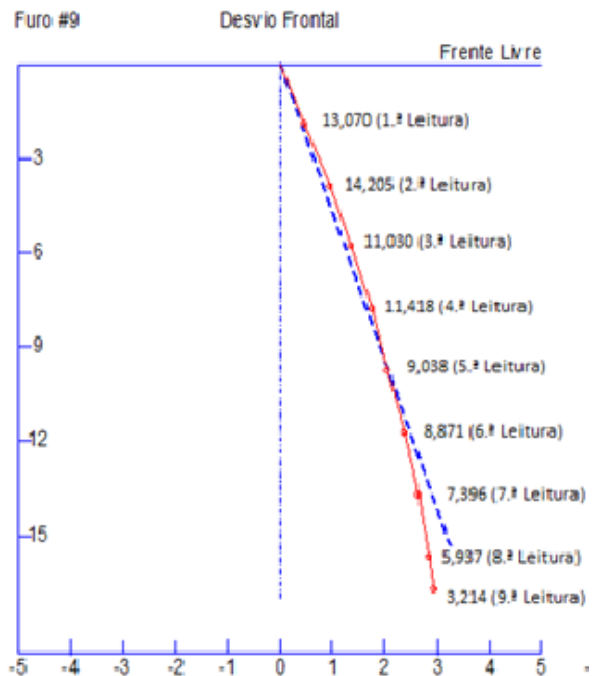


Figura 74. Exemplo de um desvio de flexão do ângulo de inclinação (Y) – furo n.º 9 do Ensaio de Boretrak realizado, no dia 30/06/2010, na pedra de Serdedelo (Ponte de Lima).

3.6 Resultados

3.6.1 Emboquilhamento

A qualidade do emboquilhamento depende essencialmente de dois parâmetros que foram devidamente monitorizados, isto é, a limpeza e a regularidade da bancada. A limpeza da bancada, ou seja, a quantidade de material existente na sua superfície afecta o início da operação de perfuração e, portanto, a qualidade do furo. Relativamente ao segundo parâmetro, a regularidade da bancada, foi devidamente monitorizado, o qual será objecto de estudo desenvolvido mais à frente.

3.6.1.1 Limpeza da bancada

Foram monitorizados 82 furos em termos de emboquilhamento, e, como se pode verificar na figura 75, a maior parte dos furos apresentam um emboquilhamento sobre algum a muito material desagregado, cerca de 41,5% e 28,0%, respectivamente (Quadro 25).

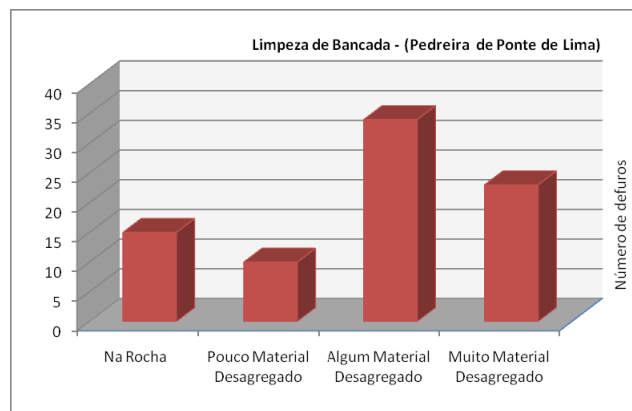
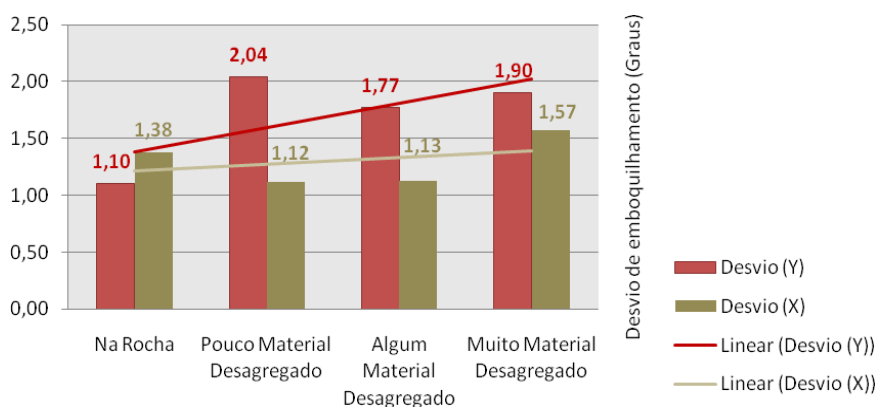


Figura 75. Emboquilhamento: Limpeza da bancada.

A qualidade dos furos é afectada por este parâmetro e o estado de fracturação e de desagregação em que se encontra a zona de emboquilhamento potencia um erro de inclinação e/ou direcção do furo. Assim, na zona de emboquilhamento, o erro irá repercutir-se e, normalmente, agravar-se-á ao longo do furo.

Quadro 25. Limpeza da bancada: classes de emboquilhamento e respectivos valores de análise.

Limpeza da bancada			Furos		Erro de emboquilhamento	
Classes			(Número)	(%)	(X)	(Y)
(m)			(Número)	(%)	(Graus)	(Graus)
Na Rocha	0		15	18,3%	1,38	1,10
Pouco Material Desagregado	< 0,25		10	12,2%	1,12	2,04
Algum Material Desagregado	0,25 - 0,5		34	41,5%	1,13	1,77
Muito Material Desagregado	> 0,5		23	28,0%	1,57	1,90
Total:			82	100%		

**Figura 76.** Classes de emboquilhamento.

Verificou-se que o estado da zona de emboquilhamento influencia os desvios de perfuração, sendo a direcção mais afectada do que a inclinação.

3.6.1.2 Regularidade da bancada

A regularidade da bancada é outro factor importante a considerar nos desvios de perfuração. Como se pode verificar na figura 76, as bancadas apresentam-se maioritariamente regulares (64,6%), apesar de existir uma percentagem considerável de bancadas irregulares, 25,6% (Quadro 26). As bancadas irregulares e muito irregulares afectam a qualidade do furo,

principalmente pela dificuldade que uma bancada irregular pode causar, na estabilização do carro e coluna de perfuração.

