



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Desmorte de rocha: Influência da orientação das frentes de trabalho no desempenho da fragmentação

Fábio Hugo Coelho Machado





Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Desmonte de rocha: Influência da orientação das frentes de trabalho no desempenho da fragmentação

Fábio Hugo Coelho Machado

Nº 1080583

*Projeto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Prof. Doutor José Augusto Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e coorientação do Engenheiro Luís Ramos, Assistente Convidado do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Carlos Correia Ramos

Director de Produção, Elevo Agregados (Grupo Elevo SA), Porto

Assistente convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Filipe Santos Fonseca

Director de Produção, Elevo Agregados (Grupo Elevo SA), Porto

*A tese de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **Fábio Hugo Coelho Machado**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 14 de Novembro de 2016 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezasseis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta dissertação aos meus queridos Pais pelo seu apoio, dedicação e esforço prestados em todos os momentos da minha vida, e em especial na minha formação acadêmica em Engenharia Geotécnica.

Agradecimentos

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

- Prof. Doutor José Fernandes, orientador científico deste projeto, a quem expresse o meu sincero reconhecimento pela forma dedicada e prestável como sempre me orientou cientificamente ao longo deste trabalho;
- Ao meu coorientador, o Engenheiro Luís Ramos, pelo precioso auxílio e orientação e pela sua enorme disponibilidade para me orientar, quer no terreno quer no gabinete, ao longo deste projeto;
- Ao Prof. Doutor Helder I. Chaminé pela disponibilidade e ajuda no esclarecimento de dúvidas;
- A todos os Docentes do ISEP que contribuíram para a minha formação em Engenharia Geotécnica;
- Ao Eng.º Vítor Oliveira (Elevo Group), grato pela forma como me acolheu na pedreira de Fornelo e no apoio nas várias fases do trabalho e pela troca de impressões sobre a temática e partilha da sua experiência;
- À empresa Elevo Group, na pessoa da Direção Geral de Agregados, Sr. Domingos Peixoto, pela oportunidade que me deu na realização do trabalho de campo na pedreira de Fornelo;
- Aos meus colegas de curso, Eng.º Tiago Campos e Eng.º Ricardo Santos, pela disponibilidade e apoio nos levantamentos geológico-geotécnicos de campo;
- Ao Eng.º Pedro Batista (Orica), pelo acompanhamento na realização dos ensaios Boretrak e Laser e disponibilidade de meios técnicos para a compilação dos ensaios de campo;
- Ao Eng.º Carlos Correia (Mota-Engil), pela disponibilidade e fornecimento do software WipFrag para a realização da análise granulométrica do presente estudo;
- À minha namorada, pelo apoio incondicional que me deu nos momentos mais difíceis do trabalho, momentos em que pensei desistir;
- Por fim aos meus pais, pelo seu apoio, dedicação e esforço prestados em todos os momentos da minha vida, e em especial na minha formação académica em Engenharia Geotécnica.

Palavras-chave

Maciço rochoso, Desmonte, Orientação, Granulometria, Pedreira Fornelo

Resumo

A articulação das características estruturais do maciço rochoso com os procedimentos levados a cabo na etapa de desmonte, desempenham papel fundamental no resultado final pretendido (granulometria do material), condicionado diretamente as fases posteriores, nomeadamente as fases de carga-transporte e processamento industrial. Para esse efeito, e como irá ser abordado no presente estudo, foi desenvolvida na pedreira de Fornelo (Vila do Conde, Portugal), a análise da interação maciço rochoso-desmonte, sendo o foco principal a articulação da orientação da frente de desmonte a adotar relativamente aos parâmetros geológico-geotécnicos do maciço aflorante. Assim sendo, inicialmente realizou-se o estudo de uma pega de desmonte, do qual foram recolhidos e analisados (em pormenor) todos os parâmetros que “condicionam” as etapas supracitadas, controlo este executado em particular, visto a sua orientação ser distinta relativamente ao histórico existente. Posteriormente, e após tratamento dos resultados obtidos, confrontou-se estes com os valores previamente existentes, tendo esta análise o intuito de discernir a dependência e as consequências nos parâmetros identificados anteriormente (orientação da bancada de desmonte e características do maciço), e qual a influência que essa interação teria sobre o resultado final (granulometria) e as etapas posteriores. Como conclusão, propôs-se a realização da análise económica do processo em estudo, identificando detalhes importantes, nos quais futuramente dever-se-á intervir para tornar o presente processo mais rentável, tornando-o economicamente mais viável.

Keywords

Rock mass, Blasting, Orientation, Granulometry, Fornelo Quarry

Abstract

The articulation of the rock massif's structural characteristics with the procedures that took place in the blasting operations play a fundamental part in the desired outcome (grain size) directly conditioning the later stages, namely the loading, transport and industrial processing. To this end and as it will be addressed in this study it was developed in the quarry of Fornelo (Vila do Conde, Portugal), the analysis of the rock mass and blasting operation's interaction with the main focus being the articulation of the front line from the blasting operation's orientation relative to the geological-geotechnical parameters of the outcropping rock mass. Therefore, initially it was conducted the study of the blasting graph in which it was collected and analyzed (in detail) all parameters that condition the aforementioned stages, control that was executed in particular, since its orientation is distinct relative to the existent history. Posteriorly and after data processing the results were confronted with previously existing data and this analysis has the intention to discern the dependence and the consequences in the previously identified parameters (orientation of the blasting bench and characteristics of the rock mass) and what is the influence that this interaction would have on the final outcome (granulometry) and the subsequent stages. As a conclusion it was proposed the elaboration of an economic analysis of the process in study identifying important details in which in the future an intervention should be made to make the present process more profitable making it economically more viable.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	27
1. Introdução	29
1.1. Enquadramento do Tema	29
1.2. Objetivos	30
CAPÍTULO 2 – MACIÇO ROCHOSO-DESMONTE: RENDIMENTO DA GRANULOMETRIA RESULTANTE NA PRODUTIVIDADE DAS OPERAÇÕES A JUSANTE	33
2. Maciço Rochoso-Desmonte: Rendimento da granulometria resultante na produtividade das operações a jusante.....	35
2.1. Maciços Rochosos.....	35
2.1.1. Caracterização e reconhecimento geológico	35
2.1.2. Descontinuidades	35
2.1.3. Parâmetros de maciços rochosos	36
2.1.4. Parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades	38
2.1.5. Técnica da amostragem linear.....	45
2.2. Desmonte de Maciços Rochosos	47
2.2.1. Generalidades.....	47
2.2.2. Perfuração	49
2.2.2.1. Propriedades da rocha que afetam a perfuração	50
2.2.2.2. Presença de descontinuidades	50
2.2.2.3. Desvios.....	51
2.2.3. Técnicas utilizadas	55
2.2.3.1. Medição de desvios: Ensaio Boretrak	55
2.2.3.2. Medição da regularidade de bancada: Ensaio Laser	56
2.2.4. Equipamento de perfuração.....	58
2.2.4.1. Método de perfuração	60
2.2.4.2. Acessórios.....	60
2.2.5. Geometria diagrama de fogo.....	62
2.2.6. Acessórios de tiro	64
2.2.7. Outros parâmetros	64
2.2.7.1. Operador	64
2.2.7.2. Parâmetros de regulação – equipamento.....	65
2.2.7.3. Emboquilhamento	65
2.3. Carga e Transporte	66
2.3.1. Unidades Escavo-Carregadoras	66
2.3.1.1. Retroescavadora/"Giratória"	67
2.3.2. Unidade de Transporte.....	68
2.3.2.1. Dumpers	68

2.4.	Fragmentação e Classificação.....	70
2.4.1.	Fragmentação.....	70
2.4.2.	Fatores que influenciam a fragmentação.....	71
2.4.2.1.	Tempo de residência	71
2.4.2.2.	Relação de redução	72
2.4.3.	Fragmentadores primários	72
2.4.4.	Software utilizado – Análise fragmentação.....	74
2.4.4.1.	WipFrag 2.4.....	74
CAPÍTULO 3 – CASO DE ESTUDO		75
3.	Caso de Estudo	77
3.1.	Pedreira Fornelo	78
3.1.1.	Localização e Acessos	78
3.1.2.	Caracterização geológica	79
3.1.2.1.	Geologia Regional.....	79
3.1.2.2.	Geologia Local.....	79
3.2.	Materiais e Métodos utilizados	80
3.3.	Maciço Rochoso.....	81
3.3.1.	Maciço aflorante.....	82
3.3.2.	Caracterização geológico-geotécnica.....	83
3.4.	Desmonte	91
3.4.1.	Cálculo do diagrama de desmonte – definição dos parâmetros geométricos da pega de fogo	92
3.4.2.	Perfuração	93
3.4.2.1.	Desvios de perfuração	93
3.4.2.2.	Análise dos desvios de perfuração	95
3.4.3.	Frente de Talude.....	97
3.4.4.	Diagrama de fogo prático	98
3.4.5.	Esquema de Fogo.....	99
3.4.6.	Superfície de bancada final	99
3.5.	Carga e Transporte	100
3.6.	Britagem	100
3.7.	Plano de tarefas.....	100
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS		103
4.	Resultados	105
4.1.	Caso de estudo: resultados	106
4.2.	WipFrag 2.4.....	106
4.2.1.	Localização.....	107
4.2.2.	Modelo anterior	107

4.2.2.1.	Zona I	108
4.2.2.2.	Zona II	109
4.2.2.3.	Zona III	110
4.2.2.4.	Zona IV	111
4.2.3.	Caso de estudo – Caracterização granulométrica	112
4.2.4.	Reflexão	114
4.3.	Desvios de perfuração	115
4.4.	Fator de carga	116
4.5.	Taqueio	116
4.6.	Análise financeira	117
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....		121
5.	Conclusões.....	123
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		127
6.	Referências Bibliográficas.....	129

Índice de Figuras

Figura 1-Superfícies de compartimentação e representação das famílias mediante o bloco unitário presente (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).	37
Figura 2-Representação esquemática dos parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).....	39
Figura 3-Representação atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).....	40
Figura 4-Medição do espaçamento entre descontinuidades a partir de uma face exposta do maciço (adaptado de ISRM, 1978, 1981; González de Vallejo et al., 2002).	41
Figura 5-Diagramas que ilustram as definições de abertura das descontinuidades (ISRM, 1978): a) Descontinuidades fechadas; b) Descontinuidades abertas; c) Descontinuidades preenchidas.	42
Figura 6-Classes dos perfis de rugosidade (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).	44
Figura 7-Eschema do dispositivo de levantamento em campo de descontinuidades pela técnica de amostragem linear: D - Distância à origem; L – Comprimento da descontinuidade exposto (adaptado de Brady & Brown, 2004).	45
Figura 8-Ficha de levantamento geológico-geomecânico com aplicação da técnica de amostragem linear (adaptado de Ramos, 2008).	46
Figura 9-Exemplo da aplicação ScanGeoData BGD para maciços rochosos fraturados (adaptado de Fonseca et al. 2010, Galiza et al. 2011 a, b, c).....	47
Figura 10-Ábaco onde apresenta-se expresso a escavabilidade de um dado maciço (PLT – Point Load Test; UCS – Uniaxial Compressive Strength; RQD – Rock Quality Index) (adaptado de Franklin et al. 1971).....	48
Figura 11-Imagem exemplificativa das diversas etapas, desde o desmonte de rocha (perfuração) até ao processo de classificação e fragmentação para valorização do material rocha da indústria extrativa e transformadora (adaptado de Rock Excavation Handbook, Sandvik/Tamrock, 1999).	49
Figura 12-Benefícios resultantes do alinhamento da perfuração e sua correta execução (adaptado de Galiza et al., 2011 a, b, c).....	50
Figura 13-Representação desvio de perfuração (adaptado de Ramos, 2008).	51
Figura 14-Direção e inclinação (imagem ilustrativa) (adaptado de Ramos, 2008).....	54
Figura 15-Figura exemplificativa dos diversos componentes do Boretrak, a) Dispositivo de controlo; b) Sonda "Sensor Probe"; c) Conjunto de varas e respetivo suporte (adaptado de Ramos, 2008).	55
Figura 16-Modo de medição e operação (adaptado de Ramos, 2008).....	56
Figura 17-Equipamento emissor e recetor de informação (Laser Profile).	56
Figura 18-Equipamento de perfuração: Tamrock Ranger 700.	58
Figura 19-Encabadouro T45 (adaptado de Ramos, 2008).	60
Figura 20-Bit de perfuração marca Robit, Normal e $\phi=76\text{mm}$. (http://www.directindustry.com/prod/robit-rocktools/button-dth-drill-bits-drifting-tunneling-57440-404949.html#product-item_948093).....	61
Figura 21-Geometria do desmonte em bancada (adaptado de www.lnec.pt).	63
Figura 22-Relação altura de bancada/diâmetro de furo a executar (adaptado Galiza et al., 2007).	63
Figura 23-Qualidade do desmonte e utilização da energia libertada em furos verticais e inclinados (adaptado Galiza et al., Desmonte de Maciços Rochoso I, 2007).	64
Figura 24-Emboquilhamento em mau estado.....	65
Figura 25-Escavadora de rastos Komatsu PC 450LC-6.....	67
Figura 26-Ficha registo do equipamento Giratória.	68
Figura 27-Dumper Euclid R32.	69
Figura 28-Ficha de registo: unidade de transporte Dumper.	70

Figura 29-Relação de redução expectável por etapa de fragmentação (Fernandes, 2006).	71
Figura 30-Fragmentador primário SVEDALA JM 1211 HD.	73
Figura 31-Ficha registo produção Fragmentador Primário.	74
Figura 32-Extracto da Carta Militar nº 97 com a localização da pedreira de Vila Verde (Fonte: IGeoE).	78
Figura 33-Vias de comunicação e acessos à pedreira "Vila Verde" (informação recolhida em www.viamichelin.com).	78
Figura 34-Enquadramento geotectónico regional dos granitos Variscos da zona Centro-Ibérica (ZCI), bem como a visualização das principais faixas de cisalhamento e sistemas de falhas regionais do NW de Portugal (adaptado de Dias et al., 2000).	79
Figura 35-Enquadramento geológico regional da área com a localização da pedreira (excerto carta Geológica de Portugal, Folha 9-A IGEoE).	80
Figura 36-Frente livre do maciço rochoso.	82
Figura 37-Frente livre do maciço rochoso.	82
Figura 38 - Blocometria presente.	83
Figura 39- Maciço rochoso cinza azulado da pedreira de Fornelo.	84
Figura 40-Diagrama de rosetas geral da Pedreira de Fornelo (Vila do Conde), com representatividade de 112 descontinuidades projetadas em intervalos de 20° de amplitude (retirado do software dips).	85
Figura 41-Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao levantamento de 112 descontinuidades presente no painel em estudo da pedreira de Fornelo/Vila do Conde (retirado do software dips).	86
Figura 42-Parâmetros geométricos do diagrama de desmonte (adaptado de Ramos, 2008).	92
Figura 43-Esquema teórico da malha de perfuração.	92
Figura 44-Exemplos de perfis de alguns furos analisados através do ensaio Laser.	97
Figura 45-Planta da frente de desmonte e localização dos furos em análise (através ensaio Laser). ...	98
Figura 46-Diagrama de fogo prático - localização em planta dos furos.	98
Figura 47-Distribuição de explosivo no diagrama de fogo.	99
Figura 48- Esquema de ligações (ficheiro disponibilizado pela empresa Descavanor).	99
Figura 49-Recriação superfície final após o desmonte.	100
Figura 50-Vista panorâmica da pedreira de Fornelo (retirado de Google Earth, 28 de Março 2014).	107
Figura 51-Localização das pegas de fogo realizadas (retirado de Google Earth, 28 de Março 2014)..	107
Figura 52-Granulometria observada na Zona I (Fornelo – Vila do Conde).	108
Figura 53-Granulometria observada na Zona II (Fornelo – Vila do Conde).	110
Figura 54-Granulometria observada na Zona III (Fornelo – Vila do Conde).	111
Figura 55-Granulometria observada na Zona IV (Fornelo – Vila do Conde).	112
Figura 56-Granulometria observada no Caso de estudo.	113

Índice de Gráficos

Gráfico 1-Grau de alteração das descontinuidades em geral, por família e restantes.	84
Gráfico 2-Espaçamento das principais famílias e aspeto geral.	87
Gráfico 3-Análise da abertura média das descontinuidades.....	87
Gráfico 4-Tipo de preenchimento presente nas descontinuidades - análise dos tipos de enchimento das descontinuidades na generalidade, e em particular de cada família.	88
Gráfico 5-Tipo de rugosidade do maciço rochoso de Fornelo.	89
Gráfico 6-Análise da continuidade das descontinuidades no geral e em particular das principais famílias.	89
Gráfico 7-Tipo de terminação das descontinuidades.....	90
Gráfico 8-Tipo de curvatura presente na generalidade do maciço e nas principais famílias.....	91
Gráfico 9-Presença de água no maciço rochoso da pedreira de Fornelo.....	91
Gráfico 10-Desvios de perfuração segundo ângulo de direção e ângulo de inclinação dos furos (adaptado do software Geo Hole Data).	94
Gráfico 11-Distribuição em planta da distribuição dos furos executados (com as diversas profundidades medidas pelo ensaio Boretrak, adaptado de Geo Hole Data, e análise do posicionamento final dos furos).....	95
Gráfico 12-Tipo de emboquilhamento dos furos executados.....	96
Gráfico 13-Tipo de superfície de bancada.....	96
Gráfico 14-Characterização granulométrica – Zona I (adaptado do software WipFrag 2.4).	109
Gráfico 15-Characterização granulométrica – Zona II (adaptado do software WipFrag 2.4).	110
Gráfico 16-Characterização granulométrica – Zona III (adaptado do software WipFrag 2.4).	111
Gráfico 17-Characterização granulométrica zona IV (adaptado do software WipFrag 2.4).	112
Gráfico 18-Characterização granulométrica - caso de estudo (adaptado do software WipFrag 2.4)....	113
Gráfico 19-Distribuições granulométricas dos casos analisados.....	114

Índice de Quadros

Quadro 1-Tipo de descontinuidades e sistematização em geologia estrutural (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al. 2002).	36
Quadro 2-Classificação de maciços rochosos relativamente ao número de famílias presente num dado maciço rochoso (ISRM, 1981).	36
Quadro 3-Graus de alteração propostos pela ISRM (1981) e GSE (1995).	38
Quadro 4-Classificação do espaçamento entre descontinuidades proposta pela ISRM (1978,1981). ..	41
Quadro 5-Descrição da Continuidade proposta pela ISRM (1978,1981).	42
Quadro 6-Abertura das descontinuidades proposta pela ISRM (1978,1981).	43
Quadro 7-Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).	44
Quadro 8-Erro de Posicionamento (adaptado de Ramos, 2008).	53
Quadro 9-Erro de emboquilhamento (adaptado de Ramos, 2008).	53
Quadro 10-Erro de direção e inclinação (adaptado de Ramos, 2008)	54
Quadro 11-Erro de comprimento e cota (adaptado de Ramos, 2008).	54
Quadro 12-Ferramentas utilizadas na perfuração (adaptado de Dias, 2013).	59
Quadro 13-Avaliação do equipamento de perfuração (adaptado de Ramos, 2008).	59
Quadro 14-Avaliação dos acessórios de perfuração (adaptado de Ramos, 2008).	62
Quadro 15-Qualidade do emboquilhamento (adaptado de Dias, 2013).	66
Quadro 16-Relação de redução de diferentes equipamentos de fragmentação.	72
Quadro 17-Emboquilhamento dos furos.	95
Quadro 18-Regularidade da superfície de bancada.	96
Quadro 19-Quadro Resumo	115
Quadro 20-Qualidade dos furos de perfuração.	115
Quadro 21-Custos do método atual aplicado, por atividade.	118

Lista de abreviaturas

d – Diâmetro do furo;

D - Distância à origem;

E – Espaçamento entre furos;

H – Comprimento do furo;

h0 – Tamponamento;

hb – Altura carga de fundo;

hc – Altura carga de coluna;

I – Inclinação do furo;

K – Altura de bancada;

L - Comprimento da descontinuidade;

LIM – Sistema de sonda de perfuração;

PLT – Point Load Test;

Qb – Quantidade de explosivo de carga de fundo;

Qc – Quantidade de explosivo de carga de coluna;

RQD – Rock Quality Designation;

U – Subfuração;

UCS – Uniaxial Compressive Strength;

V – Distância à frente.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Tema

O presente projeto encontra-se inserido na unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projecto” do 2º ano de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), elaborado em contexto empresarial (empresa Elevation – Engenharia, S.A.), tendo como caso de estudo o maciço rochoso da pedreira de Fornelo, Vila do Conde, com principal finalidade e estreita ligação à atividade de desmonte do maciço aflorante, influência e implicações nas atividades subsequentes, e a sua rentabilidade e rendimento.

Em engenharia de maciços rochosos, e no domínio da atividade de exploração de recursos naturais, mais concretamente a atividade de produção de agregado britado (que compõe o atual caso de estudo), a correta conjugação entre o local de exploração, as suas especificidades no âmbito da caracterização e estudo do material rocha aflorante, padronização das práticas nos processos de desmonte de maciços fraturados, apresenta primordial importância na rentabilidade e rendimento dos processos a jusante. De referir o processo de carga e transporte de material, bem como de fragmentação e classificação do mesmo.

Para tal e como processo lógico-construtivo, é necessário inicialmente proceder-se ao estudo e levantamento em pormenor e de grande complexidade das propriedades geológico-geotécnicas, sendo necessário um trabalho de campo detalhado e uma análise cuidada dos dados obtidos em campo sobre essas propriedades (Mazzoccola et al. 1997, Keaton 2013, Chaminé et al., 2014), em direta concordância com os parâmetros e processos levados a cabo pela atividade em destaque e desagregação do maciço rochoso envolvente, denominado por desmonte de maciços fraturados, tendo paralelamente interesse informação de base topográfica, litológica e geológico-estrutural, bem como das condições hidrogeológicas e geomorfológicas da área de estudo (e.g. Hudson & Cosgrove 1997, Vidal-Romani & Twidale 1999, Griffiths & Stokes 2008, González de Vallejo & Ferrer 2011). Em seguida, e após obtenção dos dados de carácter geológico-geotécnico envolvente, surge como subsidiariedade a elaboração e planificação das diversas atividades associadas ao desmonte de maciços rochoso, ações essas que estão diretamente relacionadas com as características observadas no local de implantação da atividade, desde o processo de preparação da bancada de desmonte, elaboração do diagrama de fogo, marcação da pega e perfuração, entre outros, até chegar-se à etapa final de desmonte (com auxílio a explosivos) do maciço rochoso para posterior valorização industrial.

A fragmentação da rocha com explosivos depende de diversos fatores: características geológicas do maciço rochoso, orientação da frente de desmonte, desenho do diagrama de fogo, qualidade da perfuração, tipo de explosivo, técnica de carregamento (quantidade de explosivo) e temporização das cargas. Com tão elevado número de variáveis, a operação de desmonte de rocha com explosivos é uma tarefa que exige uma permanente observação dos resultados e correções para

aperfeiçoamento e otimização. No caso particular da orientação da frente de bancada, este parâmetro interage com diversos fatores na envolvente descrita anteriormente, quer a nível estrutural como posteriormente nas diversas etapas englobadas no processo de desmonte de maciços fraturados. Este parâmetro singular apresenta elevada dependência relativamente a diversos pormenores, nomeadamente os desvios de perfuração, as vibrações, a temporização, etc., e por último a granulometria final resultante, os quais podem deste modo prejudicar os processos a jusante.

No caso da fragmentação resultante ser diminuta, esta proporcionará uma movimentação do material resultante do desmonte em curto espaço e conduzirá à “criação” de grandes blocos; promoverá uma deficiente operação de carga (a operação de carga é tanto mais difícil quanto pior for a movimentação da rocha e maiores forem os blocos produzidos pelo rebentamento), acréscimo de desmonte secundário (“taqueio”), bem como haverá mais probabilidade de encravamentos com paragem da produção no britador primário, devido à dimensão máxima de bloco admissível.

No extremo, excesso de fragmentação aumentará a percentagem de partículas finas, produzindo maior quantidade de resíduos de britagem e diminuindo o valor da matéria-prima.