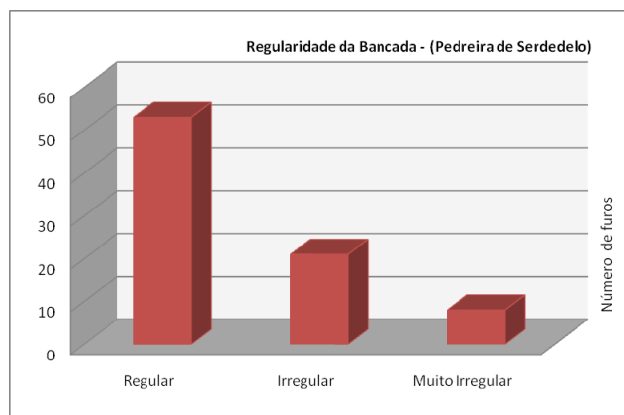


Figura 77. Regularidade das bancadas.

Quadro 26. Regularidade da bancada: classes de emboquilhamento e respectivos valores de análise.

Regularidade da bancada	Furos			Erro de emboquilhamento
	Classes	(Número)	(%)	(X)
	(m)			(Graus)
Regular	< 0,5	53	64,6%	1,35
Irregular	0,5 - 1,0	21	25,6%	1,05
Muito Irregular	> 1,0	8	9,8%	1,39
Total:		82	100%	

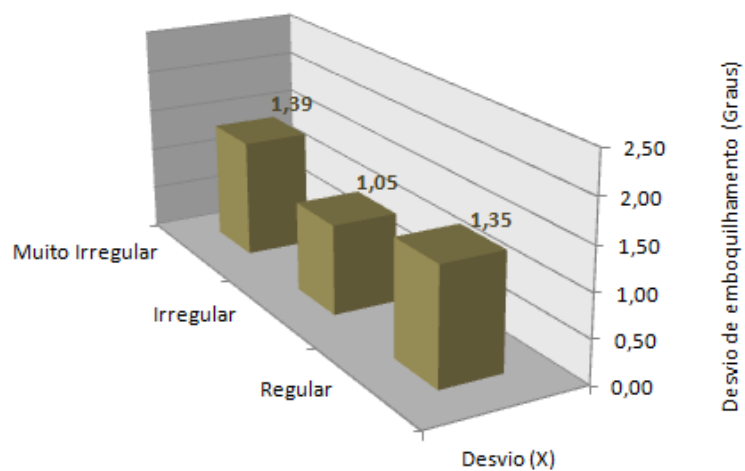


Figura 78. Emboquilhamento: Regularidade das bancadas

Os furos ensaiados apresentam uma baixa mas considerável percentagem de furos com erros de emboquilhamento, como se poderá verificar no Quadro 27.

Quadro 27. Análise do desvio de emboquilhamento.

EMBOQUILHAMENTO		FUROS	
Taxa de Desvio (X)		(Número)	(%)
Furos sem erro de emboquilhamento		38	43,2%
Furos com erros de emboquilhamento (+/-)	88	50	56,8%
Furos com erros de emboquilhamento para a esquerda (+)		14	15,9%
Furos com erros de emboquilhamento para a direita (-)		36	40,9%
Taxa de Desvio (Y)		(Número)	(%)
Furos sem erro de emboquilhamento		69	78,4%
Furos com erros de emboquilhamento (+/-)	88	19	21,6%
Furos com erros de emboquilhamento para a retaguarda (+)		10	11,4%
Furos com erros de emboquilhamento para a frente (-)		9	10,2%

Os desvios pontuais são pouco significativos, o que pode indiciar uma reduzida influência pontual de trajectória do furo potenciada pelas anisotropias do maciço rochoso.

Quadro 28. Análise do desvio de flexão.

DESVIO DE FLEXÃO	FUROS	
Taxa de Desvio (X)	(Número)	(%)
Furos sem desvio de flexão	65	73,9%
Furos com desvio de flexão (+/-)	23	26,1%
Furos com desvio de flexão para a esquerda (+)	18	20,4%
Furos com desvio de flexão para a direita (-)	5	5,7%
Taxa de Desvio (Y)	(Número)	(%)
Furos sem desvio de flexão	84	95,4%
Furos com desvio de flexão (+/-)	4	4,6%
Furos com desvio de flexão para a retaguarda (+)	2	2,3%
Furos com desvio de flexão para a frente (-)	2	2,3%

3.6.2 Parâmetros geométricos do diagrama de fogo

→ **Inclinação do furo (i):** Foram executados furos com duas inclinações, 10° e 12°. Na análise da inclinação nota-se um ligeiro aumento dos desvios para a frente.

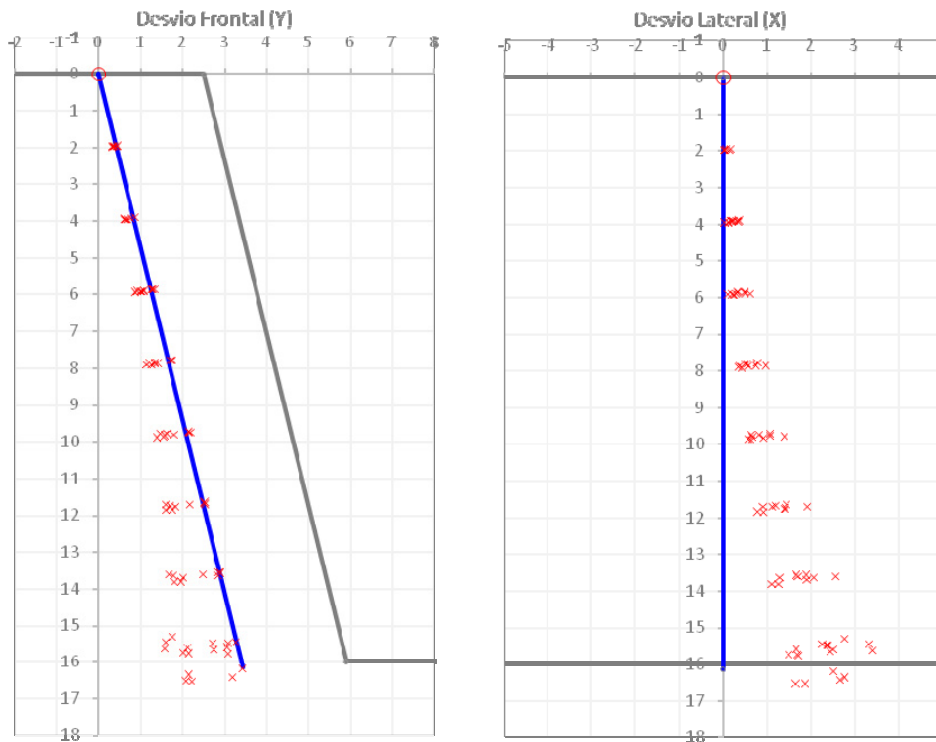


Figura 79. Furos com inclinação de 10°.

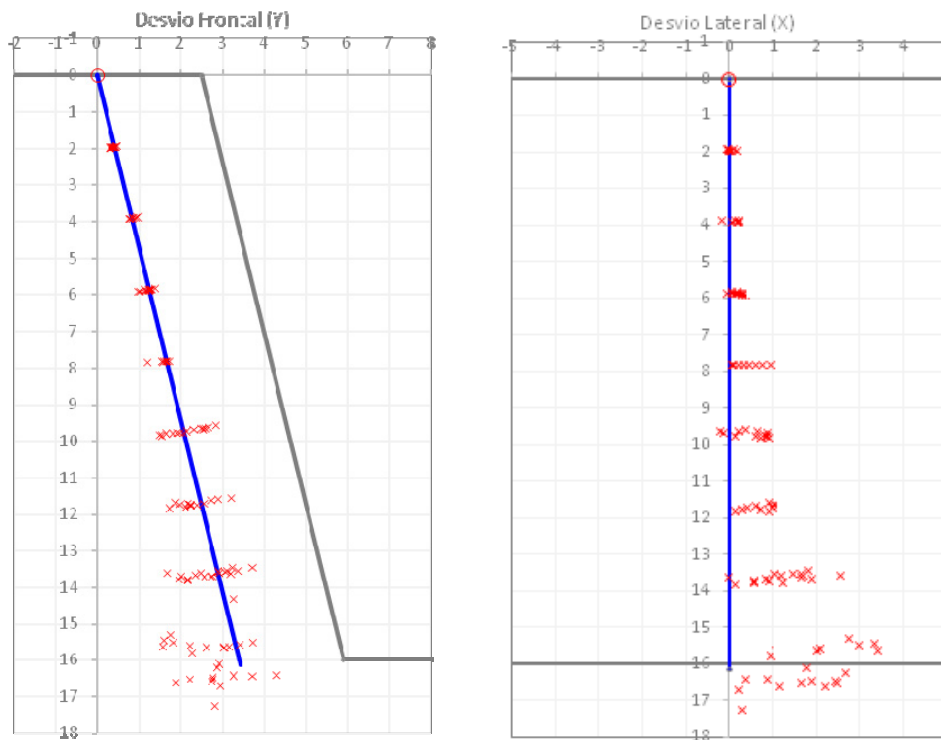


Figura 80. Furos com inclinação de 12°.

→ **Comprimento do furo (h):** Da análise do desvio em profundidade, ressalta o incremento do mesmo em cada metro que avança a furação. Os desvios que os furos apresentam em profundidade são quase exponenciais.

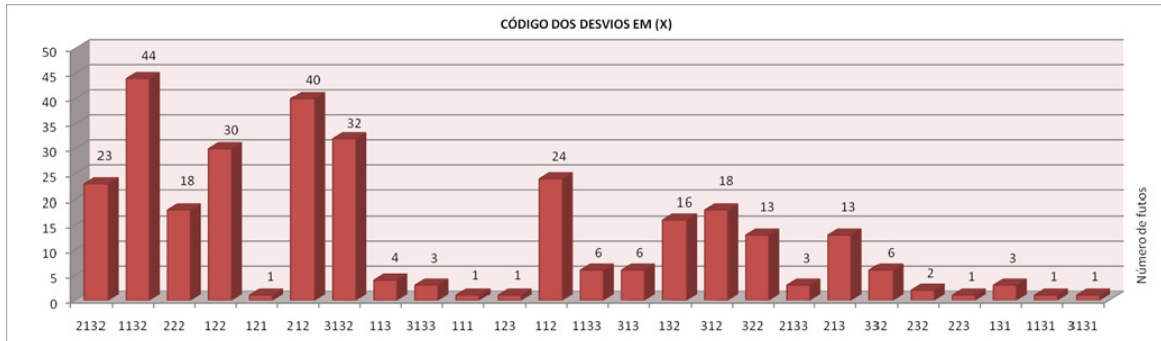


Figura 81. Representação da ocorrência dos diferentes tipos de códigos presentes nos desvios em (X).

A figura 81 permite aferir a existência de 25 códigos que caracterizam os desvios de perfuração em (X), entre estes destacam-se códigos de 3 (o número mais à esquerda representa o tipo de desvio de emboquilhamento presente no furo, o número central diz respeito ao tipo de desvio pontual e o número mais à direita classifica o tipo de desvio de flexão) e 4 algarismos. A grande diferença dos furos com códigos de 3 e 4 algarismos cinge-se ao facto de existirem furos com desvio pontual quer para a esquerda quer para a direita.

Os códigos dos desvios em (X) que mais se destacam neste eixo são o 1132 (é um furo com desvio de emboquilhamento para a esquerda, com desvio pontual para a esquerda e para a direita e sem desvio de flexão), com cerca de 14,2 %, o 212 (é um furo sem desvio de emboquilhamento, com desvio pontual para a esquerda e sem desvio de flexão), com 12,9 %, o 3132 (é um furo com desvio de emboquilhamento para a direita, com desvio pontual para a esquerda e para a direita e sem desvio de flexão), com 10,3% e o 122 com cerca de 9,7% dos 310 furos ensaiados.

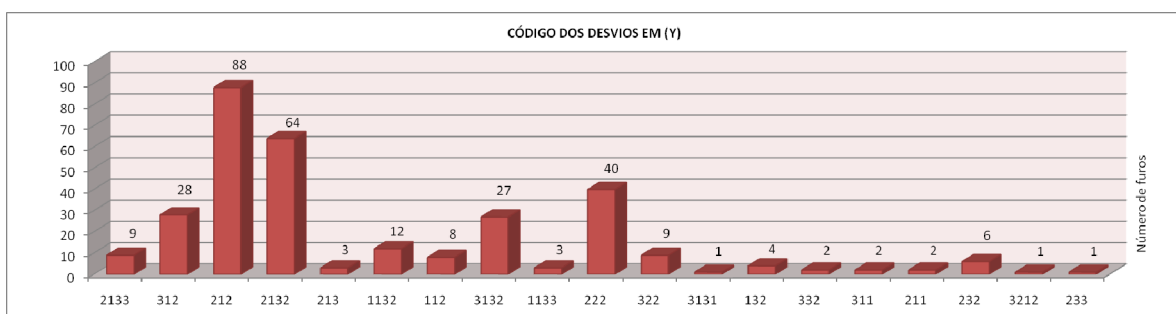


Figura 82. Representação da ocorrência dos diferentes tipos de códigos presentes nos desvios em (Y).