1.2. Objetivos

O presente projeto tem como finalidade relatar e experiência obtida com o processo de otimização do desmonte em bancada em resultado da utilização de técnicas e instrumentos auxiliares à produção. A elevada quantidade de variáveis envolvidas no desmonte de rocha com explosivos e a dificuldade de uma análise global, levou-nos a selecionar apenas algumas das variáveis com as quais fosse possível retirar conclusões e desta forma extrapolar para outras situações as boas práticas, resultando em mais-valias técnico-económicas.

O objetivo deste trabalho é otimizar o desmonte em bancada, neste caso da Pedreira de Fornelo, ponderando todos os fatores que existem nas diferentes fases deste processo, mas colocando especial enfoque na articulação da orientação da frente de bancada com o contexto geológico do maciço em causa. A pesquisa iniciou-se com recolha de dados operativos decorrente de uma pega de fogo elaborada em Novembro de 2013 (14-11-2013).

Assim sendo, o objetivo principal do presente estudo foi analisar e esclarecer qual é a influência a nível técnico (e posteriormente económico) da interação da orientação da frente de bancada de desmonte com a componente geológico-geotécnica do maciço em estudo, tentando identificar alguns fenómenos que acontecem em direta dependência dos supracitados, identificar as fragilidade inerentes ao mesmo, identificar metodologias utilizadas neste processo, confrontar os resultados obtidos com o histórico existente, e posteriormente com base nessa informação, elaborar a análise económica do processo em estudo, com o intuito de aperfeiçoamento de todo o processo produtivo (quer nesta etapa, quer a jusante).

Em resumo, podemos enquadrar os objetivos deste trabalho nos seguintes temas:

- Análise da interação entre a orientação das frentes de trabalho e os parâmetros geológicos do maciço aflorante;
- Confrontação com os casos existentes (histórico), e avaliação dos diferentes resultados obtidos;
- Análise dos procedimentos existentes;
- Avaliação da granulometria resultante final;
- Avaliação económica do modelo em prática;
- Estudo dos materiais e técnicas a utilizar para monitorização e avaliação dos resultados;
- Contextualização dos procedimentos globais a implementar nesta atividade;
- Procedimentos a implementar para melhoria do rendimento desta atividade.

CAPÍTULO 2 – MACIÇO ROCHOSO-DESMONTE: RENDIMENTO DA GRANULOMETRIA RESULTANTE NA PRODUTIVIDADE DAS OPERAÇÕES A JUSANTE

2. Maciço Rochoso-Desmonte: Rendimento da granulometria resultante na produtividade das operações a jusante

2.1. Maciços Rochosos

2.1.1. Caracterização e reconhecimento geológico

A caracterização e reconhecimento geológico têm como objetivo a determinação dos parâmetros e propriedades que permitam antecipar o comportamento do maciço rochoso, descrevendo as condições presentes no maciço e identificando os materiais que compõem o mesmo. O referido estudo remete-se inicialmente à inspeção visual do maciço aflorante, no qual é possível vislumbrar algumas propriedades perceptíveis a “olho nu”, nomeadamente a caracterização meso e macroscópica da matriz rochosa, o grau de alteração, a textura, a rugosidade, a fracturação, a presença de água, entre outros.

2.1.2. Descontinuidades

Designa-se, usualmente, por descontinuidade qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma dada formação geológica. Estas são de extrema relevância pois, ao seccionarem um dado maciço rochoso, vão influenciar as propriedades geomecânicas deste, uma vez que lhe conferem um comportamento, em termos de deformabilidade, de permeabilidade e de resistência (Galiza et al., 2011). Em termos geológicos, estes processos ocorrem quando existe uma pressão externa exercida sobre o maciço rochoso, pressão essa que apresenta resistência igual a resistência mecânica do maciço. Este tipo de pressões referidas anteriormente tem a mais diversificada origem, podendo ser referidas as pressões litoestáticas, as forças tectónicas, a circulação e pressão provocada pelos geofluidos. Em mecânica das rochas, a designação descontinuidade apresenta-se como termo geral em relação a maioria das depressões ocorridas na crosta terrestre (como falhas, diáclases, estratificação, xistosidade, etc.) de um maciço que apresenta baixa resistência à tração (ISRM, 1978).

O estudo exaustivo da compartimentação do maciço rochoso, ou seja, das descontinuidades, é extremamente importante pois permite esclarecer e perceber os planos de compartimentação e fratura, à qual a matriz rochosa está sujeita, o que em maciços rochosos muito fragmentados (como é o caso), este critério constitui um conceito essencial no âmbito de caracterização e projeto geológico-geotécnico.

As descontinuidades podem ser de variados tipos, dependendo essencialmente da sua génese (e.g. Rocha, 1981; Pereira, 1985; Goodman, 1993; Mandl, 2005). O Quadro 1 retrata a tipologia e a distinção por tipos de descontinuidades, agrupando-se esta tipologia na dependência da ocorrência de forma sistemática (em família) ou singularmente (um único plano de compartimentação presente na matriz rochosa).

Quadro 1-Tipo de descontinuidades e sistematização em geologia estrutural (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al. 2002).

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

2.1.3. Parâmetros de maciços rochosos

Segundo González de Vallejo & Ferrer (2011), para realizar-se uma boa caracterização na globalidade do maciço rochoso, deverá efetuar-se a partir dos dados obtidos no estudo dos afloramentos, juntamente com a descrição petrofísica da matriz rochosa e das condições geotécnicas das descontinuidades, bem como deverão ser considerados outros aspetos representativos do conjunto, tais como (ISRM, 1978, 1981, 2007):

- Número e orientação das descontinuidades;
- Dimensão do bloco unitário e intensidade da fracturação;
- Grau de alteração.

A classificação dos maciços rochosos, tendo em conta o número de descontinuidades, apresenta-se no Quadro 2.

Quadro 2-Classificação de maciços rochosos relativamente ao número de famílias presente num dado maciço rochoso (ISRM, 1981).

Tipo de maciço	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 aspeto idêntico ao de um solo

Numa perspetiva de caracterização do contexto geológico local, e caracterizando a compartimentação em termos de diaclasamento, é possível através da construção de blocos-diagramas exemplificativos das famílias presentes num dado maciço, verificar-se e visualizar-se a sua orientação relativa, o tamanho e, conseqüentemente, a forma do bloco representativo da matriz rochosa (figura 1).

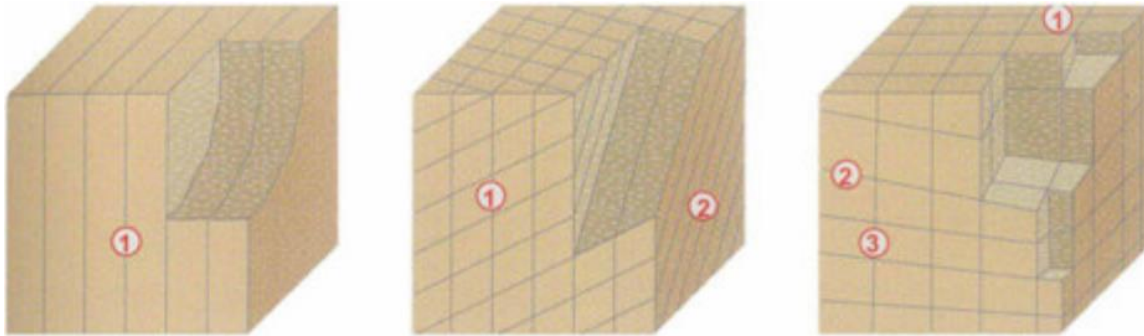


Figura 1-Superfícies de compartimentação e representação das famílias mediante o bloco unitário presente (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Em geologia estrutural e em geotecnia de maciços fraturados, a caracterização do tamanho e a forma do bloco unitário apresenta-se com carácter primordial e como parâmetro crítico a determinar em maciços rochosos. O comportamento mecânico e mecanismos de rotura estão diretamente ligados à fracturação existente num dado maciço, e grande parte pela conjugação das famílias aí presentes. Posto isto, a determinação do bloco unitário que representa a fracturação do maciço em estudo apresenta grande relevância numa perspetiva da estabilidade e é usualmente utilizada na classificação dos maciços rochosos. Relativamente à sua determinação, este pressuposto apresenta três parâmetros geotécnicos simples (Rocha, 1981; Pereira, 1985): a orientação dos sistemas de descontinuidades, o espaçamento real (espaçamento perpendicular entre diáclases de uma mesma família), e a persistência.

Dependendo da variação destes parâmetros, são duas as soluções possíveis: i) verifica-se o aparecimento de famílias de descontinuidades que conseguem delimitar um bloco unitário, ii) em alternativa a massa rochosa não possui uma fracturação que possibilite o aparecimento dos blocos. Dos três parâmetros referidos a orientação e o espaçamento são os mais fáceis de quantificar.

As características da qualidade dos maciços rochosos são fundamentalmente consequência do seu estado de alteração, do grau de fracturação e de circulação geo-hidráulica da água subterrânea. 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). Devido ao seu condicionalismo e por ser um aspeto que está diretamente relacionado com a qualidade do maciço, a sua determinação é um fator importante a considerar. O reconhecimento do grau de alteração é inicialmente realizado por inspeção direta dos afloramentos, embora esta avaliação possa variar consoante experiência do observador. Para complementar esta análise, pode recorrer-se a métodos quantitativos, através da

medição de parâmetros como a resistência da rocha, a velocidade de propagação de ultrassons (e.g., ensaios geofísicos de refração sísmica), etc. A ISRM (1978, 1981) propôs que os graus de alteração a considerar fossem constituídos por 5 termos; no entanto, em geotecnia considera-se frequentemente a utilização de uma versão simplificada com 3 termos (Quadro 3):

- W1-2 – Rocha são a pouco alterada
- W3 – Rocha medianamente alterada
- W4-5 – Rocha muito alterada a decomposta.

Quadro 3-Graus de alteração propostos pela ISRM (1981) e GSE (1995).

Grau de alteração	Simbologia		Descrição
Sã ou não alterada (descoloração)	W1	W1-2	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa.
Ligeiramente alterada	W2		Mudanças na cor original da matriz rochosa
Moderadamente alterada	W3	W3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofísica original.
Muito alterada	W4	W4-5	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo.
Completamente alterada	W5		Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual.

2.1.4. Parâmetros geológico-geotécnicos das discontinuidades

Como foi referido anteriormente, o estudo exaustivo da compartimentação do maciço rochoso apresenta-se como conceito essencial na caracterização geológica-geotécnica local. Neste sentido, o estudo das discontinuidades é bastante importante, pois estas estruturas condicionam o comportamento dos maciços rochosos, com relevância ao nível da deformabilidade, resistência e permeabilidade. A International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1978, 1981) recomenda que o estudo das discontinuidades deve atender, principalmente, à determinação das suas principais

características tais como a atitude, o espaçamento, a rugosidade, a abertura e o enchimento, sendo a sua descrição, em regra, realizada em campo.

Na descrição das diferentes famílias de descontinuidades num maciço rochoso inclui-se os seguintes parâmetros geológico-geotécnicos (Figura 2):

- Atitude geológica (direção/inclinação);
- Grau de fracturação (*fracture intercept*) e espaçamento;
- Continuidade ou persistência;
- Abertura;
- Rugosidade;
- Preenchimento;
- Percolação de água;
- Resistência da parede das descontinuidades.

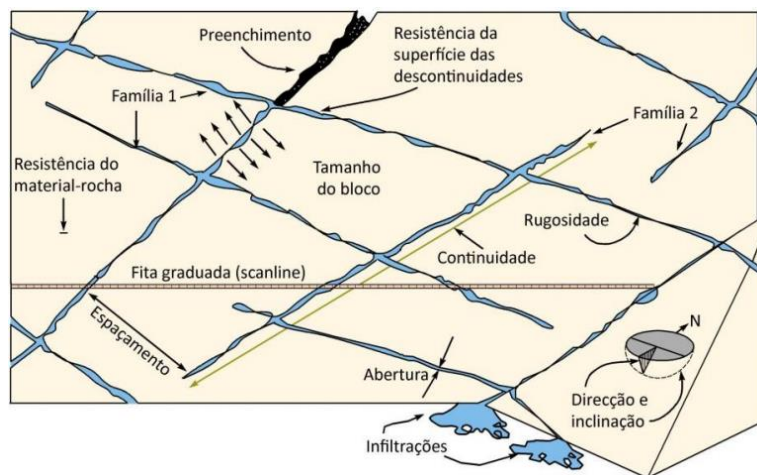


Figura 2-Representação esquemática dos parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

De seguida apresentar-se-á uma breve descrição dos parâmetros acima referidos:

- Atitude geológica (direção/inclinação):

A orientação espacial de uma descontinuidade é definida em regra, por dois parâmetros: a direção - definida como o ângulo entre uma reta horizontal do plano e o Norte magnético; e a inclinação - definida como a amplitude angular entre a reta de maior declive e o plano horizontal) (Figura 3), sendo este parâmetro descrito em campo e a sua medição efetuada com o auxílio de uma bússola (munida de um clinómetro).

Ao analisar a distribuição das descontinuidades num maciço rochoso verifica-se que de um modo geral elas apresentam uma certa regularidade, podendo, no entanto, existir vários conjuntos com orientações distintas. Desta forma, é usual agrupar-se descontinuidades com orientações idênticas em famílias.

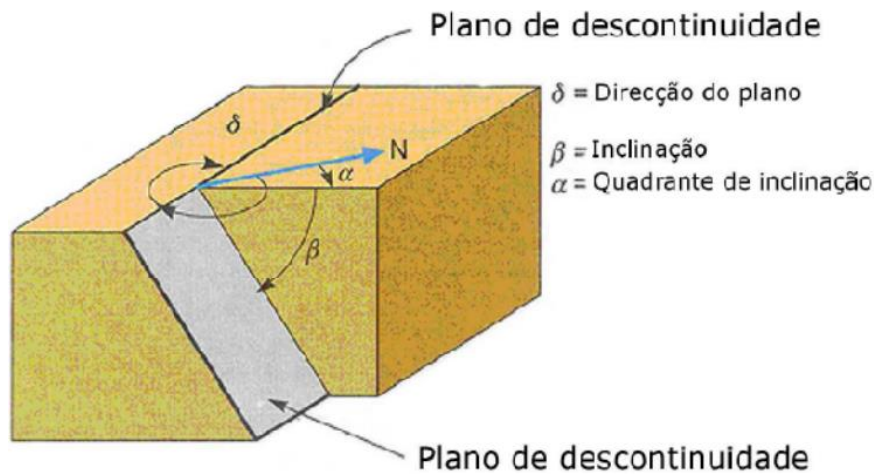


Figura 3-Representação atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Segundo a ISRM (1978), usualmente, um estudo com razoável representação local, deve apresentar cartografado um universo de pelo menos 150 a 200 descontinuidades. A análise deste parâmetro é possível através da criação de diagramas geológico-estruturais (especialmente diagramas de contorno estrutural e diagramas de rosetas), que permitem avaliar e analisar a orientação de cada descontinuidade e estimar a orientação média de cada família de descontinuidades (Priest, 1993; Palmström & Stille, 2010).

- Grau de fracturação e espaçamento:

O grau de Fracturação (*fracture intercept*) é definido pela distância entre duas descontinuidades, independentes da família de descontinuidades que representam, e que intercetam a linha de amostragem. O espaçamento entre duas descontinuidades corresponde à distância perpendicular entre as mesmas, sendo essas descontinuidades definidas por uma mesma família. A medição deste parâmetro é realizada com o auxílio de uma fita graduada (Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004) colocada na face exposta do maciço rochoso, com extensão suficientemente representativa da frequência das descontinuidades. A Figura 4 apresenta as recomendações propostas pela ISRM (1981) relativamente à medição do espaçamento entre descontinuidades.

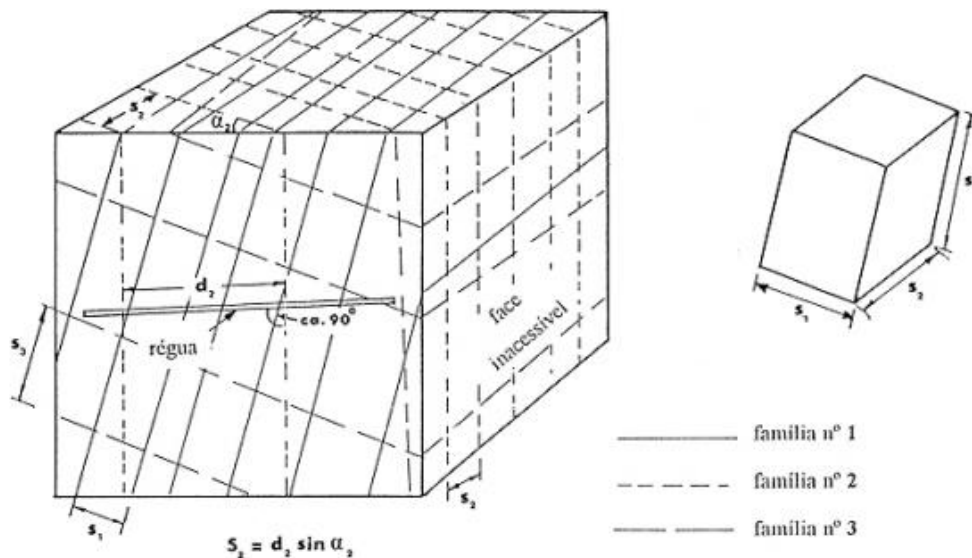


Figura 4-Medição do espaçamento entre descontinuidades a partir de uma face exposta do maciço (adaptado de ISRM, 1978, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

No Quadro 4 é apresentada a terminologia proposta pela ISRM (1978,1981), a ser utilizada para caracterizar o maciço rochoso em termos de espaçamento entre descontinuidades.

Quadro 4-Classificação do espaçamento entre descontinuidades proposta pela ISRM (1978,1981).

Intervalo (cm)	Simbologia		Designação	
> 200	F1	F1-2	Muito afastadas	Afastadas
60 - 200	F2		Afastadas	
20 - 60	F3	F3	Medianamente afastadas	Medianamente afastadas
6 - 20	F4	F4-5	Próximas	Próximas
< 6	F5		Muito próximas	

- Continuidade ou persistência:

A continuidade ou persistência de uma descontinuidade é o comprimento da sua extensão superficial. A continuidade das descontinuidades apresenta-se geralmente como aspeto determinante na definição de características mecânicas de potenciais superfícies de rotura. Este parâmetro é relativamente complexo e complicado de quantificar, visto que na sua generalidade apenas se observam dimensões aparentes pela observação de afloramentos. Este parâmetro é medido com auxílio a uma fita métrica. Nesta quantificação as diferentes famílias de descontinuidades devem classificar-se quanto à sua continuidade, podendo ser descritas como contínuas, sub-contínuas e/ou descontínuas. Outro aspeto a ter atenção é o destacar das famílias com maior representação e mais contínuas, posto que na sua generalidade serão estas que condicionaram o maciço rochoso relativamente à compartimentação e rotura.

A ISRM (1978,1981) introduziu o conceito de persistência, traduzido pelo comprimento das interseções da família de descontinuidades em estudo, e estabeleceu cinco nomenclaturas (Quadro 5):

Quadro 5-Descrição da Continuidade proposta pela ISRM (1978,1981).

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

- Abertura:

Designa-se abertura como a distância medida na perpendicular entre duas paredes de descontinuidades (Figura 5). Relativamente a este parâmetro, o mesmo varia consoante a localização deste ao longo do maciço rochoso. Ou seja, em profundidade as distâncias consideradas tendem a diminuir, tornando-se mesmo fechadas a certa altura devido ao seu grau de confinamento. Relativamente à sua relevância, este parâmetro torna-se essencial em termos de resistência ao corte das descontinuidades, modificando as tensões efetivas que atuam nas paredes dos mesmos. A medição é realizada diretamente na face exposta do maciço rochoso, através da utilização de uma régua graduada.

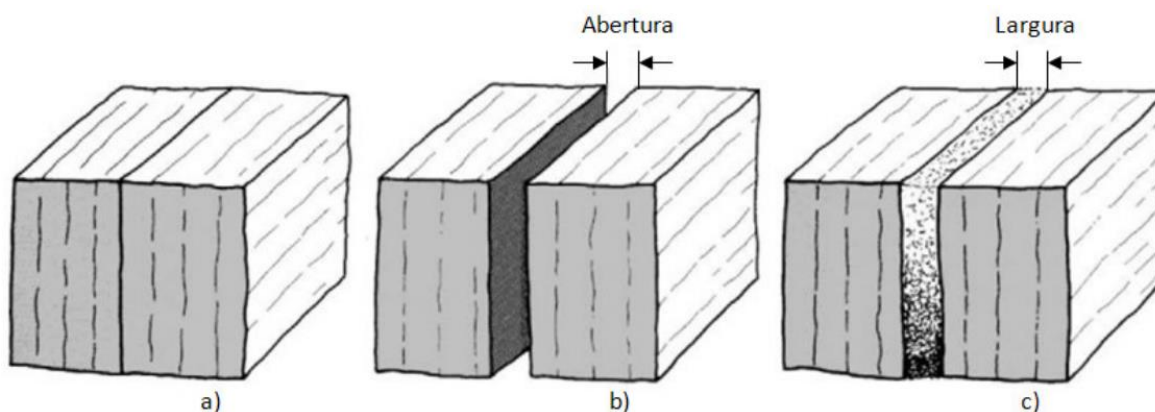


Figura 5-Diagramas que ilustram as definições de abertura das descontinuidades (ISRM, 1978): a) Descontinuidades fechadas; b) Descontinuidades abertas; c) Descontinuidades preenchidas.

O Quadro 6 apresenta a proposta elaborada pela ISRM (1978,1981) para a abertura das descontinuidades e a terminologia associada.

Quadro 6-Abertura das descontinuidades proposta pela ISRM (1978,1981).

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

- Rugosidade:

As paredes das descontinuidades apresentam em regra irregularidades, estando esse conceito diretamente associado com a rugosidade das mesmas. Este parâmetro tem diretamente influência no que diz respeito à resistência ao corte, no qual, quanto maior for a rugosidade (presença de irregularidades) nas paredes das descontinuidades, maior será a respetiva resistência. Pode-se perceber que quanto maior for o nível de irregularidades aí presentes, maior será o atrito existente entre as paredes das descontinuidades, logo menor será a possibilidade de ocorrência de rotura do maciço. Ao invés, quanto maior for a abertura e presença de preenchimento entre paredes de descontinuidades (espessura desse preenchimento), menor é a resistência ao corte, muitas vezes levando a rotura do maciço. A descrição da rugosidade requer, normalmente, duas escalas de observação (González de Vallejo et al., 2002):

- Escala métrica para avaliar a ondulação das descontinuidades que podem ser: planas, onduladas ou denteadas;
- Escala milimétrica para avaliar a rugosidade ou a irregularidades das descontinuidades. Estas, podem ser: lisas, rugosas ou muito rugosas.

A medição da rugosidade no terreno pode ser efetuada de diversas formas, dependendo sobretudo, da exatidão requerida e/ou da acessibilidade ao afloramento. Normalmente a sua avaliação é realizada através da inspeção visual e, neste caso, recorrendo à sensibilidade do tato em comparação à superfície padrão (Quadro 7 e Figura 6).

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

Classe	Descrição	Nomenclatura	Forma do perfil
I	Muito rugosa	R4-5	Denteadada
II	Rugosa	R3	
III	Lisa a algo rugosa	R1-2	
IV	Muito rugosa	R4-5	Ondulada
V	Rugosa	R3	
VI	Lisa a algo rugosa	R1-2	
VII	Muito rugosa	R4-5	Plana
VIII	Rugosa	R3	
IX	Lisa a algo rugosa	R1-2	

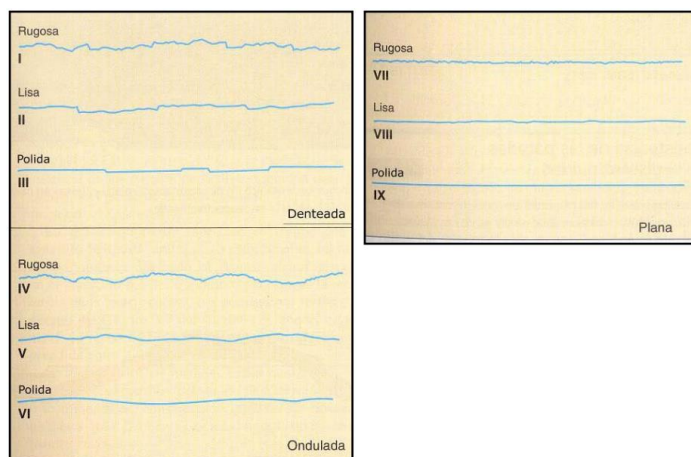


Figura 6-Classes dos perfis de rugosidade (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

- Preenchimento:

O preenchimento ou enchimento encontra-se diretamente relacionado com a abertura das descontinuidades, e refere-se ao material que se encontra entre paredes de descontinuidades adjacentes. É muito frequente, nas aberturas das descontinuidades a existência de materiais diferentes relativamente aos quais é constituída a rocha, material desagregado e decomposto, argila, etc., sendo importante o seu levantamento e contabilização.