A figura 82 permite observar os 19 códigos que classificam os desvios de perfuração em (Y), estudados nos 310 furos estudados. Dentre estes, destacam-se o 212 (é um furo sem desvio de emboquilhamento, com desvio pontual para a esquerda e sem desvio de flexão), com cerca de 28,4 % (88 furos), o 2132 (é um furo sem desvio de emboquilhamento, com desvio pontual para a esquerda e para a direita e sem desvio de flexão), com aproximadamente 20,6 % (64 furos) e o 222 (é um furo sem desvio de emboquilhamento, sem desvio pontual e sem desvio de flexão), com cerca de 12,9 % (40 furos).

É de salientar-se ainda o facto de existirem no total 29 códigos diferentes de classificação dos desvios de perfuração em (X) e em (Y), repetindo-se a maioria deles em ambos os eixos.

No quadro 29, poderá observar-se uma sucinta caracterização percentual dos diferentes tipos de desvios de perfuração ocorridos no estudo das bancadas n.º 0 e n.º 1 da Pedreira de Serdedelo.

O tipo de desvio mais frequente é o de emboquilhamento em (X) ou (Y), ocorrido em 78,4% dos casos, seguido de muito perto pelo desvio pontual em (Y) para a frente (-), com uma representação de aproximadamente 76,1% (Quadro 29).

Quadro 29. Análise percentual dos vários tipos de desvios de perfuração.

		FUROS		
		Total	(Número)	(%)
EMBOQUILHAMENTO	Furos com erro de emboquilhamento em (X) ou (Y)		69	78,4%
	Furos com erro de emboquilhamento em (X) (+/-)	88	50	56,8%
	Furos com erro de emboquilhamento em (X) para a esquerda (+)		14	15,9%
	Furos com erro de emboquilhamento em (X) para a direita (-)		36	40,9%
	Furos com erro de emboquilhamento em (Y) (+/-)		19	21,6%
	Furos com erro de emboquilhamento em (Y) para a retaguarda (+)	88	10	11,4%
	Furos com erro de emboquilhamento em (Y) para a frente (-)		9	10,2%
PONTUAIS	Furos com erros pontuais em (X) para a esquerda (+)	88	42	47,7%
	Furos com erros pontuais em (X) para a direita (-)		52	59,1%
	Furos com erros pontuais em (Y) para a retaguarda (+)	88	38	43,2%
	Furos com erros pontuais em (Y) para a frente (-)		67	76,1%
FLEXÃO	Furos com erro de flexão em (X) ou (Y)		27	30,7%
	Furos com erro de flexão em (X) (+/-)	88	23	26,1%
	Furos com erro de flexão em (X) para a esquerda (+)		18	20,4%
	Furos com erro de flexão em (X) para a direita (-)		5	5,7%
	Furos com erro de flexão em (Y) (+/-)		4	4,5%
	Furos com erro de flexão em (Y) para a retaguarda (+)	88	2	2,3%
	Furos com erro de flexão em (Y) para a frente (-)		2	2,3%

3.7 Análise Fotográfica

O principal factor que influencia a fragmentação e o resultado global do desmonte é que o furo siga o caminho traçado em toda sua extensão. A verticalidade dos furos é importante, devendo ainda ser evitados os desvios de perfuração, na medida do possível. Para fazer com que o resultado prático corresponda aos resultados pré-dimensionados de desmonte, o primeiro requisito é que os furos sejam realmente executados como o assumido no modelo teórico. Isto significa que os furos devem atingir no ponto definido na cota final, na direcção correcta e com a profundidade adequada. A figura 83 ilustra as várias causas do desvio do furo. A precisão na execução e alinhamento do furo pode ser alcançada com a utilização de topografia adequada e majorações na grelha de perfuração, juntamente com o indicador do ângulo utilizado no equipamento de perfuração e a indicação da profundidade do furo. É essencial ter ainda uma boa visão sobre a execução do procedimento, a partir da cabine do operador.

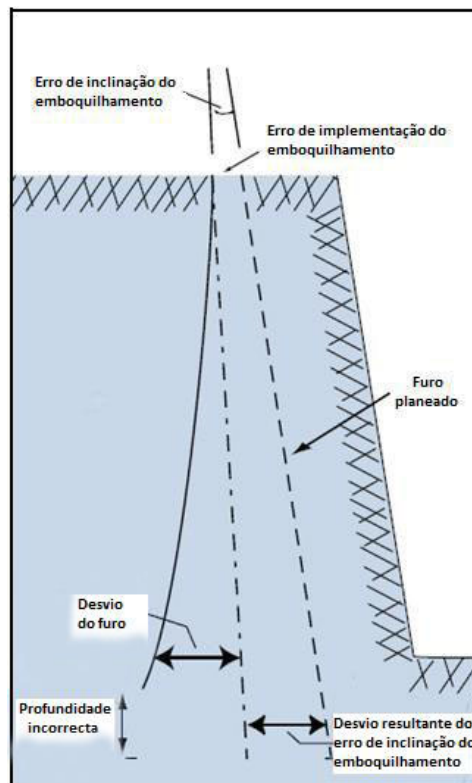


Figura 83. Possíveis causas da ocorrência de desvios na perfuração.

Após a medição dos vários furos e devidamente identificados os desvios associados a cada um deles, pretende-se, nesta fase, analisar em particular a classe de desvios pontuais, ou seja, desvios que normalmente surgem da intercepção do furo com as diferentes descontinuidades que atravessa, tentando perceber o seu comportamento. O método adoptado neste estudo concerne na identificação do desvio pelo ensaio realizado, com posterior localização dos mesmos na bancada, e, através da análise fotográfica da meia cana marcada no maciço, tentar perceber esses fenómenos e inventariar situações concretas relacionadas com as descontinuidades e anisotropias do maciço.

Seguidamente, serão apresentados alguns exemplos da análise fotográfica realizada nas bancadas estudadas na Pedreira de Serdedelo, com o intuito de identificar as “meias-canas” dos furos do maciço rochoso, indicando ainda o furo correspondente e a pega.

Este estudo foi realizado nos furos classificados com desvio pontual no eixo dos XX.

BANCADA N.º 0



Figura 84. Aspecto da bancada n.º 0 antes e após a realização do desmonte (pega 1) – Pedreira de Serdedelo.