- Percolação de água:

No maciço rochoso e ao longo da fissuração existente no mesmo, é muito frequente constatar a presença de escorrência de água, podendo caracterizar-se este parâmetro como seco, húmido, gotejante ou com presença de fluxo.

- Resistência da parede das discontinuidades:

Relativamente à resistência das paredes das discontinuidades, este parâmetro é muitas vezes caracterizado com auxílio de um ensaio de campo com esclerómetro portátil (usualmente designado por martelo Schmidt). Este ensaio relaciona o ressalto proporcionado pelo instrumento de medição com o ábaco de Miller, extrapolando assim o valor da resistência mecânica do maciço aflorante.

2.1.5. Técnica da amostragem linear

A técnica de amostragem linear (“Scanline Sampling Technique”), técnica descrita, entre outros, por Priest & Hudson (1981), Hudson & Priest (1983), Chaminé, H. I. & Gaspar (1995), Peacock et al. (2003) e Brady & Brown (2004), consiste na extensão de uma fita graduada ao longo da face exposta do maciço em estudo, e na cartografia de algumas características (geométricas e mecânicas) propostas por ISRM (1981), de todas as discontinuidades por esta intercetada (Figura 7).

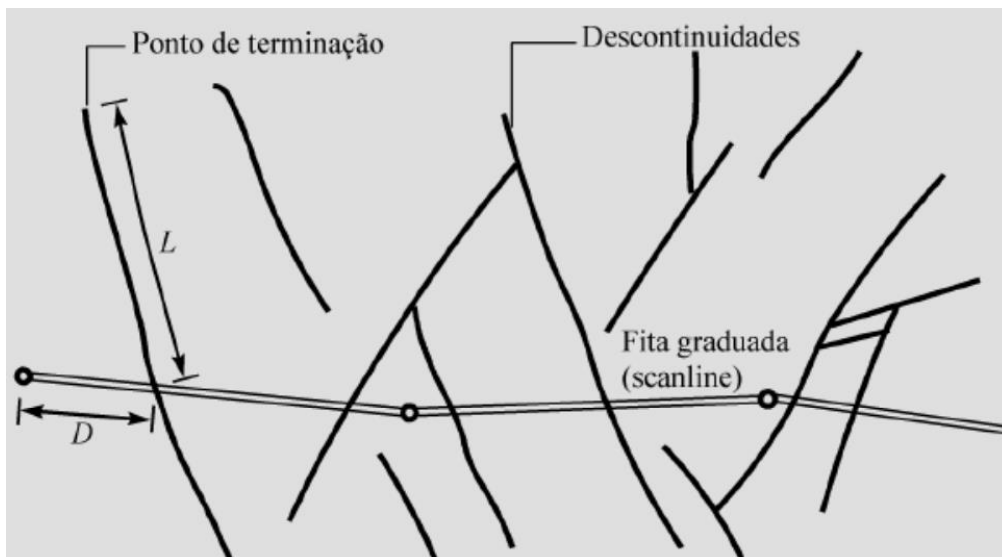


Figura 7-Esquema do dispositivo de levantamento em campo de discontinuidades pela técnica de amostragem linear: D - Distância à origem; L - Comprimento da descontinuidade exposto (adaptado de Brady & Brown, 2004).

Como foi referido anteriormente, cada descontinuidade intercetada pela fita graduada deve ser caracterizada, pelo que, os parâmetros em estudo são:

- Distância à origem da fita (D);
- Semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face exposta da rocha, apenas para um dos lados da fita graduada (L);
- Tipo de determinação que apresenta a extremidade da descontinuidade (T): R - No caso de ser em rocha; D - Outra descontinuidade; e O - Obscura;
- Atitude da descontinuidade (direção/inclinação) medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem e a descontinuidade;

- Curvatura (C), expressa numa escala de C1 a C5, correspondendo esta classificação de superfície planas a superfícies muito curvas, respetivamente;
- Rugosidade (R), expressa numa escala de R1 a R5, correspondendo esta classificação de superfícies lisas a superfícies muito rugosas, respetivamente;
- Grau de alteração (W), expresso numa escala de W1 a W5, correspondendo a maciço são até maciço completamente desagregado, respetivamente;
- Abertura;
- Tipo de enchimento;
- Presença de água;
- Outros parâmetros que se entenda relevante (e.g., orientação da scanline, altura de colocação da fita graduada/scanline, direção do hasteal em estudo, litologia presente etc.)

A Figura 8 representa a ficha de levantamento geológico-geomecânico de campo utilizada para preenchimento dos parâmetros em aplicação da técnica de amostragem linear. Relativamente à análise e compilação dos dados obtidos de campo, estes foram introduzidos nos aplicativos informáticos ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS (cf. Fonseca et al. 2010, Galiza et al. 2011 a, b, c), através dos quais foi possível o cruzamento exaustivo de toda a informação e por consequente a interpretação dos dados geológicos-geotécnicos e geomecânicos mais relevantes do maciço em estudo (figura 9).

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO
Técnica de Amostragem Linear (Scanline)

CÓDIGO (ID):

ORIENTAÇÃO: de talude: N E UNIDADE GEOLÓGICA: HOMEN(S): LOCALIZAÇÃO:
da "Scanline": N E ZONA GEOTÉCNICA: PEDREGA:
SENTIDO: ALTURA À "SCANLINE"/SOLO (m): DATA: / / PEGARIBANCA:

IDENTIFICADOR ÚNICO	DEFINIÇÃO (A, ORIGEM Ø)	LITOLOGIA	TIPO DISCONTINUIDADE		ATTITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO		GRAU DE FRACTURAÇÃO		ABERTURA		TIPO DE ENCHIMENTO		RUGOSIDADE		CONTINUIDADE		TERMINAÇÃO		CURVATURA		PRESEÇA DE ÁGUA		OBSERVAÇÕES								
			W1	W2	W3	W4	W5	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	R1	R2	R3		R4	R5	C1	C2	C3	C4	C5	A1

Ficha de levantamento geológico-geomecânico e geomecânico original a 2010 (11/11, 11/11, 11/11), GSE (11/11)

Figura 8-Ficha de levantamento geológico-geomecânico com aplicação da técnica de amostragem linear (adaptado de Ramos, 2008).



Figura 9-Exemplo da aplicação ScanGeoData|BGD para maciços rochosos fraturados (adaptado de Fonseca et al. 2010, Galiza et al. 2011 a, b, c).

2.2. Desmorte de Maciços Rochosos

2.2.1. Generalidades

Como anteriormente descrito, o conhecimento geológico local é um domínio científico fundamental para a compreensão dos fenômenos envolvidos na fragmentação de rochas com recurso à utilização de explosivos. O conhecimento dos parâmetros geológicos e geotécnicos que caracterizam os maciços rochosos, e que modelizam o seu comportamento é a base para a compreensão dos mecanismos de rotura das rochas, de propagação e de dissipação da energia associada à detonação (Galiza et al., 2011). Os parâmetros geológico-geotécnicos e as propriedades presentes no maciço rochoso (e.g., composição mineralógica, grau de alteração, descontinuidades e domínio estrutural, estrutura geológica do maciço, etc.), características essas que intervêm diretamente nas diferentes operações realizadas e são preponderantes na qualidade e sucesso do desmorte de rocha com aplicação de cargas explosivas.

A escavabilidade de um maciço rochoso surge em direta concordância com a capacidade de resistência geomecânica do maciço rochoso e as características petrofísicas, geológico estruturais e geotécnicas das descontinuidades do mesmo. Na sua idealização, Franklin et al. (1971) classificou a escavabilidade do maciço em quatro zonas distintas, expressas no ábaco realizado pelo mesmo,

designado de ábaco de Franklin et al. (1971), o qual apresenta diferentes métodos de desmonte de rocha (figura 13): escavação mecânica (“Dip”), escarificação (“Rip”), explosivos para desagregar (“Blast to loosen”) e desmonte com explosivos (“Blast to fracture”).

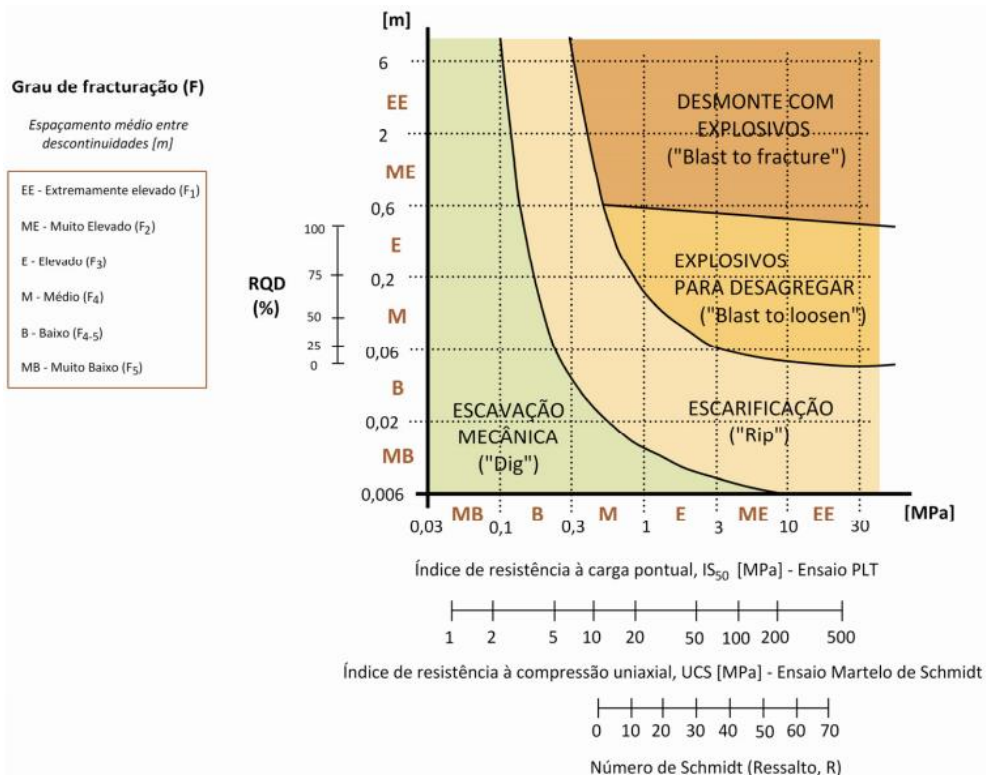


Figura 10-Ábaco onde apresenta-se expresso a escavabilidade de um dado maciço (PLT – Point Load Test; UCS – Uniaxial Compressive Strength; RQD – Rock Quality Index) (adaptado de Franklin et al. 1971).

Desmonte de rocha não é mais do que a operação de destaque do maciço rochoso, de uma parte mais ou menos representativa da rocha que o constitui (Gomes et al., 2007). Esta operação é levada a cabo com o intuito de modificar a topografia natural do maciço rochoso para vertentes, como a acessibilidade de implantação de diversas obras de engenharia, bem como extração da matéria-prima existente no local, para seu processamento e valorização industrial e económica.

Relativamente ao processo do desmonte de rocha com recurso a explosivos, este é constituído por diversas operações desenvolvidas sequencialmente (perfuração, carregamento e detonação) (Galiza et al., 2011), sendo diversos os fatores que condicionam direta e indiretamente a qualidade do desmonte de rocha tendo em conta cada processo, sendo que a qualidade/rentabilidade com que cada operação executada depende das anteriores e influencia a seguinte, e por consequente, todo o restante processamento de valorização industrial (Figura 11).

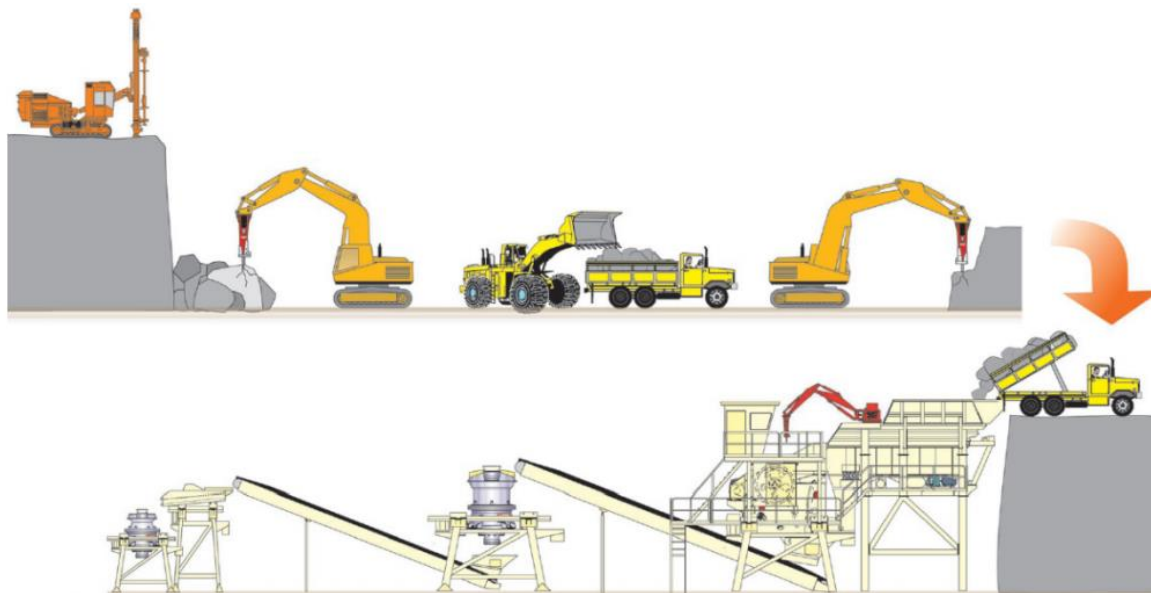


Figura 11-Imagem exemplificativa das diversas etapas, desde o desmonte de rocha (perfuração) até ao processo de classificação e fragmentação para valorização do material rocha da indústria extrativa e transformadora (adaptado de Rock Excavation Handbook, Sandvik/Tamrock, 1999).

2.2.2.Perfuração

Como podemos observar na Figura 11, a operação de perfuração é a primeira atividade no processo industrial de transformação e valorização económica do material rocha, e entra em linha direta com a fragmentação resultante do desmonte. Como processo inicial, e o qual desencadeia toda a restante sequencia de operações, a perfuração é um dos parâmetros mais importantes do desmonte em bancada e a otimização dessa atividade é determinante relativamente ao resultado técnico-económico obtido do desempenho do mesmo (fragmentação), sendo posteriormente refletido nas operações de fragmentação secundária, carga e transporte, e britagem.

Esta otimização e correta utilização e manuseio do equipamento de perfuração, não só promove o aumento de rendimento da perfuração estabelecida, como minimiza o desgaste das respetivas peças de corte e equipamento de perfuração.

Tendo como aspeto fulcral a melhoria da fragmentação para posteriormente otimização da operação de britagem (operação esta que se encontra diretamente ligada ao produto final produzido), e esta sendo parte final de um processo que implementa diversas atividades antecessoras, mesmo sendo a que apresenta mais peso em termos económicos, a sua rentabilidade, depende da qualidade das restantes operações previamente realizadas. Nesse sentido, e compreendendo que a perfuração é a primeira operação a ser executada, e mesmo tendo custos bastante mais reduzidos que as restantes operações, a sua otimização é a que mais influencia as operações subsequentes. Pelo supracitado, outro aspeto relevante e resultante da ineficiência do desmonte é a desmonte secundário (“taqueio”). Desmonte secundário é a atividade correspondente ao recurso a meios mecânicos (e ou explosivos) para desmontar blocos de grande dimensão resultantes do desmonte com explosivos.

Tanto esta operação como as atividades supracitadas (carregamento e detonação, carga e transporte, e britagem), são influenciadas pela correta execução da perfuração, e posteriormente da fragmentação resultante do desmorte, comprovando assim a importância de tal otimização (Figura 12).



Figura 12-Benefícios resultantes do alinhamento da perfuração e sua correta execução (adaptado de Galiza et al., 2011 a, b, c).

2.2.2.1. Propriedades da rocha que afetam a perfuração

Pelo supracitado, o contexto geológico-geotécnico presente no local de extração do material rocha é preponderante em termos de qualidade da perfuração e por consequente do desmorte, bem como na definição dos parâmetros a implementar do mesmo. A otimização de qualquer operação de desmorte 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).

2.2.2.2. Presença de descontinuidades

Relativamente ao grau de fracturação, este aspeto é influenciado pela quantidade, disposição e orientação das descontinuidades que normalizam a matriz rochosa. A presença de descontinuidades, a sua direção e inclinação, tipo, abertura, preenchimento, presença de água, e incidência das mesmas no maciço são aspetos a ter em atenção e que influenciam a qualidade da perfuração, ocorrendo muitas vezes desvios de perfuração.

2.2.2.2.1. Dureza e resistência do material rocha

Outro aspecto que influencia a qualidade e o rendimento da perfuração é a dureza do material rocha, propriedade que está intimamente relacionada com a qualidade dos materiais que apresentam uma forte resistência a ser furados, riscados ou desgastados (Sastre, 2000). E esta propriedade implica que o equipamento de perfuração exerça maior força de penetração para desagregar o maciço rochoso, tal como já foi referido.

2.2.2.2.2. Abrasividade

O parâmetro abrasividade caracteriza a capacidade que determinado material de elevada dureza, desgaste por atrito em equipamentos que induzam perturbação (acessórios de perfuração, provocadas pela fracturação (irregularidades) e zonas de concentração de tensões.

Segundo Galiza et. al. (2011), existem diversos fatores que contribuem para a capacidade abrasiva das rochas, os quais são:

- Dureza, forma e o tamanho dos grãos;
- Porosidade da rocha;
- Heterogeneidade e composição mineralógica das rochas.

2.2.2.3. Desvios

No processo de perfuração, esta operação supracitada apresenta associada desvio na sua execução, mesmo não havendo qualquer influência e erro humano associado (Figura 13).

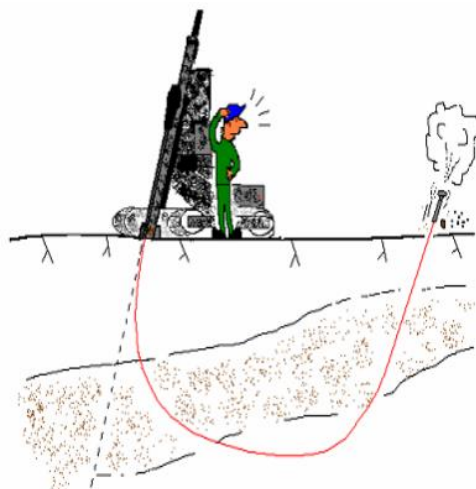


Figura 13-Representação desvio de perfuração (adaptado de Ramos, 2008).

Relativamente à qualidade da execução da perfuração, esta abordagem sustenta-se em dois aspetos importantes na sua caracterização, posição e trajetória do furo. É importante verificar e avaliar inicialmente a posição do furo ao atingir-se a cota pretendida e estabelecida, avaliando as trajetórias que os mesmos seguem, para posteriormente compreender os erros associados e os fatores que podem apresentar diferentes naturezas e a génese do tipo e amplitude do desvio.

Os desvios de perfuração estão muitas vezes associados ao erro na sua operação. Enquanto o erro de perfuração normalmente está associado a fatores de carácter perfeitamente identificável, como é o caso de erro humano, devendo ser identificados e corrigidos. No caso dos desvios de perfuração, estes estão diretamente relacionados com aspetos dificilmente contornáveis, como é o caso da heterogeneidade e anisotropia do maciço rochoso, os quais são necessários identificar com vista a minimizar as suas possíveis implicações no processo de desmonte.

2.2.2.3.1. Tipos de desvios

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

- I. Posicionamento;
- II. Emboquilhamento;
- III. Direção;
- IV. Inclinação;
- V. Comprimento/Cota.

Desvios associados à anisotropia do próprio maciço rochoso e às suas características geológicas, geotécnicas e geomecânicas:

- I. Flexão: Desvios progressivos, mas constantes ao longo do furo;
- II. Pontual: Desvios pontuais da trajetória do furo inerentes às anisotropias do maciço rochoso.

Os Quadros 8, 9, 10 e 11 descrevem os erros supracitados, as suas possíveis causas e eventuais medidas a adotar tendo em vista a sua correção e/ou minimização:

Quadro 8-Erro de Posicionamento (adaptado de Ramos, 2008).

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
I. POSICIONAMENTO	Verifica-se como primeiro erro possível na execução de um furo, e o qual consiste na execução do mesmo fora do local previamente definido.	Aplicação de técnicas de marcação pouco eficazes, como o caso da utilização de um conjunto de pedras encasteladas na marcação de um furo, não aconselhável devido ao fácil deslocamento das mesmas, com a movimentação do equipamento de perfuração.	Utilização de spray na 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 marcação da pega não respeita os parâmetros geométricos definidos anteriormente, caso do espaçamento (E) e 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 distancia à frente.

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

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
II. EMBOQUILHAMENTO	Emboquilhamento é a zona entre a boca do furo e um comprimento de 1 a 2 m de vara introduzida na rocha (dependendo do estado da bancada), ao qual poderá estar associado erros relacionado com algumas condicionantes da mesma, como é o caso da regularidade e/ou altura de material fragmentado e disperso na superfície a perfurar.	Bancadas com superfícies irregulares e zonas de difícil estabilização do carro de perfuração. Bancadas com demasiado material desagregado para as tornar mais regular.	Num correto emboquilhamento é importante uma bancada regular sem material desagregado e solto na sua superfície. Para tal é de evitar os excessos ou défices de sub-furação assim como deixar depositado material do próprio desmonte.

Quadro 10-Erro de direção e inclinação (adaptado de Ramos, 2008)

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
III. DIREÇÃO	Direção do furo não se encontra de acordo com o ângulo previamente previsto	Erros associados diretamente aos dispositivos de controlo e monitorização que os carros de perfuração dispõem	Equipamentos que possuam tais dispositivos de controlo e monitorização devem ter um acompanhamento direto e verificar como esses dispositivos se comportam, que parâmetros controlam e a fiabilidade apresentada. Para equipamentos mais antigos e que não dispõem de tais dispositivos, deve-se ter bastante rigor no posicionamento do equipamento e coluna, de forma a minimizar ao máximo os erros de direção e inclinação.
IV. INCLINAÇÃO	Inclinação do furo não se encontra de acordo com o ângulo previamente definido		

A Figura 11 apresenta, em imagem representativa, os dispositivos identificados anteriormente (direção e inclinação da torre do equipamento de perfuração).

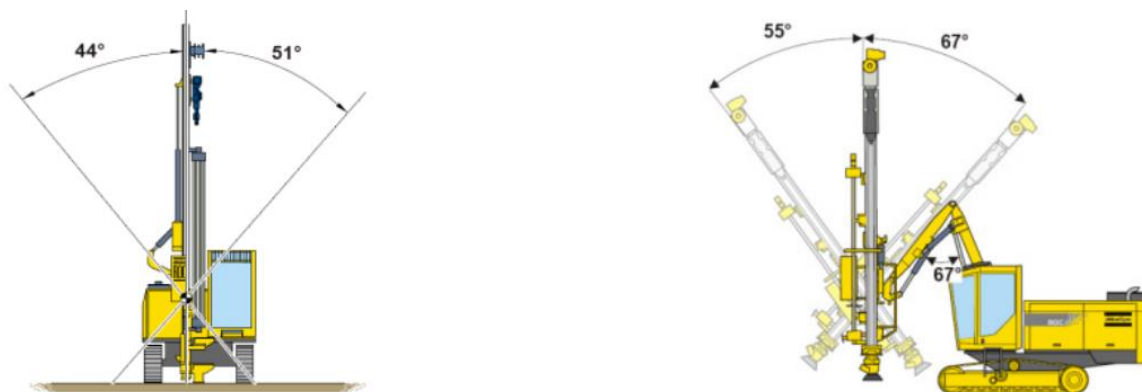


Figura 14-Direcção e inclinação (imagem ilustrativa) (adaptado de Ramos, 2008).