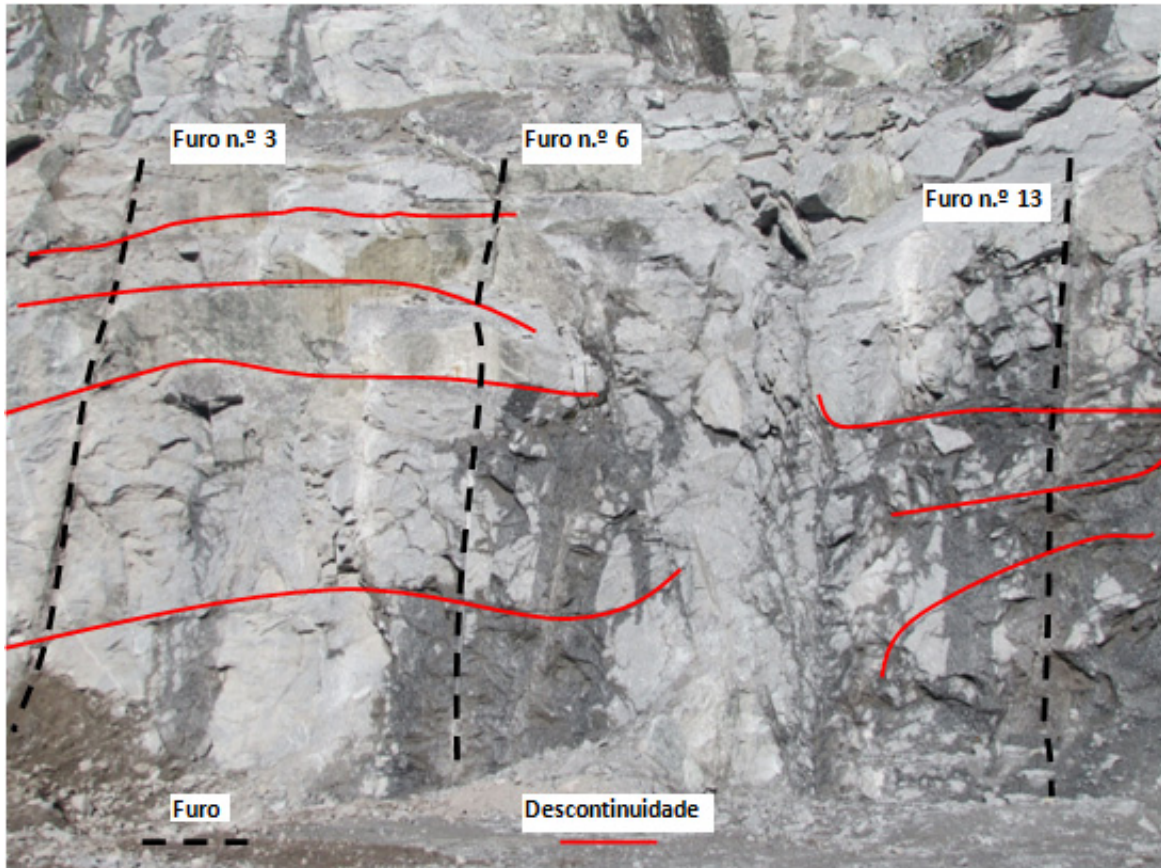


Figura 85. Exemplo da identificação das “meias-canas” da 1.ª pega (20/04/2010) realizada na bancada 0 da Pedreira de Serdedelo.

A figura 85 representa a intersecção dos furos executados na bancada n.º 0 (1.ª pega dimensionada) com as descontinuidades presentes no maciço rochoso. Os três furos destacados foram executados com uma inclinação de 12° , sofrendo pequenas oscilações na sua linearidade à medida que se cruzam com os diferentes planos de descontinuidades do maciço.

BANCADA N.º 1



Figura 86. Aspecto da bancada n.º 1 antes da realização do desmonte (pega 2) – Pedreira de Serdedelo.

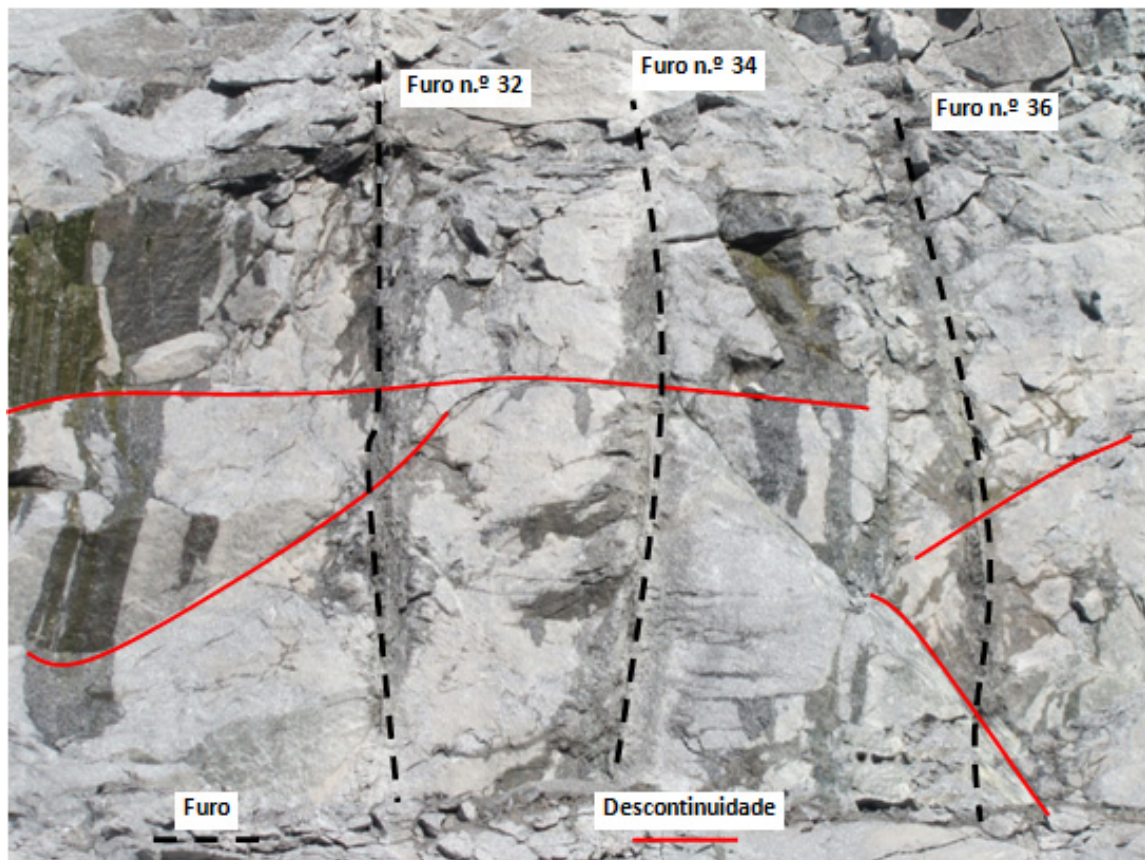


Figura 87. Exemplo da identificação das “meias-canas” da 2.ª pega (30/06/2010) realizada na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo.