Quadro 11-Erro de comprimento e cota (adaptado de Ramos, 2008).

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
V. COMPRIMENTO/COTA	O comprimento do furo real não se encontra de acordo com a cota previamente definida.	Tipo de erro diretamente relacionados e ligados com os dispositivos de controlo e monitorização que o carro de perfuração dispõe. Erros associados também a possíveis desvios de furação e a erros gerados por erros com direção e/ou inclinação.	Para equipamento mais antigos que não possuam dispositivo de controlo de comprimento do furo, deve-se ter especial atenção a 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.

2.2.3. Técnicas utilizadas

2.2.3.1. Medição de desvios: Ensaio *Boretrak*

Para realizar este trabalho, utiliza-se um equipamento específico designado *Boretrak*, o qual é um equipamento que permite um levantamento contínuo de desvio lateral (ângulo real perpendicular a frente de desmonte, Norte/Sul), desvio frontal (ângulo real medido paralelamente à frente de desmonte, Este/Oeste).

Este equipamento é então constituído por (Figura 15):

- Sonda “Sensor Probe”, com dois inclinómetros colocados perpendicularmente um ao outro, eixos medidos (*pitch & roll*);
- Conjunto de varas articuladas (um ou dois conjuntos) leves, com comprimento de um metro por segmento, e respetivo suporte de varas;
- Dispositivo de controlo (*notebook* e bateria eletrónica);
- PC com *software* específico e compatível.

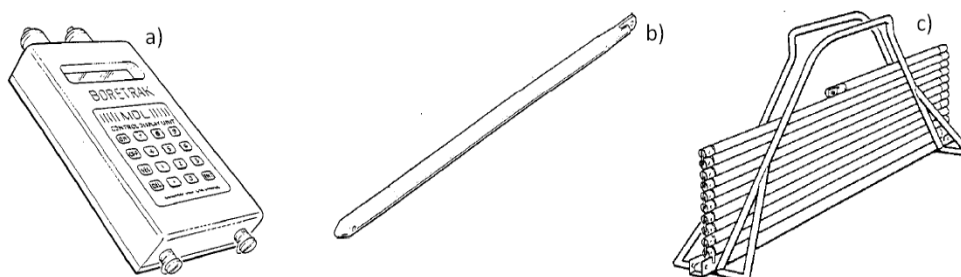


Figura 15-Figura exemplificativa dos diversos componentes do Boretrak, a) Dispositivo de controlo; b) Sonda "Sensor Probe"; c) Conjunto de varas e respetivo suporte (adaptado de Ramos, 2008).

➤ Princípio de Medição

O equipamento *Boretrak* apresenta um chip microprocessador que impulsiona sensores eletrolíticos de gravidade, permitindo assim a determinação da inclinação presente por furo. Em termos de colocação e disposição do equipamento, este deve ser colocado perpendicularmente ou paralelamente ao sentido de perfuração (dependendo do contexto e do azimute definido). De seguida é introduzido a sonda acoplada ao sistema de varas, sendo que a mesma executa duas leituras em cada registo, “Pitch & Roll”, que representam duas inclinações medidas perpendicularmente, e através das quais é possível calcular-se os desvios laterais e frontais de cada furo. Este processo deve ser corretamente executado e com grande exatidão, pois qualquer “ruído” no seu processo promove distorções nas leituras obtidas.

➤ Modo de operação

A sonda é acoplada à primeira vara e seguidamente introduzida no furo sequencialmente até à profundidade pretendida de leitura. Cada vara possui 1m de comprimento, o que permite ter um maior controlo da profundidade do furo a verificar. Após a colocação da sonda à profundidade pretendida, estabiliza-se o conjunto (varas e sonda) e com o auxílio do dispositivo de controlo regista-se o referido ensaio (o intervalo de leitura é definido no início do ensaio). O processo é repetido até atingir a cota final, nessa altura é corrigida a profundidade do furo. Posteriormente ao trabalho de campo, os dados recolhidos são descarregados para o PC (Figura 16).

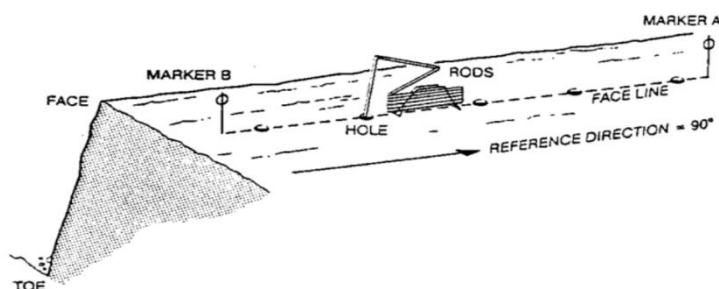


Figura 16-Modo de medição e operação (adaptado de Ramos, 2008).

2.2.3.2. Medição da regularidade de bancada: Ensaio *Laser*

Em termos de regularidade dos planos de bancada, o ensaio de campo *Laser Profile* é constituído por um emissor (Figura 17) com rotação de 360 graus que emite sinal não suscetível ao olho humano e que é captável por célula de receção colocada no martelo de perfuração ou um pequeno recetor externo associado a uma régua “standard” que define a cota. Este aparelho topográfico de varrimento da frente de desmonte regista coordenadas por reflexão do feixe diretamente na rocha. Os dados obtidos são tratados posteriormente através de um *software* específico e compatível, criando uma planta em 3D para integração dos dados da perfuração obtidos com o equipamento *Boretrak*.



Figura 17-Equipamento emissor e recetor de informação (*Laser Profile*).

A aplicação deste tipo de equipamento é de grande utilidade, apresentando em termos práticos as vantagens referidas adiante:

- Controlo dos planos de bancada definidos (considerando a cota da soleira definida anteriormente);
- Melhorar a marcação e colocação dos furos, alinhamento e distribuição;
- Em bancadas muito irregulares e consoante determinada cota, atribuição do valor de comprimento de furação para cada furo;

A utilização do sistema laser em determinadas circunstâncias por vezes encontra alguma dificuldade de aplicação devido à colocação da célula recetora de sinal que por vezes não possibilita a completa receção do sinal, limitando assim a sua utilização, bem como em termos de movimentação e colocação do equipamento, que em terrenos difíceis é uma preocupação. Neste sentido, usualmente é feita a marcação do local de perfuração, na sua maioria com o auxílio de *spray* marcando o local sempre que possível no próprio maciço, tendo como referencial já a cota à superfície expectando posteriormente o comprimento de furo a furo para que seja possível garantir uma superfície da soleira uniforme. Posteriormente é elaborado um relatório com o comprimento de furação que é entregue ao operador, orientando-o, e se possível aglutinando o sistema LIM presente em alguns equipamentos de perfuração, o qual possibilita ao operador a definição do comprimento de furo a executar e que o sistema pare automaticamente quando esse comprimento é alcançado.

Este sistema apresenta diversas vantagens em termos práticos e económicos, uma vez que a sua utilização pode realizar uma monitorização relativamente à perfuração, minimizando alguns erros comuns e otimizando certos processos, nomeadamente:

- Distância à frente elevada e/ou reduzida;
- Maior rendimento de perfuração evitando subfurações desnecessárias;
- Mau posicionamento do equipamento de perfuração relativamente à frente;
- Melhor movimentação dos rebentamentos, visto que todos os furos estão ao mesmo nível (corte da soleira mais eficiente);
- Perfuração controlada em profundidade, reduzindo deste modo o consumo de explosivo e perfuração;
- Menor quantidade de vibrações por efeito de confinamento das cargas em excesso;
- Emboquilhamento com melhor qualidade e rendimento devido a maior qualidade do desmonte e corte de soleira mais eficiente;
- Diminuição dos desvios de perfuração e fracturação no maciço
- Aumento da vida útil do equipamento de perfuração, trabalhando com a máxima produtividade e eficiência;
- Aumento da vida útil dos acessórios de perfuração (varas, bits e encabadouros);
- Maior rentabilidade e rendimento dos processos de carga e transporte e britagem.

2.2.4. Equipamento de perfuração

O equipamento de perfuração e todas as questões relacionadas com o mesmo é um aspeto bastante influente nos desvios de perfuração, produtividade e rentabilidade deste processo. Na sua classificação e análise, o equipamento foi dividido em três enquadramentos de avaliação, subdividindo-se os mesmos parâmetros em outros tantos pressupostos.

- Equipamento de perfuração – devido à diversa quantidade de equipamentos de perfuração disponível no mercado, é indispensável registar-se o modelo e martelo;
- Sistema de controlo e monitorização – alguns equipamentos já mais evoluídos tecnologicamente apresentam sistemas de controlo e monitorização, sistemas que corretamente utilizados permitem uma maior qualidade e alinhamento da furação, reduzindo os erros de perfuração.
- Coluna – os aspetos a avaliar em termos de coluna de perfuração é a sua rigidez e o número de apoios das varas. A rigidez varia consoante o tipo de liga que a constitui, consideram-se dois tipos de colunas, a coluna de ferro e a coluna de aço. O número de apoios das varas permite avaliar a estabilidade da máquina, pelo que quanto mais pontos de apoio tem a vara, maior será a estabilidade e precisão com que se conseguirá executar o furo.

As ferramentas de execução têm grande influência nos desvios de perfuração que poderão ocorrer ao longo da furação. Neste estudo, o equipamento de perfuração utilizado foi o modelo **“Tamrock Ranger 700”** (Figura 18). Relativamente aos acessórios de perfuração utilizados por este equipamento, os mesmos estão referenciados nos Quadros 12 e 13.



Figura 18-Equipamento de perfuração: Tamrock Ranger 700.

Quadro 12-Ferramentas utilizadas na perfuração (adaptado de Dias, 2013).

Ferramentas de execução	
Equipamento de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> • Martelo hidráulico
Método de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> • Rotopercussão • Martelo à cabeça
Acessórios de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> • Encabadouro • Varas • Bit
Parâmetros de regulação	<ul style="list-style-type: none"> • Rotação • Pressão • Limpeza • Avanço

Quadro 13-Avaliação do equipamento de perfuração (adaptado de Ramos, 2008).

Equipamento de Perfuração			
Equipamento	Modelo	Ranger 700	
	Martelo Superfície	HL 700 19,5 kW	
Sistema de controlo e monitorização	Direção	Não possui	
		Pouco fiável	X
		Fiável	
		Muito fiável	
	Inclinação	Não possui	
		Pouco fiável	X
		Fiável	
		Muito fiável	
	Comprimento	Sim	X
		Não	
	Profundidade	Sim	
		Não	X
Coluna	Rigidez	Ferro	
		Aço	X
	Apoios	Insuficiente (1)	X
		Suficiente (2)	
		Bom (3)	

2.2.4.1. Método de perfuração

Em desmante de rocha em bancada, o método rotopercussivo com martelo à superfície representa uma grande quota-parte dos equipamentos de perfuração, método preferencialmente utilizado na zona norte de Portugal Continental, devido às características geológico-geotécnicas (Fonseca, 2008), e método utilizado neste estudo.

Método rotopercussivo com martelo à superfície (*Top-hammer*):

Este tipo de mecanismo apresenta dois sistemas básicos de ativação que são rotação e percussão, forças essas acionadas pelo martelo e encabadouro e sequencialmente transmitidas para as varas e bit de perfuração.

2.2.4.2. Acessórios

Os acessórios de perfuração são os meios de transmissão da energia desde a máquina de perfuração/martelo até à superfície a fragmentar. Os acessórios de perfuração normalmente considerados, integrantes e de salientar e que merecem avaliação mais rigorosa são: encabadouro, varas e bit de perfuração.

- Encabadouro:

O encabadouro (Figura 19) é o acessório de perfuração que proporciona a ligação desde o pistão/martelo até as varas, sendo responsável pela transmissão da energia entre os supracitados elementos. Em termos de configurações este elemento apresenta algumas variantes, sendo aspecto importante a assinalar, pois depende deste a transmissão de energia aos restantes acessórios subsequentes.

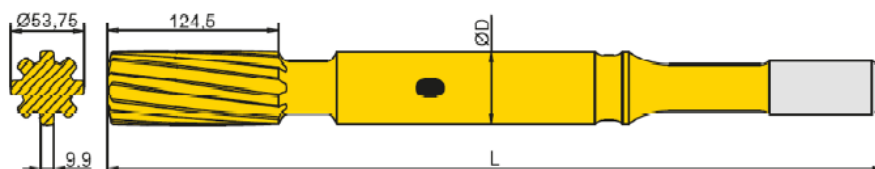


Figura 19-Encabadouro T45 (adaptado de Ramos, 2008).

- Varas:

As varas são os elementos que fazem a transição desde o martelo/encabadouro até ao bit perfurador, sendo a energia rotopercussiva transmitida por estes acessórios. Este tipo de acessórios apresenta vários tipos, modelos específicos para cada trabalho a executar e tipo de perfuração, como: a) barrenas, destinadas à perfuração em trabalhos de exploração ornamental; b) varas extensões, dividindo-se em varas standard e varas guias.

- Bits de perfuração:

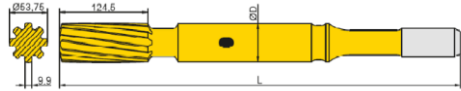
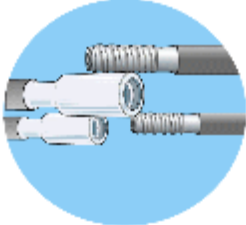

Todos os acessórios de perfuração merecem uma ponderada selecção e avaliação. Relativamente aos bits estes merecem particular atenção, pois é a ferramenta responsável pelo corte do maciço rochoso (Sandvik-Tamrock, 2009). Nesse sentido a sua escolha pode comprometer a eficiência do resultado final da perfuração em termos técnico-económicos. Por tudo isto, este acessório merecerá avaliação mais detalhada. Para o desmonte em bancada existem *bits standard*, retrac e guia (Figura 20). Os *bits standard* e de botões representam grande consumo no nosso país, no desmonte de rocha com recurso ao método rotopercussivo com martelo à superfície.



Figura 20-Bit de perfuração marca Robit, Normal e $\phi=76\text{mm}$. (http://www.directindustry.com/prod/robit-rocktools/button-dth-drill-bits-drifting-tunneling-57440-404949.html#product-item_948093).

O Quadro 14 apresenta os acessórios de perfuração e respetiva caracterização (o tipo, o modelo, a marca, entre outros) utilizados pelo equipamento de perfuração.

Quadro 14-Avaliação dos acessórios de perfuração (adaptado de Ramos, 2008).

Acessórios de perfuração				
Encabadouro		Tipo	T38	
			T45	X
			T51	
Varas		Tipo	T38	
			T45	X
			T51	
		Modelo	Standard	X
			Guia	
		Marca	Sandvik	X
Bit				
		Modelo	Standard	X
			Retrac	
			Guia	
		Marca	Sandvik	
			Mitsubishi	
			Robit	X
		Botão	Esférico	X
	Semi-balístico			
	Balístico			
Estado	Novo	X		
	Afiado			
	Usado			

2.2.5. Geometria diagrama de fogo

A Figura 21 representa os parâmetros geométricos, parâmetros estes que influenciam a fracturação no desmonte em bancada e restante sequência de atividades.

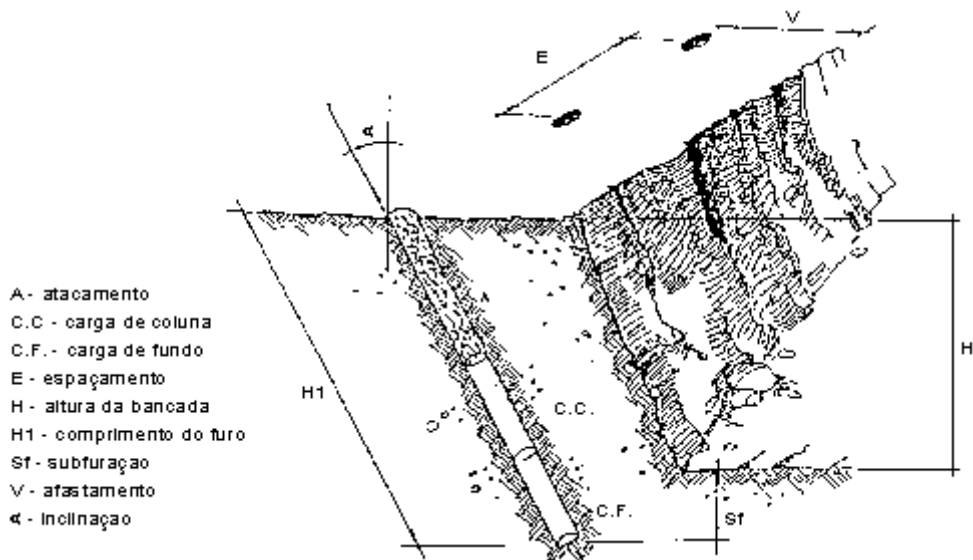


Figura 21-Geometria do desmonte em bancada (adaptado de www.lnec.pt).

- Diâmetro do furo

Segundo Langefors & Kihlstrom (1978), o diâmetro de furação é o parâmetro inicial da geometria do diagrama de fogo, podendo este influenciar os desvios de perfuração. A escolha do diâmetro do furo é condicionada por fatores como: fragmentação pretendida, controlo de vibrações, controlo de projeções, altura de bancada.

- Altura de bancada

A altura da bancada e a sua definição estão diretamente relacionadas com o diâmetro de perfuração pretendido. O ábaco apresentado na Figura 22 relaciona os parâmetros citados anteriormente. A altura de bancada é condicionada pelos constrangimentos locais e de equipamento, e definida consoante o projeto.

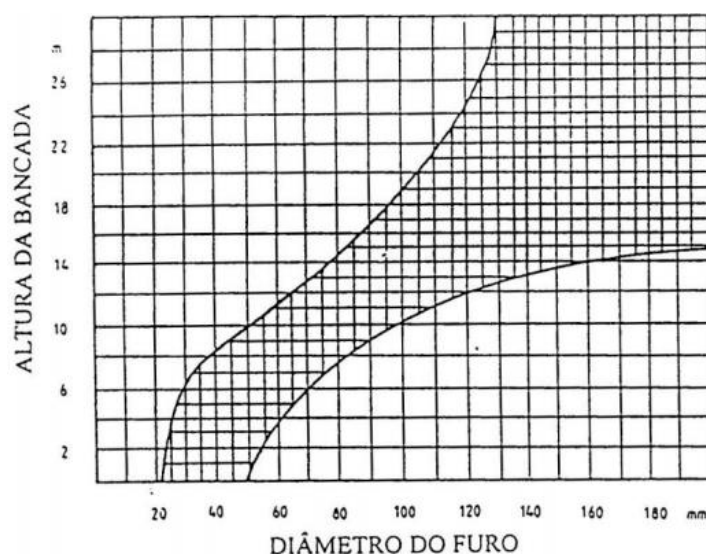


Figura 22-Relação altura de bancada/diâmetro de furo a executar (adaptado Galiza et al., 2007).

- Inclinação dos furos

Na realização dos furos, a inclinação dos mesmos proporciona maior qualidade relativamente ao aproveitamento da energia do explosivo, menor fricção na base da bancada, e proporciona maior quantidade de rocha extraída com o mesmo número de furos (Figura 23). A perfuração associada a uma subfuração conveniente facilita o corte da rocha segundo o plano da soleira, resultando a possibilidade de cargas específicas mais baixas entre 10 a 15%. São habitualmente utilizadas inclinações de 2:1 e 3:1 (Galiza et al., 2007). Outra mais-valia é a qualidade dos paramentos que com a inclinação diminui a sua quebra, proporcionando aumento da qualidade da próxima furação.

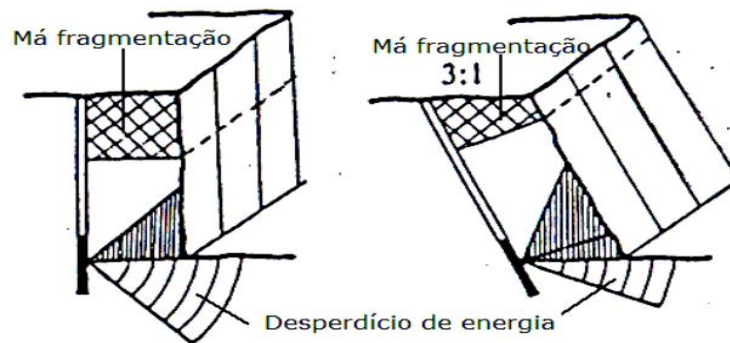


Figura 23-Qualidade do desmonte e utilização da energia libertada em furos verticais e inclinados (adaptado Galiza et al., Desmonte de Maciços Rochosos I, 2007).

2.2.6. Acessórios de tiro

O desmonte efetuado em maciços rochosos competentes é realizado com a aplicação de cargas explosivas ligadas entre si com auxílio de acessórios de tiro, sendo estes na sua atualidade de diversas qualidades: não elétricos, elétricos e mais recentemente detonadores eletrónicos.

Neste estudo, os acessórios de tiro utilizados na detonação da pega realizada em 14 de Novembro de 2013 foram detonadores não elétricos de 400 ms em profundidade, sendo a ligação à superfície feita por ligadores com temporização de 17, 25, 42 e 67ms, estando estes ligados a um detonador elétrico, que conectado a um detonador promove a deflagração.

Na segunda pega de fogo, o sistema de detonação das cargas explosivas a aplicar será com auxílio de detonadores eletrónicos.

2.2.7. Outros parâmetros

2.2.7.1. Operador

O operador, visto ser a pessoa que manobra o equipamento de perfuração, é um dos pontos mais importantes a avaliar, e também o mais difícil como se pode compreender. A sua experiência como manobrador na atividade de perfurar, a sensibilidade de compreender a correta interação

equipamento de perfuração-maciço a furar, bem como o conhecimento geral desta área, são aspetos importantes a levar em conta e a avaliar.

2.2.7.2. Parâmetros de regulação – equipamento

Os equipamentos de perfuração apresentam dispositivos de regulação relativamente a parâmetros como pressão, avanço, rotação e limpeza de furo, diretamente relacionados e regulados para o tipo de trabalho a executar, tipo de maciço rochoso, etc. Destes quatro aspetos, o avanço da perfuração é o que mais poderá entevir na génese do tipo e amplitude do desvio, sendo que o avanço muito alto potencia os desvios de perfuração (Ramos, 2008).

2.2.7.3. Emboquilhamento

Um bom emboquilhamento constitui um importante parâmetro relativamente à qualidade de perfuração executada, permitindo mesmo reduzir substancialmente os desvios de perfuração. A limpeza da bancada retirando os fragmentos de rocha solta/desagregada da superfície, deve ser um cuidado a ter em conta antes de executar-se qualquer operação. A limpeza de bancada pode expor as irregularidades presentes na soleira da camada a perfurar, sendo esse um contratempo, mas mesmo assim um mal menor, não perturbando tanto a etapa de perfuração. A limpeza tem grande importância em relação ao emboquilhamento, visto possibilitar que este não seja executado em cima de material partido aí depositado. A Figura 24 permite observar a qualidade de emboquilhamento presente em alguns furos.

Como referido anteriormente, este parâmetro potencia o acréscimo de desvios de perfuração, e assim sendo caracteriza o tipo de emboquilhamento em função do comprimento em que o furo é executado (Quadro 15).



Figura 24-Emboquilhamento em mau estado.

Quadro 15-Qualidade do emboquilhamento (adaptado de Dias, 2013).