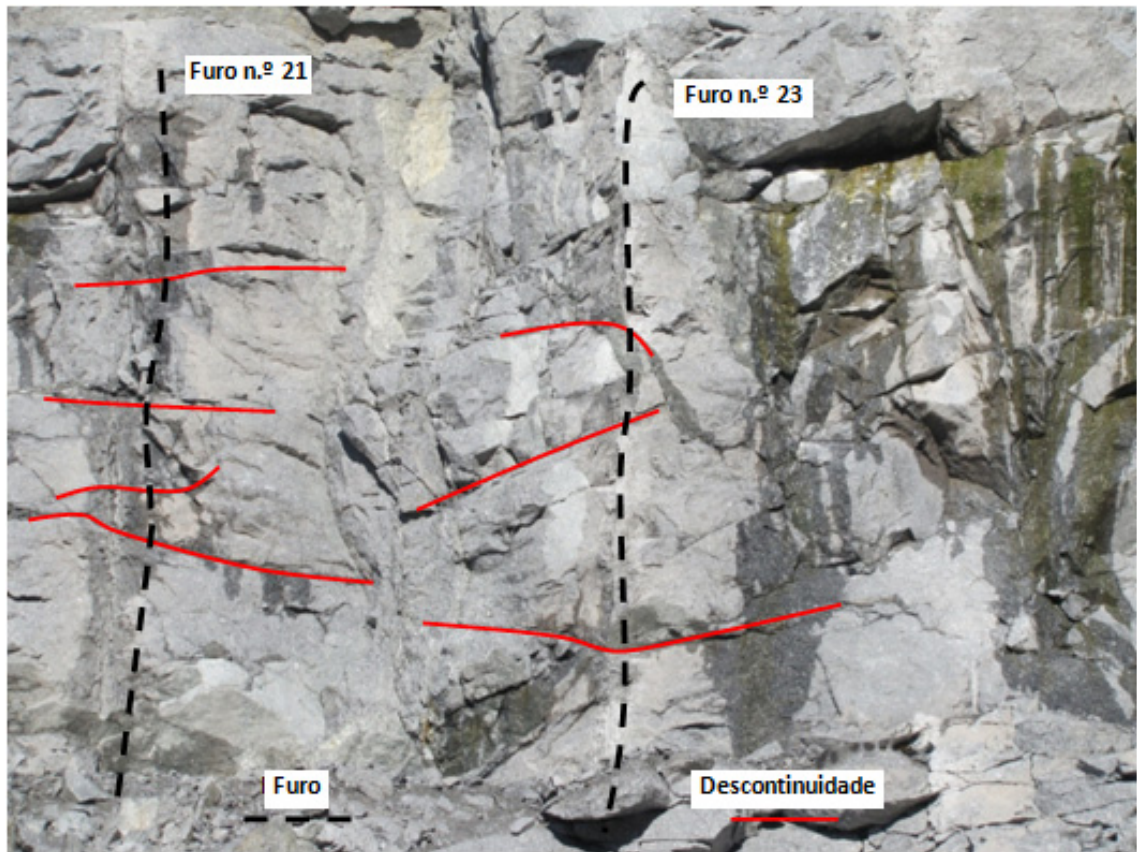


Figura 88. Exemplo da identificação das “meias-canas” da 2.ª pega (30/06/2010) realizada na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo.

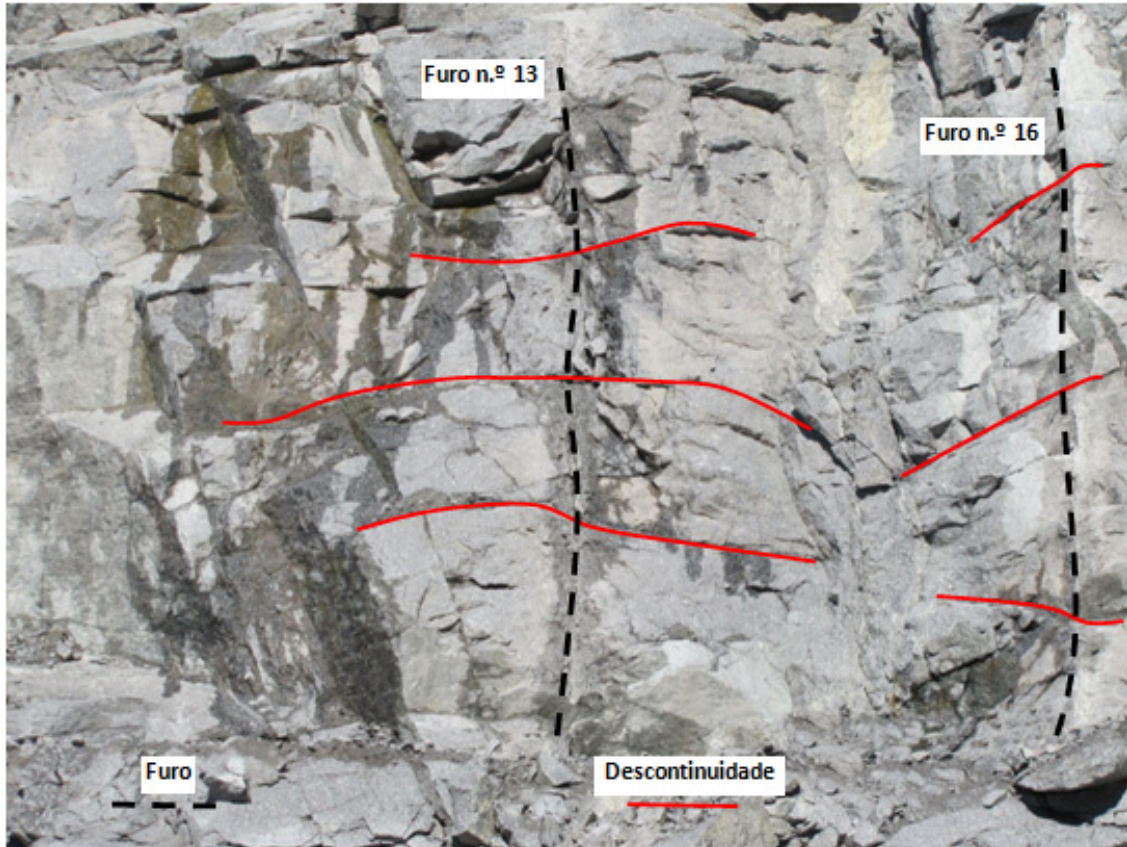


Figura 89. Exemplo da identificação das “meias-canais” da 2.ª pega (30/06/2010) realizada na bancada n.º 1 da Pedreira de Serdedelo.