Emboquilhamento	
Na rocha	0
Pouco material desagregado	< 0,25
Algum material desagregado	0,25-0,5
Muito material desagregado	> 0,5

2.3. Carga e Transporte

A etapa de carga e transporte constitui o processo de interligação entre o desmonte de maciço rochoso em bancada e o processo de valorização industrial, britagem. Este processo encontra-se diretamente relacionado com a produtividade e rendimento deste ciclo, sendo necessário uma correta contextualização e dimensionamento do processo, recorrendo à escolha mais adequada dos equipamentos, e tendo em conta o crescimento e desenvolvimento da exploração na sua vida útil expectável.

A etapa de carga e transporte é subdividida em duas tarefas: carga, no qual o material proveniente do desmonte é carregado por uma unidade escavo-carregadora para um equipamento de transporte, e posterior transporte até local de descarga, instalação de britagem.

2.3.1. Unidades Escavo-Carregadoras

As unidades escavo-carregadoras são unidades que exercem as atividades de escavação e carregamento do material proveniente do desmonte sobre unidades transportadoras, que movimentam o mesmo até a central de britagem.

Estas unidades apresentam diversos equipamentos capazes de executar este exercício, sendo as mesmas caracterizadas por categoria de função aplicada, a qual em explorações a céu aberto de maciços rochosos, o equipamento mais aconselhável para exercer as funções de escavo-carregamento são os equipamentos denominados escavadoras.

Podemos definir Escavadora como máquina que trabalha estacionada, e pode ser montada em rasto contínuo ou sobre pneus (Spinola, 2000). No caso do equipamento escavador encontrar-se montado sobre pneus e devido a instabilidade e aos esforços prestados sobre eles, estes equipamentos apresentam apoios assentes ao terreno e mantém o equipamento imóvel, em posição elevada. Relativamente ao dispositivo de carga, estes podem ser agrupados em dois conjuntos: lança (lança com pá frontal ou “shovel”, retroescavadora, lança com caçamba de arrasto ou “dragline”, lança com balde de garras ou “Clamshell”) ou balde.

2.3.1.1. Retroescavadora/"Giratória"

Este tipo de equipamentos supracitado apresenta duas partes distintas: infra-estrutura e superestrutura. A infra-estrutura refere-se ao chassis, sustentado nos rastos, no qual apoia a estrutura móvel. A estrutura móvel apresenta um mecanismo giratório de 360º em torno do eixo vertical, apoiado num círculo ou coroa de giro, dentada exterior ou interiormente, sobre o qual corre uma engrenagem acionadora do tipo pinhão, ligada por uma transmissão ao eixo motriz (Spínola, 2000). Em termos de sistema de carregamento, este equipamento apresenta uma lança acoplada a um braço articulado, presente no extremo do balde dentado virado para baixo, sendo o sentido de carga executado de cima para baixo, e deslocando a máquina para trás consoante o material é carregado e a escavação vai prosseguindo.



Figura 25-Escavadora de rastos Komatsu PC 450LC-6.

Com intuito de otimizar a atividade de carregamento, relativamente ao tempo de ciclo operado pelo equipamento, este deve ser calculado tendo em conta o desenvolvimento da exploração, e considerando aspetos como:

- Tempo de posicionamento;
- Tempo de carga (balde);
- Tempo de manobra do equipamento e enquadramento com o veículo de transporte;
- Tempo de descarga (por balde).

As especificações do equipamento Komatsu PC 450LC-6 encontram-se presentes nos anexos (CD) deste estudo.

Para controlo de produção/trabalho deste equipamento, foi elaborado folha de registo, o qual teria como objetos de análise o tempo efetivo de trabalho (HN), subdividido pelos diversos trabalhos

elaborados (carregar dumper para primário, carregar dumper para taqueio, escavar, etc.), horas à disposição da máquina (HD), bem como horas de avaria (HI) (Figura 26).



CENTRO PRODUÇÃO DE FORNELO							
FICHA REGISTO CARGA - GIRATÓRIA							
DATA	HD	HI	HN				
			CARREGAR DUMPER		ESCAVAR SEPARAR PEDRA FAZER PLATAFORMA	TAQUEIO	OBSERVAÇÕES
			PRIMÁRIO	TAQUEIO			

Figura 26-Ficha registo do equipamento Giratória.

2.3.2. Unidade de Transporte

As unidades de transporte são utilizadas quando as distâncias a percorrer são de tal modo grande que devemos optar por equipamentos mais rápidos, de baixo custo e de maior produção, ainda que à custa do emprego de um maior número de unidades (Spínola, 2000). Nas explorações a céu aberto, o material é transportado usualmente com unidades do tipo *dumper*, telas transportadoras e sobre carris (método presentemente pouco usado). No caso das pedreiras, e tendo em consideração o processo produtivo e o desenvolvimento sequencial das operações, o transporte desde a frente de desmonte até à unidade de processamento é efetuado por *dumpers*.

2.3.2.1. Dumpers

Os *dumpers* são equipamentos semelhantes aos camiões de estrada, com maior envergadura e algumas diferenças de estrutura. Estes equipamentos apresentam grande capacidade, maior manobrabilidade e rendimentos, sendo estes equipamentos os mais aconselháveis às funções de transporte desempenhadas em pedreiras. Relativamente à sua constituição, este equipamento apresenta-se montado sobre pneus, apresentando na parte posterior do veículo o posto de condutor, o motor, e a balança de carga de material a transportar. Este tipo de equipamentos devido à sua fisionomia, requerem menor espaço de manobra, aspeto importante e de realçar no enquadramento técnico-produtivo inserido (Figura 27).



Figura 27-Dumper Euclid R32.

Os *Dumpers* apresentam maior produtividade e rentabilidade no processo produtivo, com menores custos associados, sendo importante a sua otimização, englobando características inerentes ao equipamento (tempos de fixos), características da instalação de britagem e o próprio desenvolvimento da exploração, sendo considerados os seguintes aspetos:

- Produção da instalação;
- Percurso, características do mesmo e tempo de viagem desde a frente de desmonte até ao local de descarga (tolva de alimentação do britador primário) - vice-versa;
- Tempo de posicionamento na zona de carga e descarga;
- Tempo de carregamento;
- Manobras a executar e sua duração;
- Dimensão máxima ($D_{máx}$) de material a transportar.

Tendo como objetivo o controlo de produção deste equipamento, foi elaborado uma folha de registo, o qual teria como objetos de análise o tempo de trabalho (HN), subdividido pelos diversos trabalhos elaborados (transporte de material para primário, taqueio e *stock*), horas à disposição da máquina (HD), bem como horas de avaria (HI) (Figura 28).

CENTRO DE PRODUÇÃO DE FORNELO								
FICHA REGISTO DE TRANSPORTE - DUMPER								
DATA	KM FINAL	HD	HI	HN			OBSERVAÇÕES	
					PRIMÁRIO	TAQUEIO		STOCK
				CARGAS				
				HORAS				
				CARGAS				
				HORAS				
				CARGAS				
				HORAS				
				CARGAS				
				HORAS				
				CARGAS				
				HORAS				

Figura 28-Ficha de registo: unidade de transporte *Dumper*.

2.4. Fragmentação e Classificação

A britagem é o processo subsequente ao desmonte de maciço rochoso e é considerado o processo responsável pela fragmentação do material rocha tendo como principal finalidade valorização económica do georrecurso disponível.

O processo de fragmentação e classificação considera os processos supracitados, com finalidade comercial, e encontra-se subdividido em etapas sequenciais, proporcionadas por equipamentos diferenciados em que o método utilizado é o de fragmentação sucedendo-se a crivagem/classificação (através de britadores e crivos vibratórios, respetivamente), culminando na produção de *stock* de material de diferentes granulometrias (produtos finais comercializáveis).

2.4.1. Fragmentação

No processo de britagem, a etapa de fragmentação propriamente dita, é que reduz a granulometria do material proveniente do desmonte (inicialmente) e/ou pelas sucessivas sequências de crivagem/classificação. A figura 29 apresenta esquematicamente a sucessão de diminuição de granulometrias tendo em atenção os seus processos de obtenção (Fernandes, 2006).

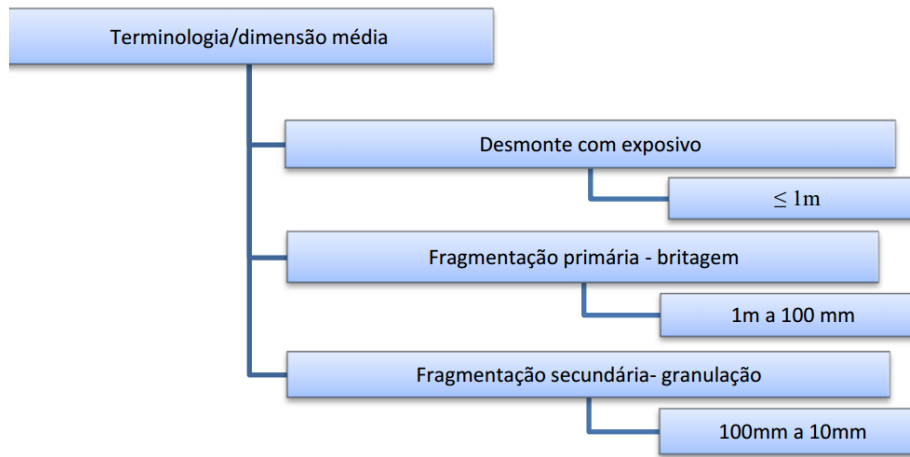


Figura 29-Relação de redução expectável por etapa de fragmentação (Fernandes, 2006).

Assim, o material proveniente do desmonte apresenta uma granulometria expectável com dimensões superiores a 1m, enquanto nos processos que se sucedem, esta granulometria vai diminuindo, numa primeira fase com uma fragmentação primária obtendo material rochoso com dimensões de 1m a 100mm, e num processo posterior, fragmentação secundária, rocha com granulometria entre 100 e 10mm.

2.4.2. Fatores que influenciam a fragmentação

2.4.2.1. Tempo de residência

O tempo de residência num equipamento de fragmentação é o tempo que determinado material rochoso permanece dentro do mesmo, estando sujeito às ações das suas peças e instrumentos fragmentadores.

O fragmentador primário é um equipamento que transforma a energia introduzida por unidade de tempo no movimento das peças fragmentadoras. A eficiência da fragmentação vai depender da forma como essa energia é transformada em energia de fragmentação (Sampaio, 2006).

Neste tipo de fragmentadores, os mesmos distinguem-se em dois tipos: graúdos e finos; os primeiros apresentam dependência do caudal de alimentação em relação ao tempo de residência; no caso dos fragmentadores finos o tempo de residência depende do caudal de alimentação.

Contrapondo os dois fragmentadores supracitados, as principais diferenças são:

- A. O resultado de fragmentação adquirido pelos fragmentadores graúdos é caracterizado pela geometria e dimensão do equipamento de fragmentação. Relativamente aos fragmentadores finos, este resultado não apresenta dependência relativamente a estrutura do moinho de fragmentação;

- B. A fragmentação nos fragmentadores graúdos proporciona pouca interação das partículas umas com as outras. Nos fragmentadores finos a fragmentação realiza-se com o movimento de fragmentação do moinho, e também pela interação das partículas;
- C. Nos fragmentadores graúdos o caudal de passagem é independente do caudal de alimentação.

2.4.2.2. Relação de redução

A relação de redução de um equipamento de fragmentação é apresentada pelo seu trabalho de fragmentação, parâmetro avaliado pela granulometria proveniente do desmorte (alimentação) e granulometria final (Fernandes, 2006).

O valor da relação de redução de um fragmentador é caracterizado pelos calibres médios dos materiais produzidos, pois é difícil atribuir uma relação direta entre as distribuições granulométricas de entrada e saída, respetivamente. Outro aspeto importante a ter em conta nesta análise é a regulação a que o fragmentador está sujeito aquando da análise da relação de redução apresentada. Este aspeto pode ser alterado sempre que se altera a variação da regulação ou a variação do calibre de entrada (Sampaio, 2006).

O Quadro 16 apresenta algumas relações de redução de alguns equipamentos, no qual é possível observar que, como referido anteriormente, os fragmentadores graúdos apresentam limitações em termos de “manobrabilidade” em questões de alteração da sua relação de redução, proporcionando menor eficiência no processo em causa.

Quadro 16-Relação de redução de diferentes equipamentos de fragmentação.

Equipamentos de fragmentação	Relação de redução
Britador giratório	5:1 a 8:1
Britador de maxilas	4:1 a 6:1
Granulador giratório	6:1 a 12:1
Granulador de rolos	4:1 máximo
Moinhos de barras	30:1 a 100:1
Moinho de bolas	30:1 a 500:1

2.4.3. Fragmentadores primários

O processo de produção e valorização industrial do material rochoso e o processo de fragmentação propriamente dito, é primeiramente executado por um fragmentador primário. Este equipamento, é o primeiro fragmentador a receber material proveniente do desmorte, o qual deverá assegurar uma

boa fragmentação, promovendo e possibilitando a utilização desse material diretamente no referido equipamento, obtendo-se assim os calibres desejados e que correspondem a uma otimização técnica e económica, diminuindo a percentagem de blocos de grande dimensão que originem encravamentos, situação esta prejudicial no processo industrial visto causar pausas de produção, danos no equipamento de fragmentação e constrangimentos na libertação desse material, causando desta forma custos de produção desnecessários.

O fragmentador primário em questão é um **SVEDALA JM1211 HD** (Figura 30).



Figura 30-Fragmentador primário SVEDALA JM 1211 HD.

Tendo como objetivo o controlo de produção deste equipamento, foi elaborado uma folha de registo, o qual teria como objetos de análise o tempo de trabalho (HN), horas à disposição da máquina (HD), bem como horas de avaria (HI) (Figura 31).



CENTRO DE PRODUÇÃO DE FORNELO										
FICHA REGISTO PRIMÁRIO										
DATA	TIPO PEDRA	CARGAS AO PRIMÁRIO			HORAS					OBSERVAÇÕES
		CONTAGEM	Nº CARGAS	HP	HN	HM	HI	HD		
	AZUL									
	AMARELA									
	AZUL									
	AMARELA									
	AZUL									
	AMARELA									
	AZUL									
	AMARELA									
	AZUL									
	AMARELA									

2.4.4. Software utilizado – Análise fragmentação

Relativamente ao *software* utilizado na análise da granulometria resultado dos desmontes realizados, a escolha recaiu no *software WipFrag 2.4*, o qual é descrito seguidamente.

2.4.4.1. WipFrag 2.4

WipFrag é um *software* de análise de imagem/fotografia através da qual é possível dimensionar-se a granulometria de um “produto”, como é o caso de materiais provenientes de desmonte de rocha (Palangio, 1985; Palangio et al., 1985).

Este tipo de *software* utiliza algoritmos para identificar blocos individuais, e criando um esboço de “rede/malha”, através de reconhecimento/deteção da orla de cada bloco identificado. Este *software* permite também que o utilizador interaja com o mesmo, intervenção manual, podendo o mesmo tornar-se mais fidedigno.

Este *software* analisa a imagem em 2-D, e posteriormente reconstrói numa disposição 3-D usando princípios de probabilidade geométrica (Maerz, 1996).

CAPÍTULO 3 – CASO DE ESTUDO

3. Caso de Estudo

Tal como foi dito anteriormente, o presente trabalho tem como principal objetivo o estudo da interação da orientação da frente de bancada com o contexto geológico-geotécnico do maciço rochoso presente no local, no qual se elaborou o estudo em pormenor de uma pega de desmonte (em contexto diferente ao habitualmente aplicado), sendo os resultados obtidos confrontados com o histórico existente.

Neste capítulo é abordado todo o estudo prático realizado na pedreira de Fornelo, Vila do Conde, iniciando-se com a recolha de dados de campo referentes à caracterização geológica, sendo caracterizado o painel corresponde à frente livre do maciço rochoso presente, bem como todo o processo de desmonte, desde a definição do diagrama de fogo, marcação e perfuração, e por fim detonação e produto final obtido; e as operações de carga e transporte e britagem primária.

Na fase de estudo considerou-se a situação operacional de desmonte diferenciada ao histórico existente. Nesta análise incidu-se nos principais aspetos que diretamente influenciam o resultado final (granulometria do desmonte), evidenciando particularmente a interação entre a frente de bancada e a contexto geológico-geotécnico local, considerando os principais problemas decorrentes do mesmo, desvios de perfuração proporcionados, análise do nível de vibrações decorrentes da detonação, e análise da curva granulométrica resultante, permitindo conhecer a percentagem de fragmentos com dimensão inferior a 250 milímetros, perspetivando uma curva granulométrica o mais homogênea e mais operacional possível, diminuindo a quantidade de finos produzidos (conseguindo removê-los da fase de fragmentação primária), minimizando assim o excesso de britagem e melhorando a sua eficiência energética, bem como a criação de menor quantidade de grandes blocos, com necessidade de fragmentação mecânica através de utilização de martelo hidráulico.

Em complementaridade, foi ainda abordada a produtividade dos vários equipamentos envolvidos, como escavadora de rastos e *dumper*, onde se destacam os tempos de ciclo nos diferentes equipamentos; fragmentador primário onde se destaca os tempos/horas de trabalho, horas em que o equipamento esteve parado e os tempos de encravamento, aspeto que permitirá posteriormente elaborar a análise económica da metodologia implementada.

3.1. Pedreira Forno

3.1.1. Localização e Acessos

A pedreira de Vila Verde localiza-se no distrito do Porto, concelho de Vila do Conde, freguesia de Forno (é de destacar que a área da referida pedreira encontra-se ladeada a SE pelo limite do concelho de Vila do Conde com a Trofa) (Figura 32).

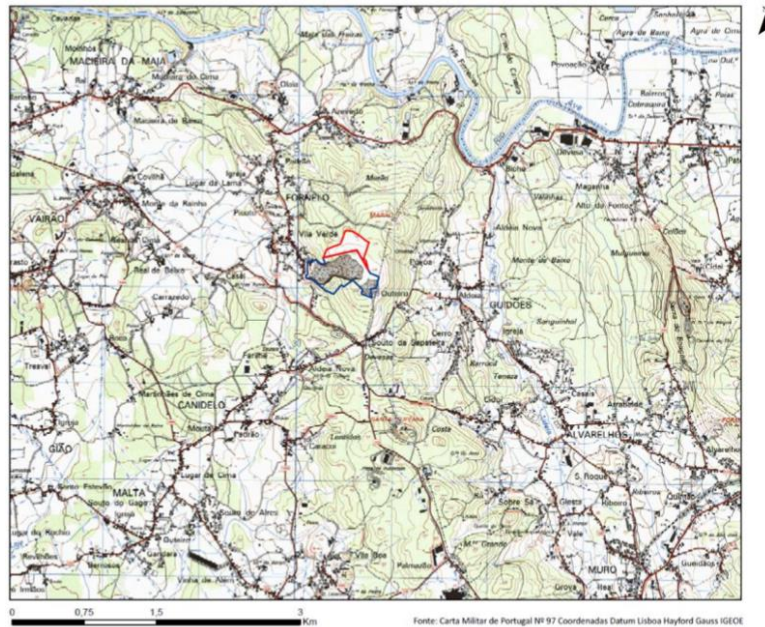


Figura 32-Extracto da Carta Militar nº 97 com a localização da pedreira de Vila Verde (Fonte: IGeoE).

O acesso à pedreira realiza-se por um desvio na EM534 a cerca de 330 m do cruzamento com a entrada Vairão – Porto, a cerca de 10 km de Vila do Conde.

O acesso à pedreira é facilitado pela proximidade da auto-estrada A8, estrada N13, ou mesmo à estrada N104, o que torna a mesma muito bem localizada, e de rápido e fácil acesso (Figura 33).

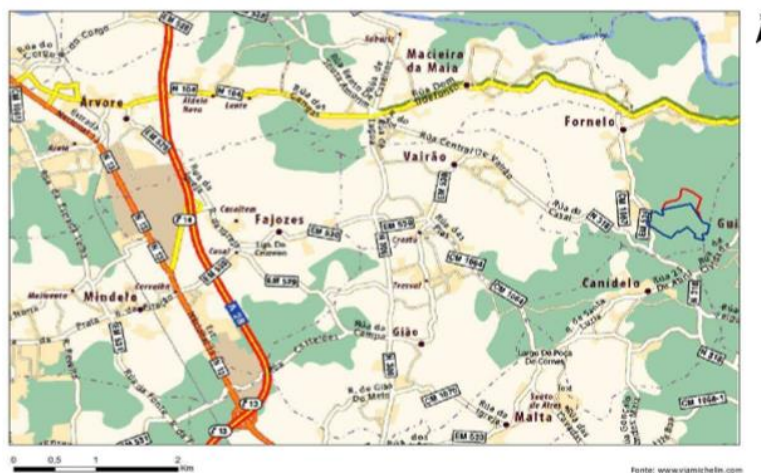


Figura 33-Vias de comunicação e acessos à pedreira "Vila Verde" (informação recolhida em www.viamichelin.com).

3.1.2. Caracterização geológica

3.1.2.1. Geologia Regional

A região em estudo localiza-se predominantemente em terrenos de rochas eruptivas, num afloramento granítico alcalino (Granito da Póvoa do Varzim) (Figura 34). Do ponto de vista geotectónico insere-se na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico (Pereira et al., 1989; Dias et al., 2000).

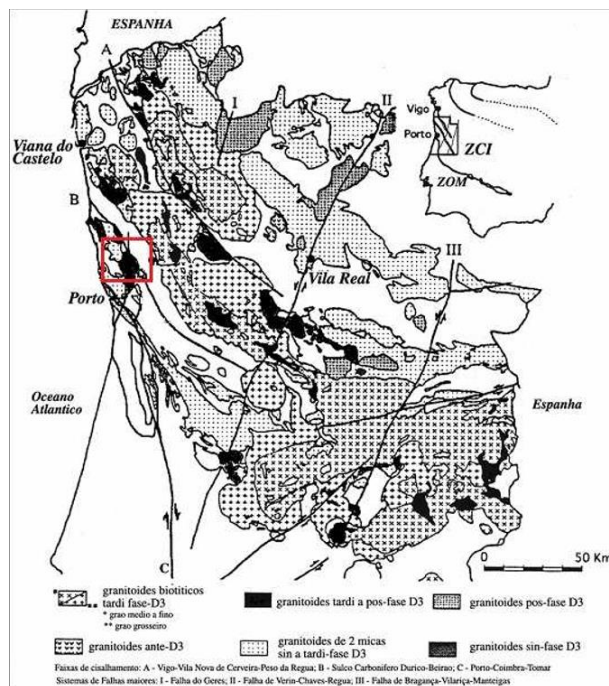


Figura 34-Enquadramento geotectónico regional dos granitos Variscos da zona Centro-Ibérica (ZCI), bem como a visualização das principais faixas de cisalhamento e sistemas de falhas regionais do NW de Portugal (adaptado de Dias et al., 2000).

Segundo a metodização das rochas graníticas da ZCI de Ferreira et al. (1987), apoiada na intensidade da deformação conferida nas suas texturas e no enquadramento geodinâmico, a organização espacial destes granitoides está relacionada com os megacisalhamentos dúcteis da ZCI (i.e., a ocidente do megacisalhamento de Vigo – Vila Nova de Cerveira – Peso da Régua, e a oriente do ; Ferreira et al., 1987; Dias et al., 2000).

3.1.2.2. Geologia Local

Em termos geológicos, o maciço intrusivo é composto pela fácies de granito porfiróide de grão grosseiro, nomeadamente biotítico de grão médio ou grosseiro (Medeiros et al., 1980).

Na pedreira, o granito apresenta evidências de alteração que compreende a existência de um padrão esquelético de terra vegetal e padrão de saibro granítico, esbranquiçado com espessura variável em função do tipo de transição para a rocha sã. Por último existe um horizonte de rocha sã constituída por blocos graníticos intactos (Figura 35).

Trata-se de um maciço de grão médio a grosseiro, onde os minerais constituintes do granito, o feldspato potássico, a plagioclase e o quartzo, surgem sem evidenciarem qualquer simetria à vista desarmada. São visíveis cristais de biotite, e por vezes surgem raros megacristais, em geral com contornos arredondados, de feldspato potássico.

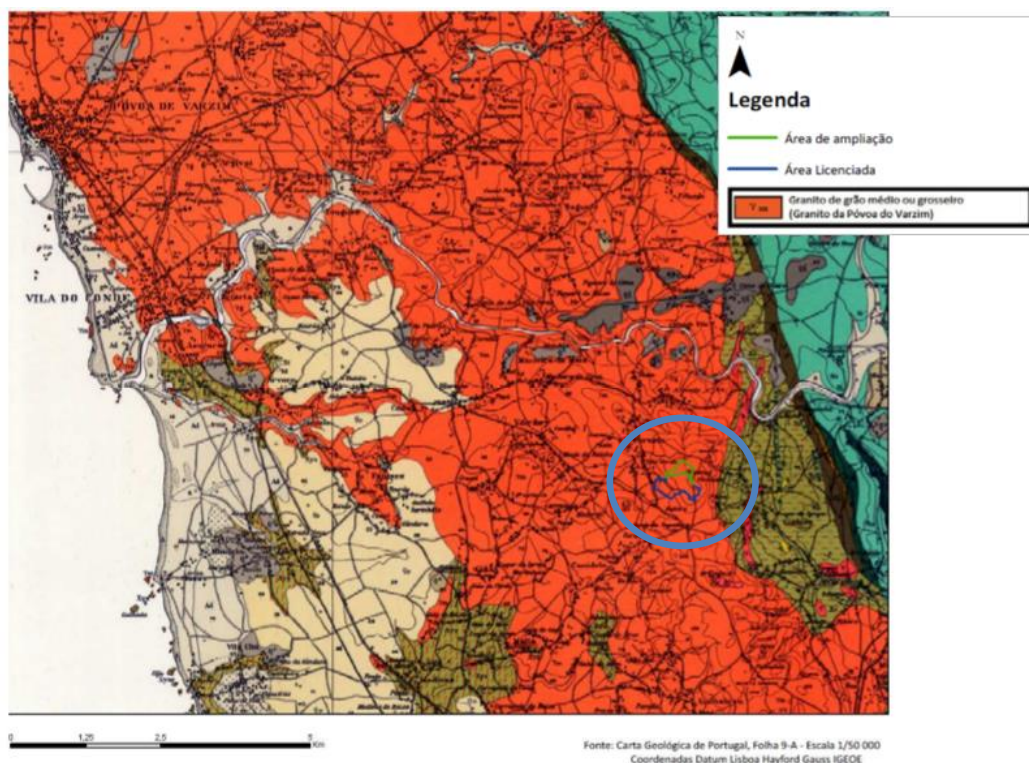


Figura 35-Enquadramento geológico regional da área com a localização da pedreira (excerto carta Geológica de Portugal, Folha 9-A IGEoE).

3.2. Materiais e Métodos utilizados

O presente estudo, teve como base os procedimentos, normas e terminologias utilizados na realização dos estudos geológico-geotécnicos de maciços rochosos, destacando:

- Técnicas e métodos propostos pelo ISRM (1978), GSE (1995), Ferrer & González de Vallejo (1999);
- “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 discontinuidades do maciço (e.g., ISRM, 1981; Chaminé & Gaspar, 1995; Dinis da Gama, 1995).

Inicialmente e tendo como objetivo o estudo da compartimentação do maciço rochoso presente, recorreu-se à técnica de amostragem linear (ISRM, 1978,1981; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004). Foram cartografadas as discontinuidades presentes no painel exposto (diaclasses, falhas, estruturas filonianas), sendo registados esses dados na ficha de levantamento geológico-geotécnico (CD), desenvolvida por Ramos (2008) e Fonseca (2008), e seguindo os parâmetros

geológico-geotécnicos propostos pela ISRM (1981). Os principais parâmetros caracterizados no respetivo levantamento de campo foram, entre outros, a atitude das diversas descontinuidades, a abertura, o espaçamento (“Fracture Intercept”), continuidade, tipo de enchimento, rugosidade e presença de água no maciço rochoso. Na compilação dos dados em forma digital, foi utilizada a base de dados *ScanGeoData*|BGD, desenvolvida por Ramos (2008) e Fonseca (2008).

Na definição das principais famílias de descontinuidades, foi utilizado o *software Dips* (versão 5.1 da *RocScience*), onde foi possível definir, através da elaboração de diagramas geológico-estruturais – diagrama de contorno estrutural e diagrama de rosetas, a definição das famílias e sua representatividade. De referir que o *software* está licenciado, para fins académicos, ao cuidado do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (Labcarga) do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Foi realizado o ensaio *Boretrak* e ensaio *Laser*, tendo sido estes ensaios executados pela Empresa Orica.

A partir do ensaio *Boretrak* foi possível verificar e medir os desvios de perfuração. Estes dados foram caracterizados através de um *software* que a empresa Orica detinha, onde foi possível analisar graficamente o estado da furação.

Através do ensaio *Laser* foi possível obter com elevada precisão a regularidade da frente da bancada, para posteriormente definição da distância à frente mais adequada em cada situação (mais concretamente na primeira fiada de furos e assim sucessivamente).

Em termos de *software* informático, foi-nos disponibilizado pela empresa Mota-Engil o programa *WipFrag 2.4*, através do qual é possível dimensionar-se a granulometria de materiais provenientes de desmonte de rocha com auxílio de fotografia.

3.3. Maciço Rochoso

Os dados apresentados e referentes aos parâmetros geológico-geotécnicos do maciço rochoso (Figura 36), são resultantes do levantamento de campo, composto por 112 descontinuidades, medidas na única face exposta do maciço rochoso, o qual apresentava extensão de 78 metros (Figura 36).



Figura 36-Frente livre do maciço rochoso.

3.3.1. Maciço aflorante

O maciço rochoso do local de exploração, apresenta-se bastante fraturado, e passível de alguma alteração. O material rocha presente é maioritariamente granito “azul” (granito são), apresentando em pequenos pontos e bem identificados, cor amarelada/ferruginosa devido a alguma alteração, sendo mais “sensíveis” as zonas de circulação e percolação de água (superficial ou infiltrada) e zonas de esmagamento (cisalhamento, caixa de falha, etc.) (Figura 37).



Figura 37-Frente livre do maciço rochoso.

Como foi referido anteriormente, o maciço em estudo é muito compartimentado (Figura 38), apresentando grande fracturação em toda a sua extensão e evidenciando duas principais famílias de descontinuidades, com as atitudes compreendidas N 20-39° E e N 105-124° E.



Figura 38 - Blocometria presente.

3.3.2. Caracterização geológico-geotécnica

O painel sobre o qual incidiu este projeto tinha a extensão de 78 metros e resultou de anterior local de extração, apresentando maciço de ótima qualidade para os fins a que se destinava. A bancada a analisar localiza-se num espaço central da exploração, local esse que tinha a particularidade de estar a ser desenvolvido em profundidade (o topo da bancada onde foi efetuada a furação, teria localização teórica de cota 0, proporcionando extração em profundidade). O estudo incidiu nesta bancada, que apresentava orientação N 10-15° E, procedendo-se a toda caracterização geológico-geotécnica.

Os dados recolhidos no terreno, referentes às 112 descontinuidades identificadas no painel, através da aplicação da técnica de amostragem linear, foram tratados posteriormente em escritório, determinando os parâmetros que caracterizo de seguida:

➤ Tipo de descontinuidade

O maciço rochoso da pedreira de Fornelo, apresenta na totalidade das descontinuidades identificadas a classificação de diáclase.

➤ Grau de alteração

Estamos na presença de um maciço rochoso que está a ser explorado ao longo dos últimos anos no âmbito industrial para produção de agregados, apresentando a zona identificada para o estudo,

maciço de boa qualidade e que permite bons resultados para os fins a que se destina (valorização do material rocha com a produção de agregados).

Na sua generalidade, o maciço rochoso classifica-se como maciço são a ligeiramente alterado (W1-2, 91%), apresentando um reduzido número de descontinuidades moderadamente alteradas (W3, 9%).

Devido ao baixo grau de alteração, o material rocha presente apresenta na sua globalidade tonalidade “cinzenta-azulada” (Figura 39).



Figura 39- Maciço rochoso cinza azulado da pedreira de Fornelo.

Em termos de análise do grau de alteração das principais famílias identificadas, não se verificam alterações significativas, sendo na sua globalidade a predominância de maciço são a ligeiramente alterado (W1-2), Gráfico 1.

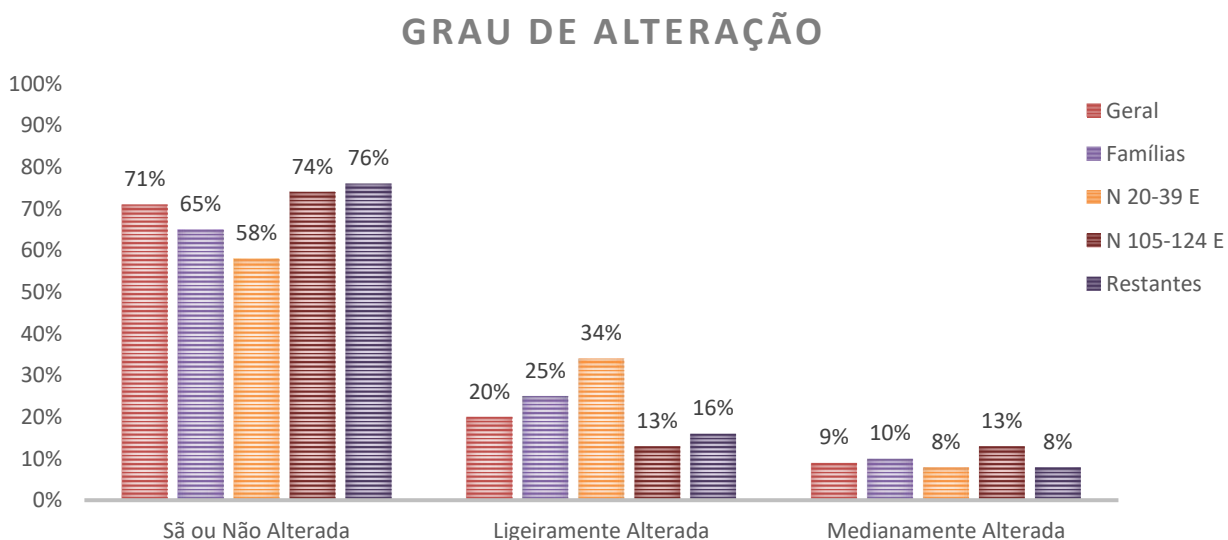


Gráfico 1-Grau de alteração das descontinuidades em geral, por família e restantes.

➤ Estado de fracturação

Os dados recolhidos no terreno, referentes às descontinuidades identificadas na superfície exposta do maciço rochoso, foram tratados do ponto de vista da sua orientação espacial, posteriormente analisadas em estereogramas (diagramas de contorno estrutural) e diagramas de rosetas, os quais permitiram a definição do número e atitude das famílias dominantes, espaçamentos e persistência.

Analisando os diagramas geológico-estruturais que caracterizam o maciço rochoso em estudo, podemos verificar que as descontinuidades predominantes concentram-se em duas principais famílias (figura 40): com maior representação (23%) a família caracterizada pela conjunto de descontinuidades compreendidas pelas atitudes N 20-39° E, com inclinações que oscilam entre 65-90°, com maior incidência no quadrante SE, e a família referente ao conjunto de descontinuidades compreendidas nas atitudes N 105-124°E (21%), com oscilações que entre 55-90° para o quadrante SW.

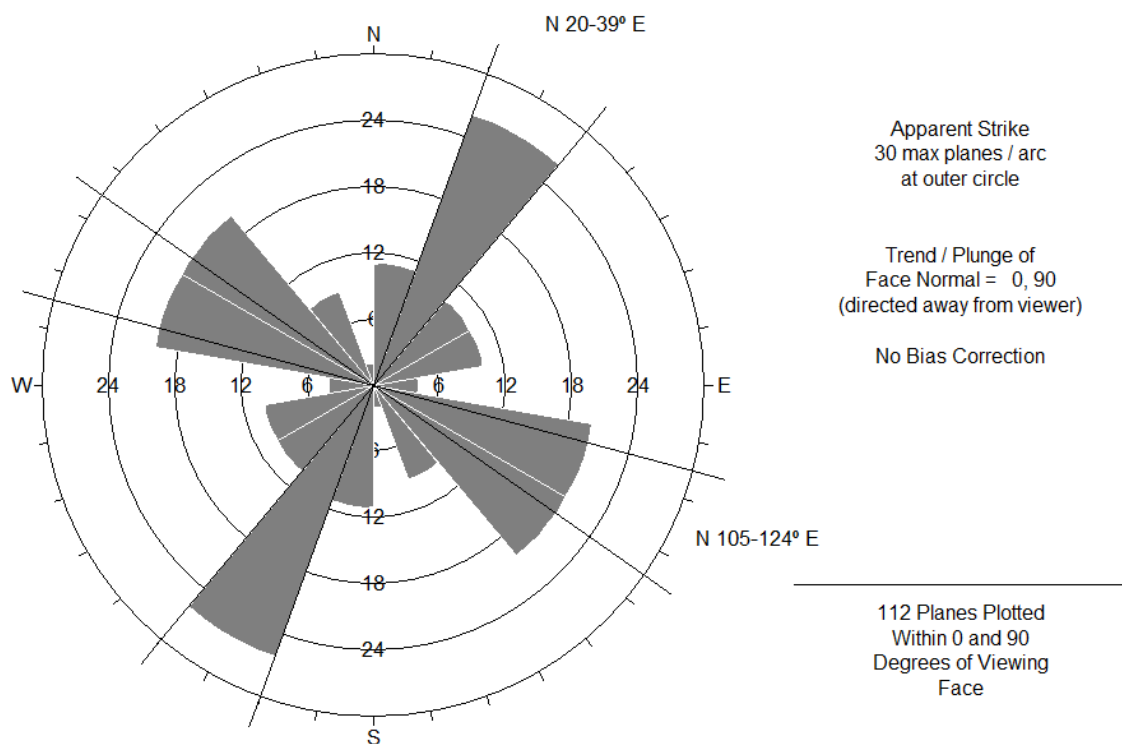


Figura 40-Diagrama de rosetas geral da Pedreira de Fornelo (Vila do Conde), com representatividade de 112 descontinuidades projetadas em intervalos de 20° de amplitude (retirado do *software dips*).

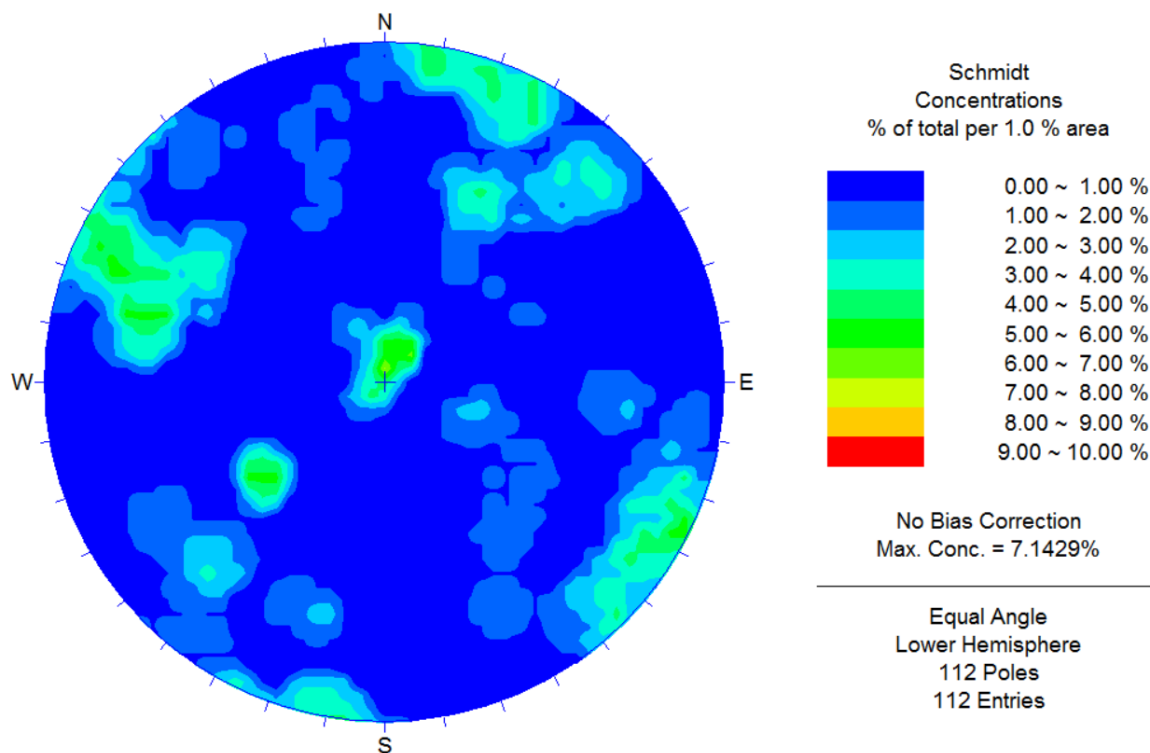


Figura 41-Diagrama de contorno estrutural (estereograma) relativo ao levantamento de 112 descontinuidades presente no painel em estudo da pedra de Fornelo/Vila do Conde (retirado do *software dips*).

Na análise efetuada das descontinuidades na distribuição do diagrama de rosetas, a distribuição efetuada apresenta intervalo de 20°. Para dissipar qualquer dúvida acerca da fiabilidade da distribuição implementada, verificou-se para cada conjunto de pétalas (de amplitude de 20°) todos os intervalos admissíveis, de forma a garantir que a distribuição adotada permitia obter as principais famílias presentes no maciço, e que contivesse o maior número de descontinuidades possível.

➤ Espaçamento

A análise do grau de fracturação geral permitiu identificar a intensidade de fracturação presente, segundo os critérios ISRM (1978, 1981, 2007), segundo divisão de 5 classes definidas, com maior representatividade (39%) de descontinuidades próximas (F4), com espaçamento médio de 18 a 22 cm (Gráfico 2). Os restantes valores de fracturação contabilizados, apresentam percentagem considerável nas classes medianamente afastadas (F3) e muito próximas (F5), com 26 e 27% respetivamente. A classe “afastadas” apresenta menor representatividade que as restantes, apresentando apenas 9 descontinuidades, com percentagem total de 8%.

Relativamente ao espaçamento presente nas principais famílias, estas apresentam resultados específicos: no caso da família N 20-39° E, esta apresenta bastante distribuída, com maior representatividade de descontinuidades “próximas” (46%, 12 descontinuidades), “muito próximas” (27%, 7 descontinuidades) e “medianamente afastadas” (23%, 6 descontinuidades); a restante percentagem encontra-se expressa pela classe “afastadas” com 4%; a segunda família (N 105-124° E), apresenta maior representatividade de descontinuidades “medianamente afastadas” (39%, 9 descontinuidades) e “muito próximas” (35%, 8 descontinuidades), apresentando valores consideráveis nas classes “afastadas” e “próximas”, com valor de 13%.

GRAU DE FRACTURAÇÃO

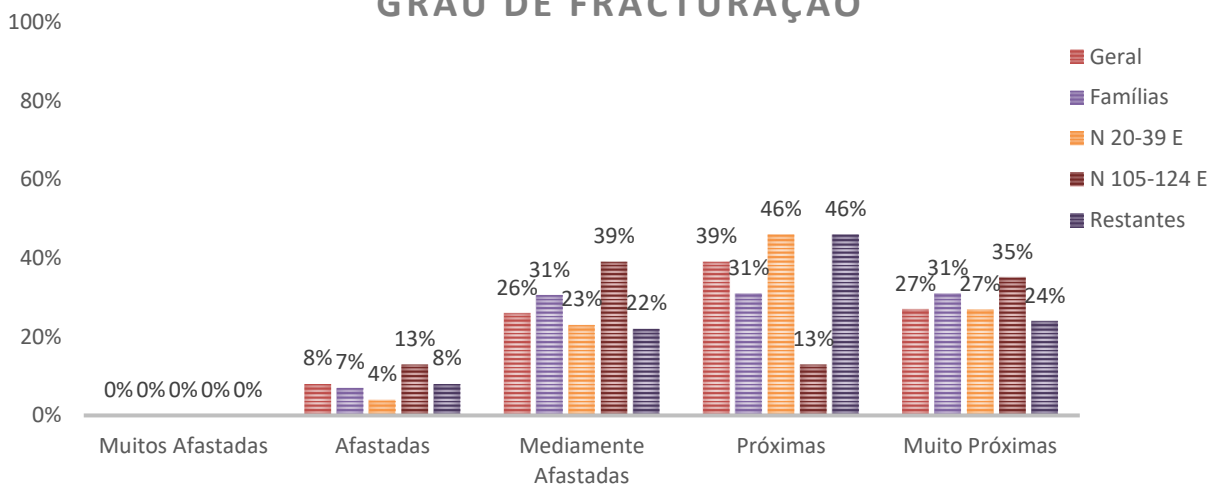


Gráfico 2-Espaçamento das principais famílias e aspeto geral.

➤ Abertura

Relativamente à abertura das descontinuidades, cerca de 65% das descontinuidades classificam-se como fechadas, estando os restantes 35% distribuídos por descontinuidades abertas e muito abertas, 27% e 8% respetivamente, segundo a classificação ISRM (1978, 1981, 2007).

As classes “Fechada”, “Aberta” e “Muito Aberta” estão subdivididas em três subclasses, que permitem um maior grau de pormenorização desta análise. Considerando os dados recolhidos em campo, podemos constatar, através da distribuição gráfica dos mesmos, que a abertura média global é de 3,6 cm. Analisando o grau de abertura das principais famílias, o valor de abertura da família 1 (N 20-39° N) surge abaixo desse valor (2,3 cm); no entanto o valor de abertura da família 2 (N 105-124° E), é de 5,7 cm. Relativamente ao valor global das descontinuidades que não apresentam representatividade nas famílias predominantes, este aproxima-se do valor geral registado (3,4 cm respetivamente). No Gráfico 3 pode-se visualizar a análise da abertura geral das descontinuidades e das duas principais famílias.

ABERTURA

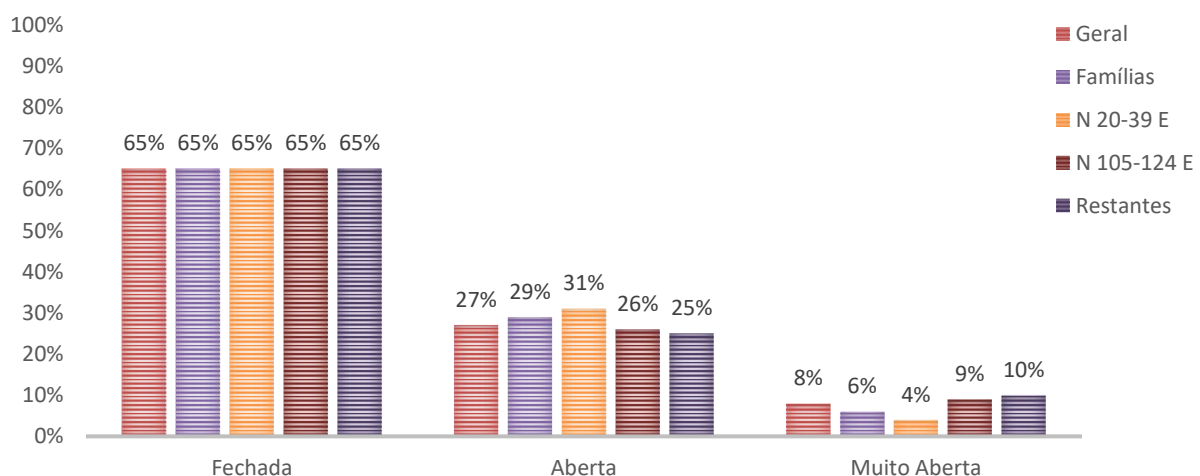


Gráfico 3-Análise da abertura média das descontinuidades.

➤ Tipo de Enchimento

Cerca de 65% das descontinuidades não apresenta qualquer tipo de preenchimento; os preenchimentos do tipo “rocha esmagada/outros” apresentam a restante percentagem de enchimento das descontinuidades (35%). Os tipos de preenchimentos das diferentes famílias apresentam resultados globais próximos aos identificados na globalidade da análise, e expressos no Gráfico 4.