As figuras 87, 88 e 89 representam a intersecção dos furos executados na 1.ª bancada (2.ª pega dimensionada) com as descontinuidades presentes no maciço rochoso. Os sete furos destacados foram executados com uma inclinação de 12° , sofrendo pequenas oscilações na sua linearidade à medida que se cruzam com os diferentes planos de descontinuidades do maciço.



4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi aplicada a técnica de amostragem linear às superfícies expostas do maciço e foi ainda efectuado o tratamento geológico-geotécnico dos dados do terreno, metodologia de fácil execução que possibilita obter importantes informações sobre a compartimentação do maciço. Para tal, foram utilizadas fichas de campo expeditas (Ramos, 2008; Fonseca, 2008) que permitem um tratamento estatístico de consulta básica após a recolha sistemática dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos de campo, bem como uma leitura fácil, rápida e completa do objecto em estudo.

Este trabalho permitiu retirar as seguintes ilações:

- O reconhecimento e validação das unidades geológicas locais anteriormente definidas por Fonseca et al. (2010): granito porfiróide, de grão grosseiro a médio, manifestando uma foliação de fluxo concretizada acima de tudo pelo alinhamento dos cristais de biotite e, por vezes, de megacristais de plagioclase. A análise dos dados do grau de alteração permite classificar o material-rocha como muito pouco alterado (W_1) e um reduzido número de descontinuidades como ligeiramente alteradas (W_2), nomeadamente em zonas que evidenciam sinais de oxidação e em zonas vizinhas às descontinuidades;

- As principais famílias de descontinuidades, com uma amplitude de 11° , só englobam, tal como seria de esperar, cerca de 37,5% do total das descontinuidades caracterizadas. Tal facto releva a importância do conhecimento profundo de todas as descontinuidades no maciço (diaclases, fracturas, falhas, fissuras,...), tal como é preconizado pela ISRM (1981) ao introduzir o conceito de grau de fracturação (“fracture intercept”) ao longo de uma dada amostragem linear. Apesar das principais famílias de descontinuidades terem um papel importante na definição dos sistemas de fracturação (tectónica) regional do maciço, as restantes famílias ou sistemas de diaclasamento de menor representatividade não deverão ser, no domínio da geotecnia mineira da perfuração e do desmonte de rocha, desprezadas. Assim, algumas descontinuidades poderão individualmente assumir uma função específica ainda mais importante que as famílias mais representativas. Daqui se infere a importância do conhecimento de um parâmetro que caracterize o número de descontinuidades por metro linear de amostragem da superfície do talude das bancadas [descontinuidades/metro] (e.g., o grau de fracturação proposto por Chaminé et al., 2001);

- O espaçamento médio é mais um dado da caracterização do maciço, efectuado com base nas famílias principais de descontinuidades. Este parâmetro só deverá ser consultado como mais uma referência entre muitos outros dados do maciço, pois a sua interpretação pode levar a erros de avaliação, o que se nos afigura provado pelo estudo realizado na pedra, verificando a existência de espaçamentos médios entre descontinuidades relativamente baixos, mas com valores de amplitude bastante elevados;
- O refinamento do zonamento geotécnico (consultar Fonseca et al., 2010), com o objectivo de delinear a qualidade geotécnica do maciço. Para o efeito, validaram-se as principais unidades geotécnicas locais, resultado do cruzamento e síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica;
- O zonamento local foi sistematizado nas seguintes unidades geotécnicas: i) ZG I – granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, alterado a muito alterado (W_{4-5}), com espaçamento afastado (F_{1-2}); e com resistência à compressão uniaxial muito baixa (<20 MPa); ii) ZG II – granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, medianamente alterado (W_3) a pouco alterado (W_2), com espaçamento afastado (F_2); e com resistência à compressão uniaxial média a elevada (50 a 80 MPa; S_3 a S_2); iii) ZG III – granito biotítico de grão grosseiro a médio, com megacristais de feldspato, são a muito pouco alterado (W_1), com espaçamento afastado (F_2); e com resistência à compressão uniaxial elevada (120 a 160 MPa; S_2); e com índice de resistência à carga pontual, $I_{s(50)} = 11$ a 12MPa;
- O presente trabalho perspectiva, assim, contribuir para a qualidade com que a operação de perfuração é executada. As características do maciço rochoso são as que se apresentam com maior dificuldade de equacionar a temática devido à sua anisotropia natural. Todavia, a sua preponderância é inequívoca. Por isso, a caracterização e a consideração das características geológicas e geotécnicas do maciço, quer em termos geológico-estruturais quer em termos do zonamento geotécnico, recorre frequentemente a uma cartografia geológico-geotécnico do local da pedra e à aplicação da técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço, com o fim de se definir o grau de compartimentação deste, bem como as restantes características geológico-geotécnicas e geomecânicas (as comumente recomendadas pela ISRM, 1981, 2007). Logo, um bom conhecimento da estrutura geológica e da avaliação dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso é vital para

apoiar a fase de perfuração. Mais do que o avanço tecnológico das ferramentas de execução, o conhecimento adquirido e as metodologias desenvolvidas devem representar um instrumento com uma melhor relação resultado/custo (Ramos, 2008);

- Constata-se que as bancadas monitorizadas apresentam um estado de limpeza ainda com alguma margem de evolução neste âmbito de avaliação, dado que cerca de dois terços dos furos encontram-se com algum a muito material desagregado;
- Verifica-se ainda que a limpeza da bancada tem normalmente mais influência nos desvios de emboquilhamento nos (X) do que nos (Y), uma vez que os últimos (Y) não demonstram grandes diferenças de amplitude de desvio, de acordo com a variação do parâmetro de limpeza da bancada. Os desvios de emboquilhamento (X) têm um maior erro associado quando a bancada apresenta muito material desagregado.