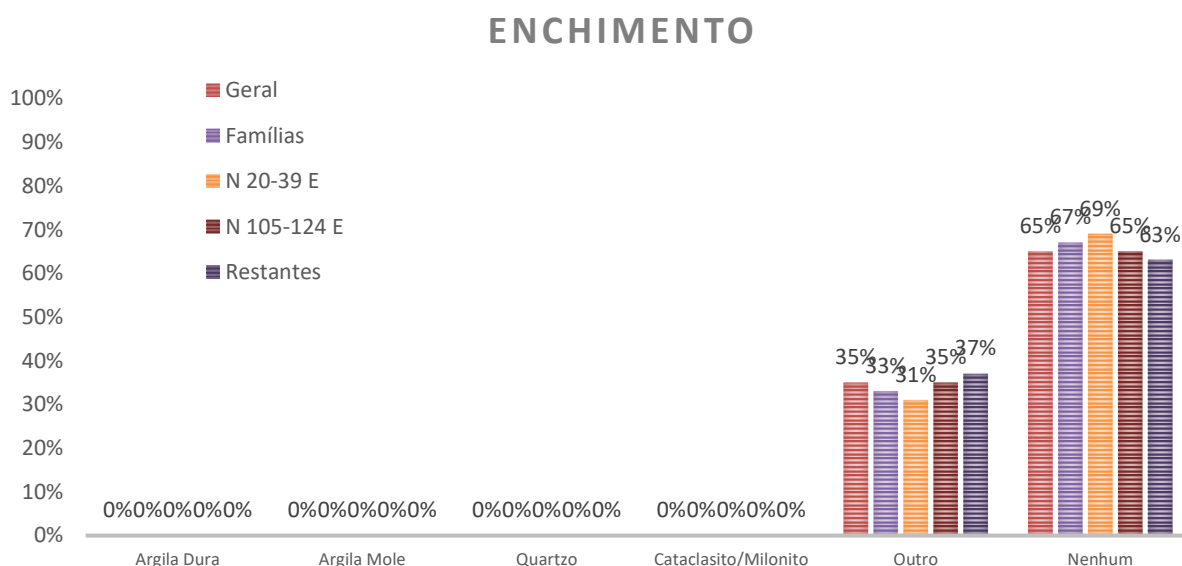


Gráfico 4-Tipo de preenchimento presente nas descontinuidades - análise dos tipos de enchimento das descontinuidades na generalidade, e em particular de cada família.

➤ Rugosidade

Relativamente à rugosidade das descontinuidades, o maciço em estudo apresenta rugosidade ondulada a plana, com distribuição de 44% e 41% respetivamente. Em termos de descontinuidades do estilo denteado, este aparece minoritariamente, de valor 15%.

As três classes que definem a rugosidade de uma descontinuidade, podem subdividir-se em três subclasses cada. No maciço da pedreira de Fornelo em estudo, dentro da classe ondulada destaca-se a subclasse rugosa, R₃ (apresentando 40% de 42% na totalidade), enquanto que na classe plana, a subclasse representada é lisa a algo rugosa, R₁₋₂, definindo a totalidade desta classe (43%). O Gráfico 5 apresenta a distribuição dos tipos de rugosidade das descontinuidades, no global e particular de cada família.

RUGOSIDADE

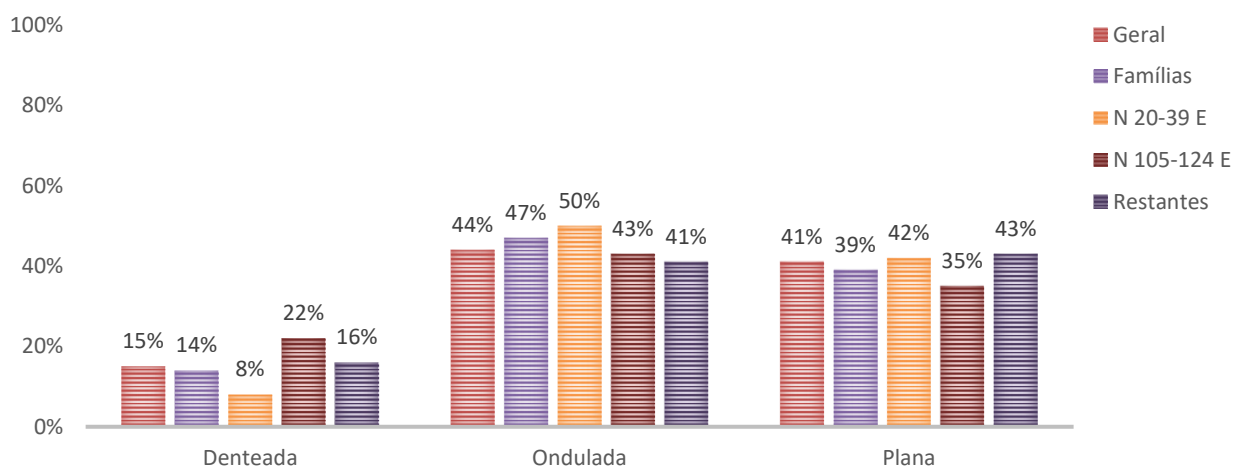


Gráfico 5-Tipo de rugosidade do maciço rochoso de Forno.

➤ Continuidade

Em termos de continuidade das descontinuidades recolhidas e analisadas do painel exposto do maciço rochoso, elas são na sua maioria “muito pouco contínuas” (80%), enquanto a restante percentagem distribui-se pelas classes “pouco contínua” e “medianamente contínua”, com 15% e 5% respetivamente.

O Gráfico 6 apresenta a distribuição da continuidade pelas 5 classes existentes, estando caracterizadas as principais famílias e a globalidade do levantamento.

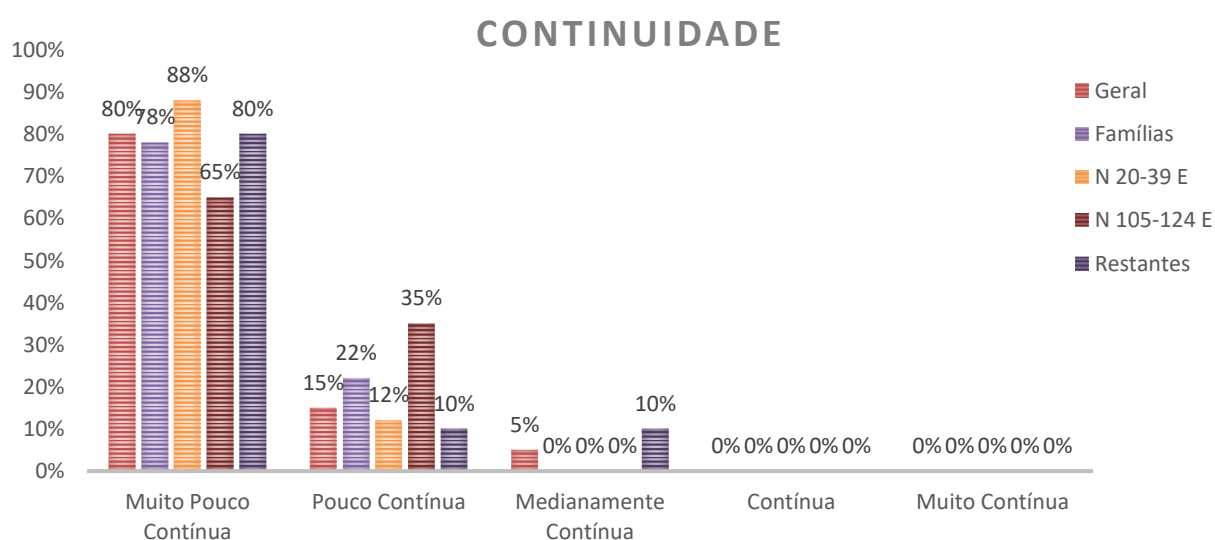


Gráfico 6-Análise da continuidade das descontinuidades no geral e em particular das principais famílias.

➤ Terminação

Relativamente ao parâmetro da terminação, e segundo a classificação ISRM (1978, 1981), o maciço presente tem na globalidade descontinuidades que tem término em outra descontinuidade (98%, 110 descontinuidades), tendo escassos casos com terminação na rocha (2%), e representado pelo Gráfico 7.

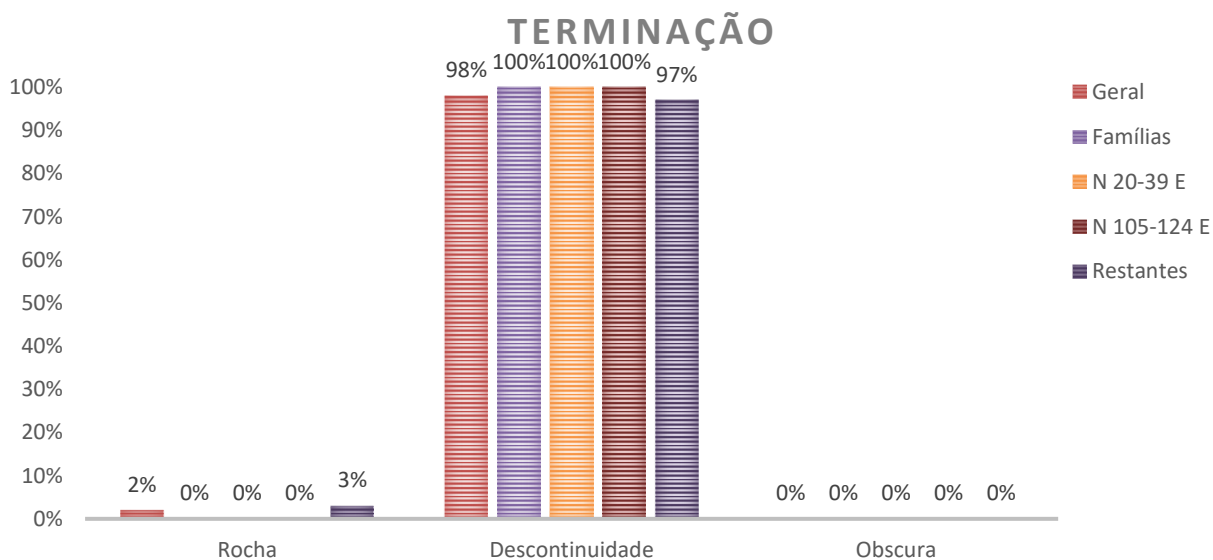


Gráfico 7-Tipo de terminação das descontinuidades.

➤ Curvatura

Em termos gerais, a curvatura presente nas descontinuidades do maciço rochoso são do tipo “planas a ligeiramente curvas” (C_{1-2}) e “curvas” (C_3), com a expressão de 42% e 45% respetivamente; apresentando pouca representatividade na classe “muito curvas” (13%) (Gráfico 8).

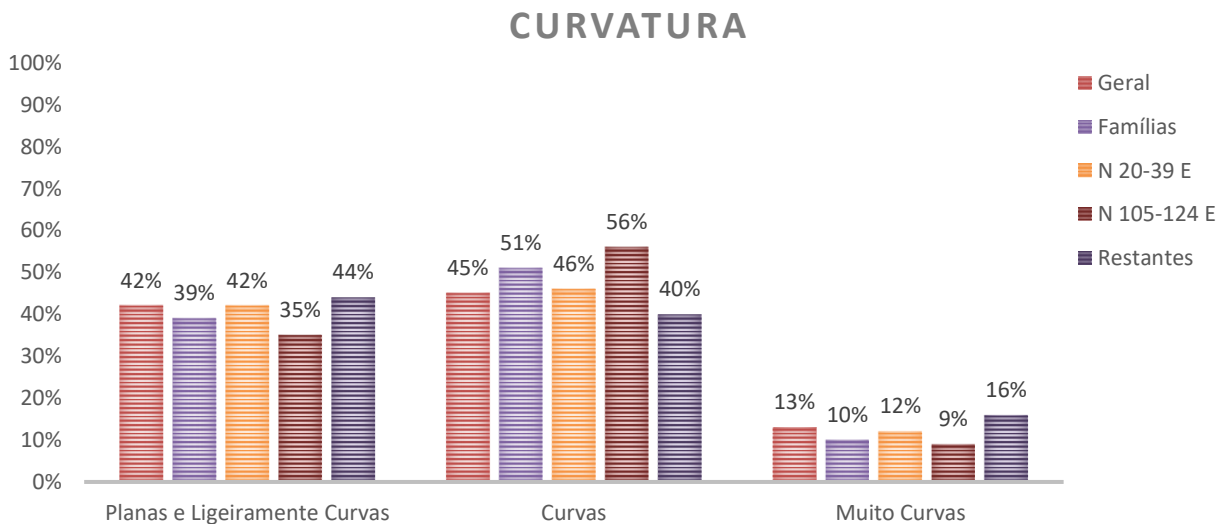


Gráfico 8-Tipo de curvatura presente na generalidade do maciço e nas principais famílias.

➤ Presença de água

As descontinuidades apresentam-se na sua maioria secas (91%), com cerca de 9% de descontinuidades húmidas (Gráfico 9).

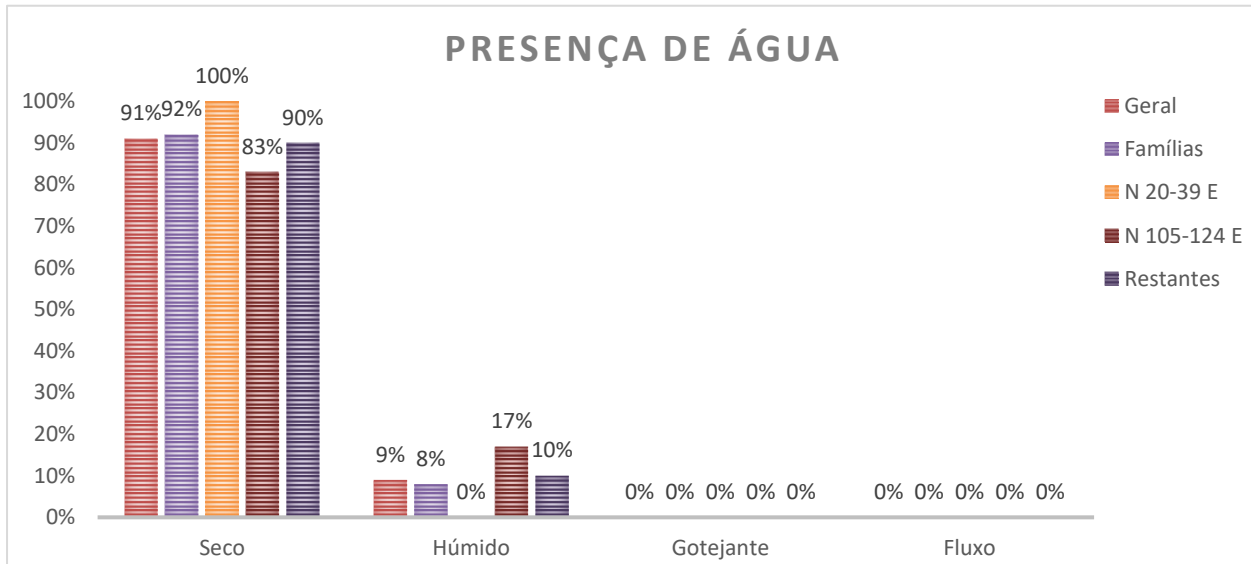


Gráfico 9-Presença de água no maciço rochoso da pedreira de Fornelo.

3.4. Desmorte

A qualidade do desmorte e as diversas etapas que entram no seu processo de caracterização são fatores que estão diretamente ligados à granulometria posteriormente resultante. Para que o resultado prático tenha correspondência com o modelo teórico elaborado, o processo de definição do diagrama de fogo a aplicar, a correta marcação dos furos, regularidade da superfície de bancada, competência e atenção prestada pelo manobrador, carga a aplicar por furo, temporização adotada, entre outros procedimentos, são aspetos essenciais e que influenciam todo o restante processo.

No contexto da empresa Elevation, e concretamente todas as acções relacionadas com desmorte de rocha, este processo é concretizado por uma entidade/empresa interna, especialista na área do desmorte, empresa essa com a denominação “Descavanor – Escavações e Desmorte de Rocha, S. A.”, entidade que executa este tipo de trabalhos nas respetivas pedreiras.

3.4.1. Cálculo do diagrama de desmonte – definição dos parâmetros geométricos da pega de fogo

Os procedimentos integrantes no processo de desmonte, tem relação direta entre si, proporcionando repercussões nos processos a jusante, devido à sua interdependência. Na elaboração de um projeto de desmonte de maciços rochosos, o procedimento primário a realizar in loco, é a definição do diagrama de fogo a aplicar consoante o contexto técnico-prático idealizado. Na Figura 42 podemos observar esquematicamente os diversos parâmetros geométricos que definem o mesmo, bem como a quantificação desses mesmos parâmetros.

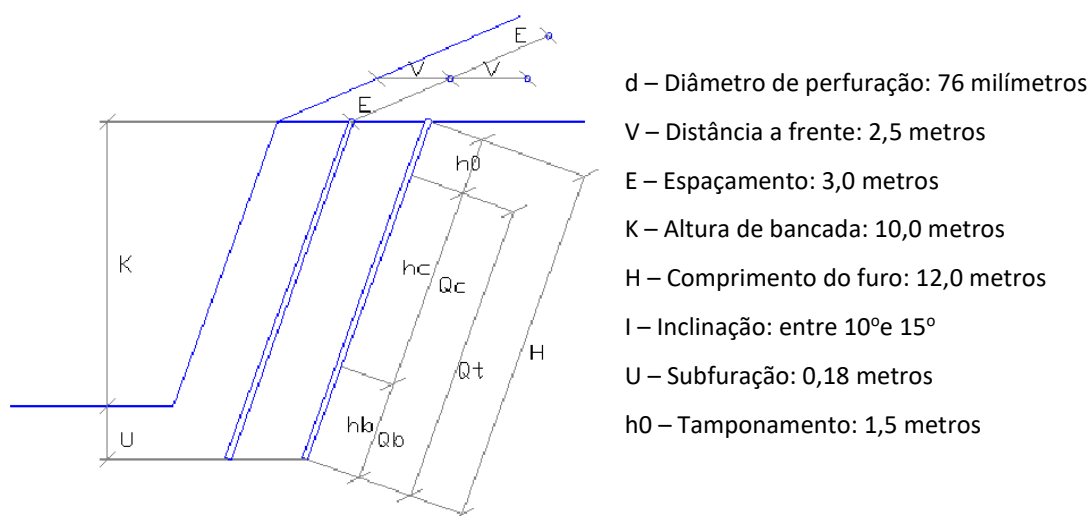


Figura 42-Parâmetros geométricos do diagrama de desmonte (adaptado de Ramos, 2008).

Tendo por base os parâmetros geométricos definidos anteriormente, e empregando os mesmos no contexto local, a distribuição espacial dos furos apresenta-se na Figura 43. Na globalidade, o volume de rocha considerado é 9.611 m³, ou seja, 25.472 toneladas de granito azul. No esquema do diagrama de fogo, podemos verificar a distribuição dos furos expectáveis ao longo da superfície de bancada a desmontar, estando identificado a cor azul o limite teórico da frente de desmonte (à superfície), e a verde o “pé” de talude correspondente; de referir que a frente de desmonte apresentava ângulo de inclinação na ordem dos 15°.

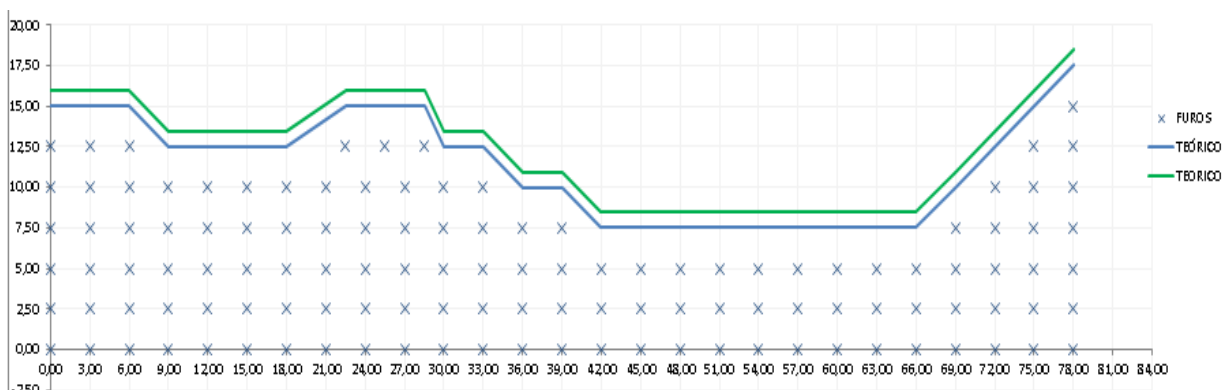


Figura 43-Esquema teórico da malha de perfuração.

3.4.2. Perfuração

A perfuração é a primeira das etapas prática do processo de desmonte, sendo de extrema necessidade uma breve preparação de todo o processo, quer a nível teórico, nomeadamente definição e cálculo do diagrama de fogo a aplicar em cada situação e consoante o contexto presente no local e tipo de trabalho pretendido, quer em termos práticos em campo, com cuidados e procedimentos como limpeza da superfície da bancada, marcação do local de perfuração de cada furo, etc.

3.4.2.1. Desvios de perfuração

A análise dos desvios de perfuração foi efetuada com o auxílio do *software* “Geo Hole Data”, no qual foram identificadas e consideradas três perspetivas, no caso desvios devido a emboquilhamento, desvio pontual e/ou desvio de flexão. Nestas três vertentes, apresenta-se uma pequena descrição dos critérios de classificação que definirão o tipo de desvio presente no furo.

- Emboquilhamento
 - Desvio (X): Avaliação do valor do ângulo de direção do furo nos primeiros 2m de perfuração, considerando-se erro de emboquilhamento quando nesse período o valor do ângulo de direção do furo apresenta-se superior a 2 graus.
 - Desvio (Y): Avaliação do valor do desvio do ângulo de inclinação do furo nos primeiros 2m de perfuração, considerando-se erro de emboquilhamento quando nesse período o valor do desvio do ângulo de inclinação do furo é superior a 2 graus;
- Desvio Pontual
 - Desvio (X): Avaliação dos valores das variações do ângulo de direção, considerando-se desvio pontual quando os valores de variação do ângulo de direção do furo são superiores a 2 graus.
 - Desvio (Y): Avaliação dos valores das variações do ângulo de inclinação do furo, considerando-se desvio pontual quando os valores de variação do ângulo de inclinação do furo são superiores a 2 graus.
- Desvio de flexão
 - Desvio (X): Avaliação dos valores de variação do ângulo de direção do furo, considerando-se desvio de flexão quando, excetuando a presença de erro de emboquilhamento, o valor da variação do ângulo de direção do furo apresenta-se superior a 1 grau e com o mesmo sentido (positivo ou negativo).

- Desvio (Y): Avaliação dos valores de variação de ângulo de inclinação do furo, considerando-se desvio de flexão, e excetuando a presença de erro de emboquilhamento, os valores de variações relativamente ao ângulo de inclinação do furo, com incidência de 1 grau e com o mesmo sentido (positivo ou negativo).

Em termos de resultados, os mesmos serão apresentados segundo gráficos com os planos longitudinal e transversal, e em planta, estando representados os 123 furos executados. Assim sendo, os resultados de todos os ensaios *Boretrak* estão presentes no Gráfico 11, os desvios de direção e inclinação, e no Gráfico 12 a representação da distribuição em planta dos furos executados (o gráfico da direita apresenta a variação em termos de localização final dos mesmos, em prática).