A temática desenvolvida neste trabalho poderá merecer novos estudos futuros, quiçá mais aprofundados, perscrutando idênticos objectivos. Em face do exposto, tendo em consideração os objectivos traçados para esta dissertação, será de sugerir que trabalhos a realizar futuramente incidam sobre os seguintes parâmetros:

- Reconhecimentos geológicos de superfície, recorrendo nomeadamente a estudos de cartografia geológico-estrutural, a escalas convenientes da área dos maciços circunvizinhos. Continuação do refinamento da cartografia geotécnica e estudo da compartimentação do maciço rochoso;
- Continuação dos estudos de pormenor de fracturação e da geomecânica do maciço em bancadas criteriosamente seleccionadas para complementar e pormenorizar os estudos de desvios de perfuração em maciços rochosos fracturados;
- Desenvolvimento de uma análise estatística dos dados mais robusta;
- Abordagem de outros maciços rochosos de forma a obter diferentes cenários geológicos, geotécnicos e geomecânicos para aferição da sua influência na génese dos desvios de perfuração;

- Aferir uma correcção na direcção e inclinação do furo que contrarie e corrija a tendência do desvio de perfuração;

- Aferir a correlação efectiva do comportamento do furo em função do ângulo de intersecção com as descontinuidades;

- A aplicação do índice geomecânico GSI, com o objectivo de avaliar a qualidade e competência geomecânica do maciço rochoso da Pedreira de Serdedelo.

CAPÍTULO 5



5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires-Barros, L. 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 384 pp.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 2004. Rock mechanics for underground mining, 3rd Edition, George Allen & Unwin, London. 527 pp.
- Cargill J.S. & Shakoor A. 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27: 495–503.
- Cargill JS & Shakoor A., 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 53: pp. 97-103.
- 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.
- Dias, G.; Noronha, F. & Ferreira, N. [eds.], 2000. Variscan plutonism in the Central-Iberian Zone, Northern Portugal. Eurogranites'2000 Field Meeting Guide Book, UM/FCUP/IGM.
- Dinis da Gama, C. 1971. Optimização do arranque de rochas com explosivos. Memória MI-4, Departamento de Engenharia de Minas da Universidade de Luanda. (Tese de Doutoramento)
- 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.
- Dinis da Gama, C. 1996. The concept of rock mass fragmentability. In: Franklin e Katsabanis (ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 209-214.
- Ferreira, N.; Iglésias, M.; Noronha, F.; Pereira, E.; Ribeiro, A. & Ribeiro, M. L., 1987. Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea; A. Carnicero; J. C. Gonzalo; M. López Plaza & M. D. Rodríguez Alonso (eds). *Geología de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico (Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola)*. Editorial Rueda. Madrid. pp. 37-51.
- 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, 2008. Interacção e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 225 pp. (Tese de Mestrado).
- Fonseca L., Ramos L., Galiza A.C. & Chaminé H.I., 2010. Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. In: Gomes Correia A. et al. (eds), *Actas do 12 Congresso Nacional de Geotecnia (Geotecnia e Desenvolvimento Sustentável)*, SPG/UM, Guimarães. pp. 279-288 (CD-Rom).

- Franklin, J.A. e Dusseault, M.B. 1991. Rock engineering applications. McGraw-Hill Publishing Company, New York. 431 pp.
- González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. [coords.], 2002 Ingeniería geológica Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- Galiza, A.C., 2001. A Qualidade nas operações de desmonte de rocha. Provas para o provimento de um lugar de Professor Adjunto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (inédito).
- Galiza A.C., Ramos L. e Chaminé H.I. 2008. Controlo da qualidade geotécnica do desmonte do maciço rochoso através de uma perfuração alinhada. In: Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Coimbra. Volume 1, pp. 243-250.
- 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): pp. 207-242.
- Hoek, E. 2007. Practical rock engineering. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.
- Holmberg, R. 2003. Explosives and blasting technique. Taylor & Francis. 632 pp.
- Hudson, J. A & Priest, S. D., 1983. Discontinuity frequency in rock masses Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 20: pp. 73-89.
- 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): pp. 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: pp. 85-110.
- I.S.R.M. - International Society for Rock Mechanics, 1987, Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr., 15: pp. 89-97.
- 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. pp.628.
- Jimeno, C.L. 1995. Drilling and blasting of rocks. Taylor & Francis, 400 pp.
- Langefors U. & Kihlstrom B. 1978. The modern technique of rock blasting. 3rd revised edition. John Wiley and Sons Ltd, New York, 438 pp.
- Martins, R., Moreira, P., Santos Pereira, 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 10º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Univ. Nova de Lisboa. Volume 1, pp. 255-264.
- Moodley, L. e Cunningham, C. 1996. Measuring the effect of blasting fragmentation on hard rock quarrying operations. In: Mohanty (ed.), Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp. 353-359.
- Peacock, D. C. P., Harris, S. D. & Mauldon, M., 2003. Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies J. Struct. Geol., 25: pp. 109-119.
- Persson, P.-A.; Holmberg, R. & Lee, J. 1993. Rock blasting and explosives engineering. CRC Press. 560 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: pp. 183-197.
- Rocha, M., 1981. *Mecânica das Rochas*. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.
- Ramos L., 2008. *Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte*. Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente|ISEP, tese de mestrado.
- Ribeiro A., Munhá J., Dias R., Mateus A., Pereira E., Ribeiro L., Fonseca P.E., Araújo A., Oliveira J.T., Romão J., Chaminé H.I., Coke C. & Pedro J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009, 24 pp. (doi: 10.1029/2006TC002058)
- Sandvik/Tamrock, 1999. *Rock Excavation Handbook*. Sandvik/Tamrock.
- Schmidt, E. 1951. A non-destructive concrete tester. *Concrete*, 59 (8): 34-35.
- Singh S.P., Ladoucer M. & Rouhi F., 1998. Sources of drilling errors and their control. *Mineral Resources Engineering Journal*, 7 (2): 79-92.
- Teixeira C., Medeiros A. C. & Pinto Coelho A. 1972. *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 43 pp.

ANEXOS



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Ficha de levantamento de campo (Geológico-Geomecânico)

Anexo II: Ficha de levantamento de campo (Geomecânico - Martelo de Schmidt)