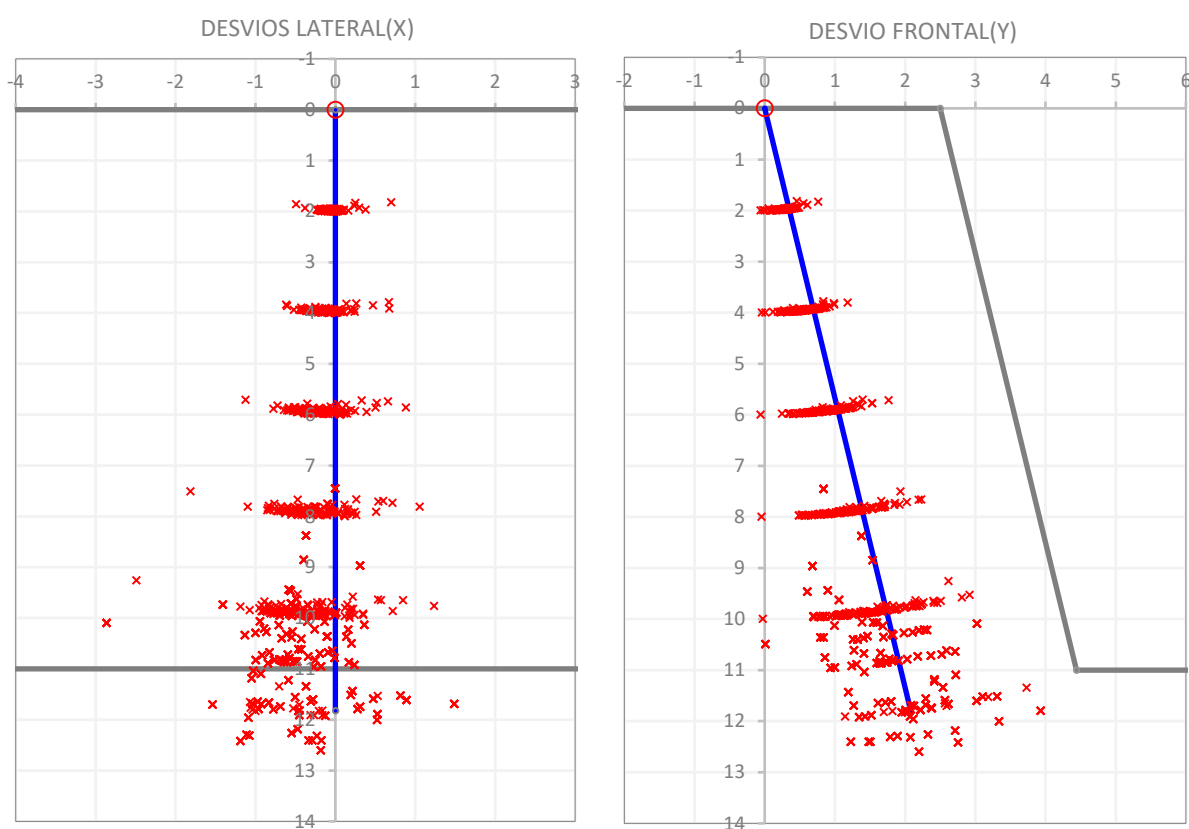


Gráfico 10-Desvios de perfuração segundo ângulo de direção e ângulo de inclinação dos furos (adaptado do software *Geo Hole Data*).

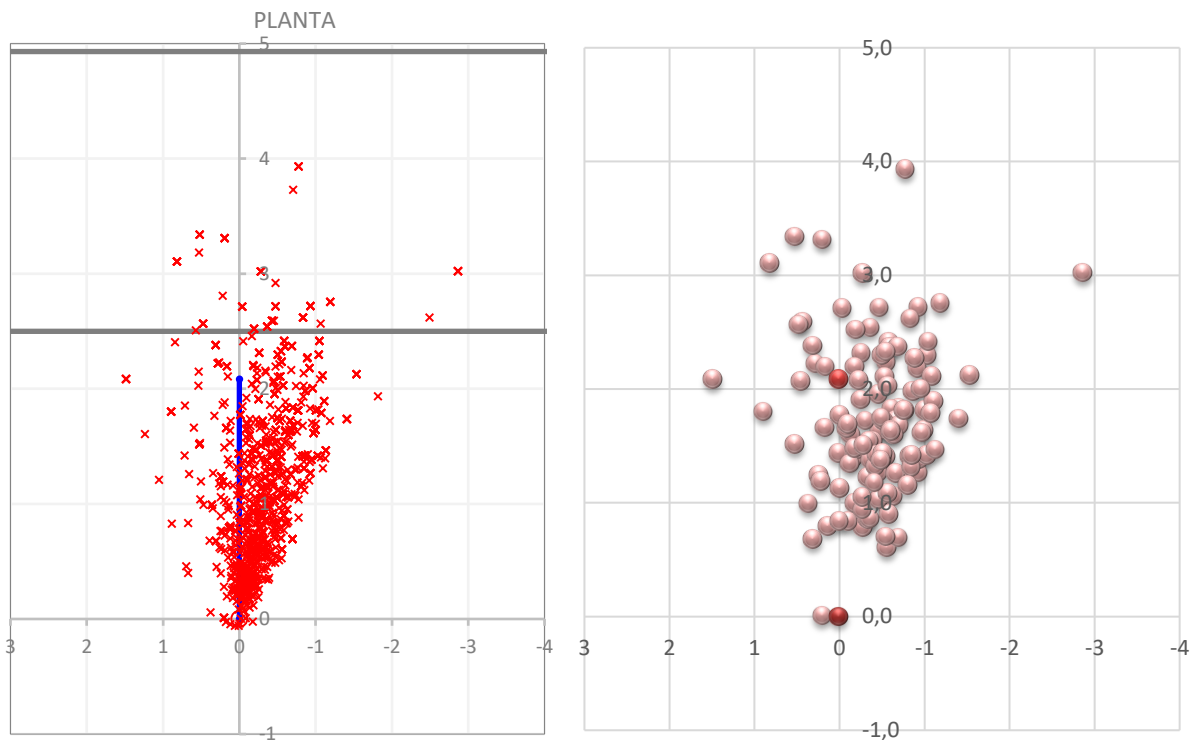


Gráfico 11-Distribuição em planta da distribuição dos furos executados (com as diversas profundidades medidas pelo ensaio *Boretrak*, adaptado de *Geo Hole Data*, e análise do posicionamento final dos furos).

3.4.2.2. Análise dos desvios de perfuração

- Emboquilhamento

A qualidade em que é processado o emboquilhamento da coluna de perfuração, tem diretamente ligação com a limpeza da superfície de bancada (quantidade de material desagregado presente na superfície de bancada). Este parâmetro foi identificado e analisado, concluindo-se que a maior parte dos locais onde foram executados os furos apresentavam algum material desagregado nas imediações, em que a maior percentagem está entre as classes “pouco material desagregado” e “algum material desagregado”, com 28% e 37%, respetivamente (Quadro 17 e Gráfico 12).

Quadro 17-Emboquilhamento dos furos.

Emboquilhamento		Furos	
Na rocha	0 m	21	17%
Pouco Material Desagregado	< 0,25 m	34	28%
Algum Material Desagregado	0,25 – 0,50 m	46	37%
Muito Material Desagregado	> 0,50 m	22	18%
TOTAL		123	100 %

Emboquilhamento

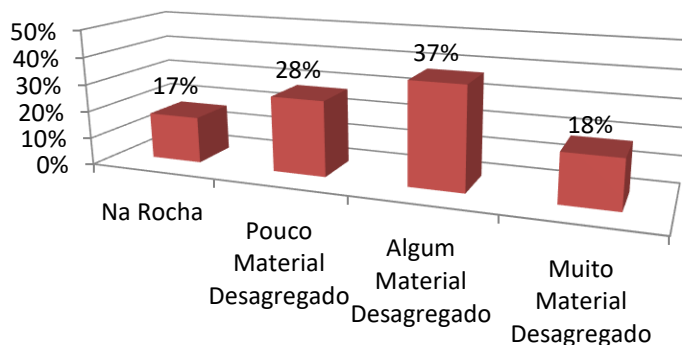


Gráfico 12-Tipo de emboquilhamento dos furos executados.

- Regularidade da bancada

Outro fator que contribui em grande escala para a diminuição dos desvios de perfuração relacionados com o equipamento de perfuração (correta colocação da coluna e estabilidade do carro de perfuração) é a regularidade da bancada.

Como é possível analisar pelos dados recolhidos, a maior parte da superfície de bancada encontra-se irregular a bastante irregular (Quadro 18 e Gráfico 13).

Quadro 18-Regularidade da superfície de bancada.

Regularidade de bancada	Furos	
Regular	28	23%
Irregular	92	75%
Muito Material Desagregado	3	2%
TOTAL	123	100 %

Regularidade de bancada

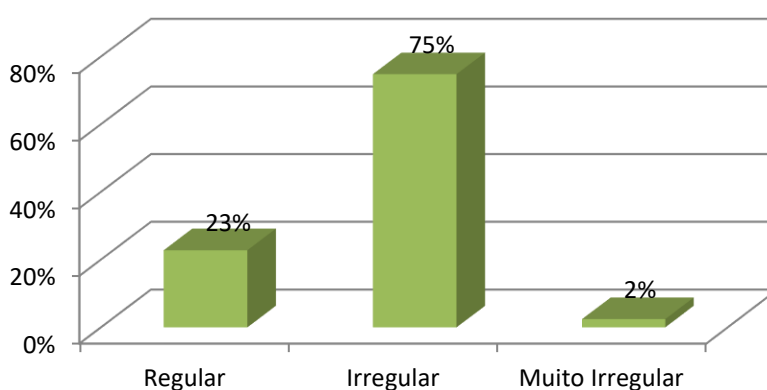


Gráfico 13-Tipo de superfície de bancada.

3.4.3. Frente de Talude

Durante este processo de análise, foi feito um levantamento à frente livre de desmonte, com o auxílio do *software Laser*, o qual possibilitou uma melhor análise acerca da localização dos furos da primeira fiada do diagrama de fogo.

Com este levantamento, conclui-se que a localização dos mesmos, a profundidade de furo aplicada e inclinação que alguns furos apresentavam não se encontravam de acordo com as exigências presentes no local. Podemos observar na Figura 44, alguns exemplos de perfis encontrados nesses furos.

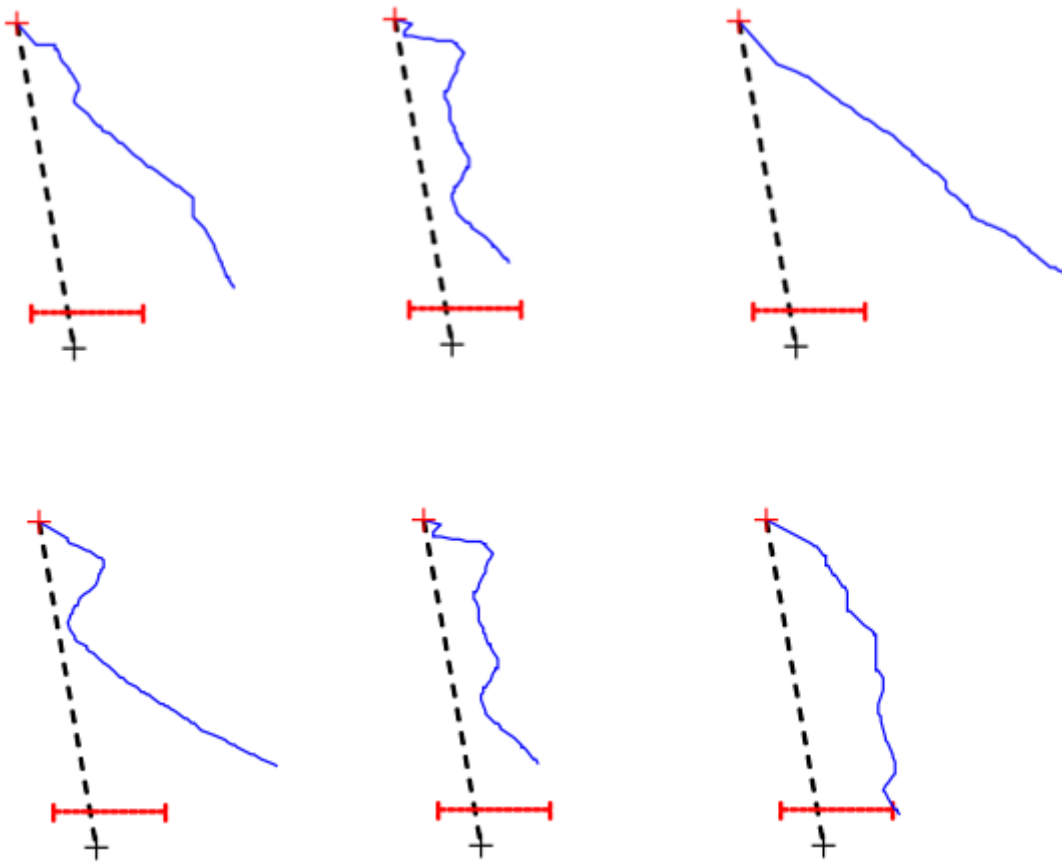


Figura 44-Exemplos de perfis de alguns furos analisados através do ensaio Laser.

A Figura 45 apresenta uma vista dos perfis do levantamento efetuado à frente de desmonte (através do ensaio *Laser*).

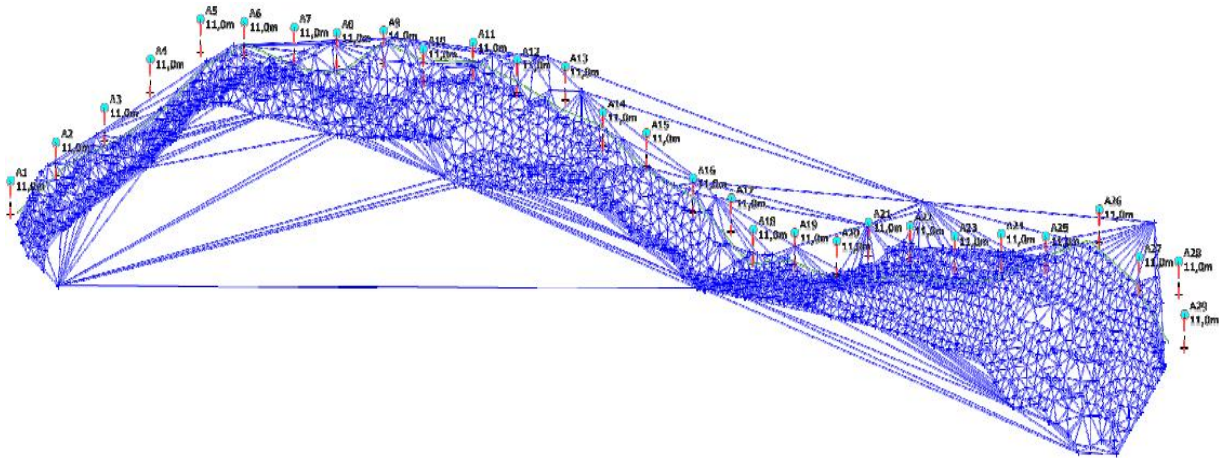


Figura 45-Planta da frente de desmonte e localização dos furos em análise (através ensaio Laser).

3.4.4. Diagrama de fogo prático

Como foi indicado anteriormente, o diagrama teórico, nem sempre é aplicado *in loco* no terreno, devido aos constrangimentos locais da superfície do mesmo, especialmente questões relacionadas com limpeza da superfície de bancada (que por vezes dificulta o emboquilhamento por parte do equipamento perfuração do equipamento) e a regularidade da superfície de bancada.

Na Figura 46 é possível visualizar a localização dos respetivos furos, frente livre da bancada e pé de talude (a vermelho e laranja, respetivamente).

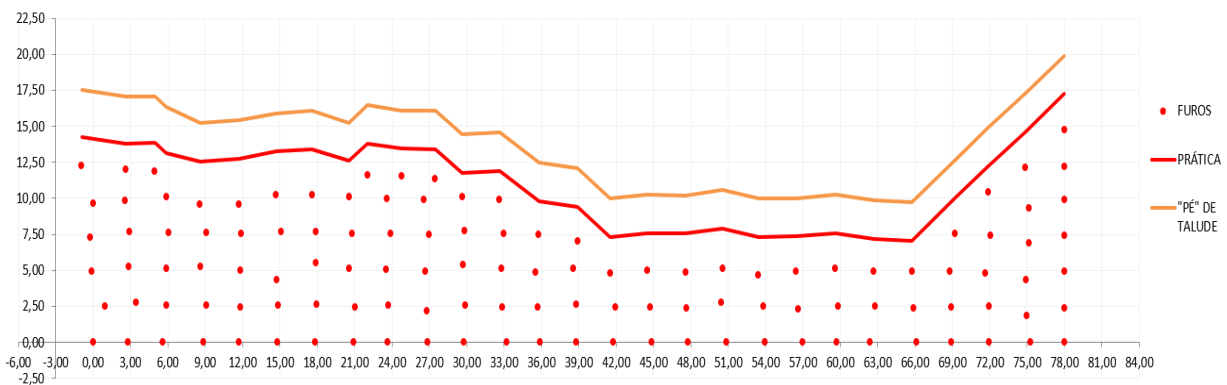


Figura 46-Diagrama de fogo prático - localização em planta dos furos.

A Figura 47 apresenta a localização dos respetivos furos e influência dos mesmos, em termos de área expectável de atuação do explosivo, articulando os dados referentes à disposição dos furos em planta no diagrama prático implementado, dados referentes aos ensaios *Boretrak* efetuado nos furos, que possibilitaram verificar os desvios que os mesmos apresentavam.

Nesta análise podemos concluir que há alguma irregularidade em termos de distribuição das cargas, sendo visível vários locais em que há sobreposição de carga explosiva, originando sobrefragmentação, ou seja, aumentando produção de material mais fino (material com granulometria inferior a 0,076m), possibilitando o excesso de britagem e agravando a sua eficiência energética; ao invés, existência de

locais de criação de grandes blocos (devido a insuficiente carga explosiva aplicada *in situ*), aumentando assim quantidade de material que necessitará de desmonte mecânico, taqueio.

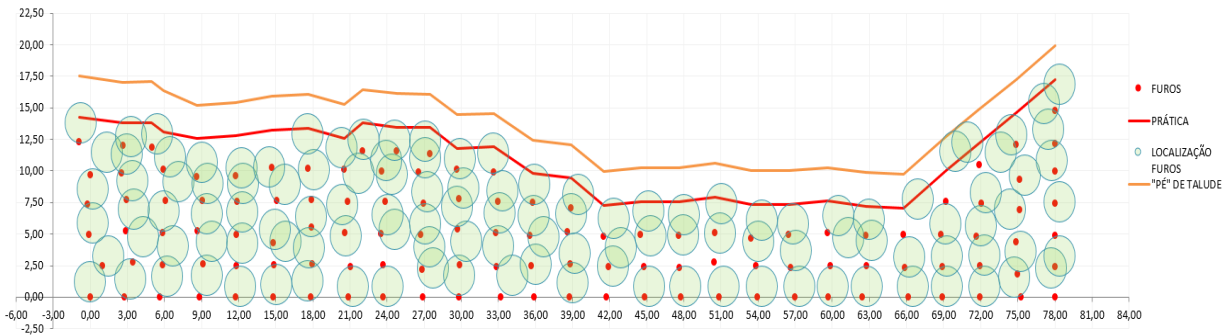


Figura 47-Distribuição de explosivo no diagrama de fogo.

3.4.5. Esquema de Fogo

Em termos de esquema de fogo com as respectivas ligações (Figura 48), podemos observar a seqüência de detonação utilizada (esquema de ligação em forma de “antena”), com auxílio de ligadores temporizados a 17, 25, 42 e 67 milissegundos, diferenciados no esquema e tendo em conta a legenda apresentada.

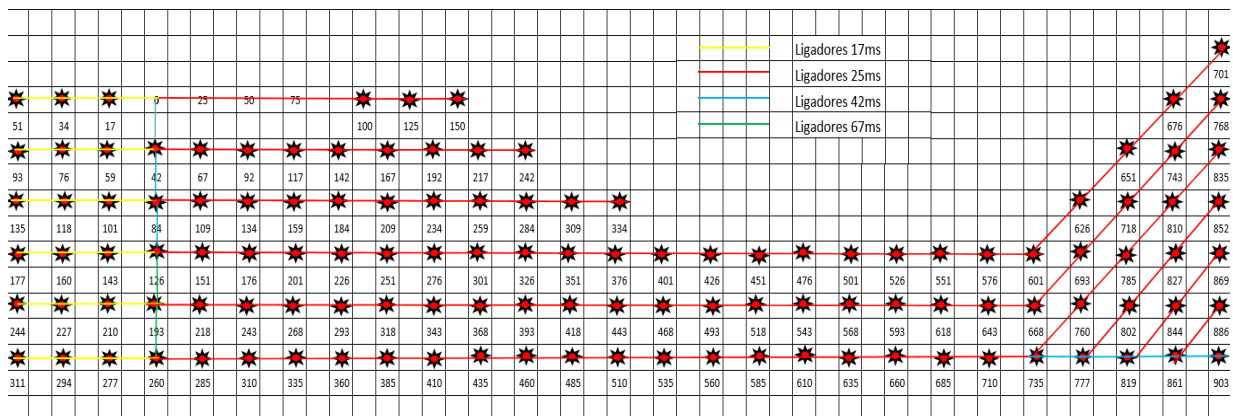


Figura 48- Esquema de ligações (ficheiro disponibilizado pela empresa Descavanor).

3.4.6. Superfície de bancada final

Outro aspeto importante e analisado neste trabalho, foi a recriação da plataforma final após rebentamento considerando o contexto em prática.

Nesse sentido, e após definição do local de implementação dos furos, no terreno foram medidas as altitudes dos respectivos furos (tendo como ponto de referência o local de maior altitude), articulando com os metros perfurados em cada furo. Articulando essas informações, foi possível criar o protótipo expectável da plataforma final resultante do desmonte em estudo, e presente na Figura 49.

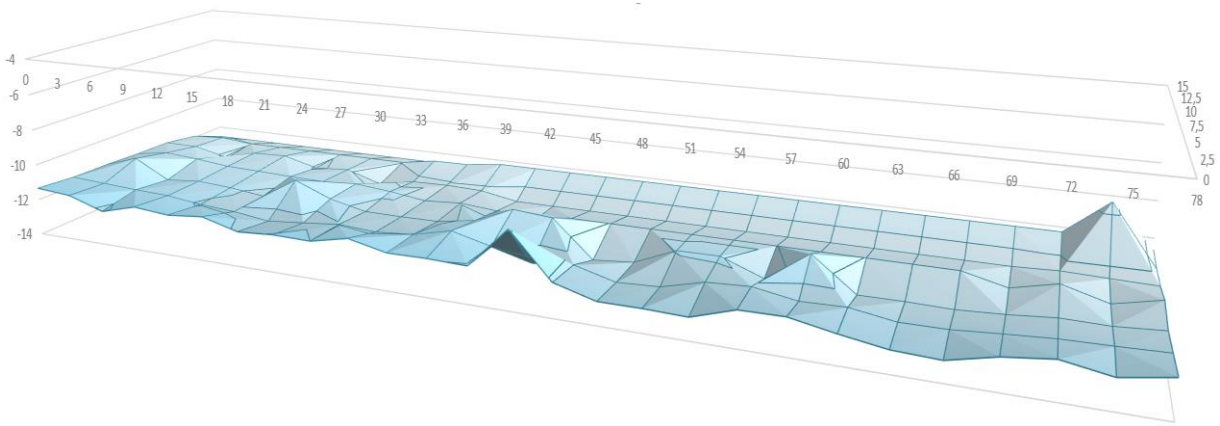


Figura 49-Recriação superfície final após o desmonte.

3.5. Carga e Transporte

Em termos da análise deste processo, foi colocado à disposição dos manobradorees destes equipamentos, folhas de registo dos trabalhos efetuados por ambos durante o processamento do material proveniente do desmonte.

No caso da escavadora de rastos, os detalhes analisados foram os tempos de trabalho, o qual foi subdividido em quatro subclasses, de realçar os tempos dispensados pela máquina a carregar material para britagem e carregar material que necessitaria de desmonte mecânico (material de maior dimensão, taqueio).

Em termos da unidade de transporte, as informações recolhidas recaíram sobre o tipo de trabalho executado (carregar material para o britador primário, *stock* de material para taqueio, etc.), número de cargas efetuados por turno diário, bem como distância percorrida nos referidos trabalhos.

3.6. Britagem

Na análise que foi feita relativamente à britagem primária do material rochoso proveniente da pega em estudo, foi elaborada folha de registo, sendo registado os tempos de trabalho, disposição e avaria (encravamento) numa perspetiva diária.

3.7. Plano de tarefas

Após a conclusão da análise teórico-prática do modelo atual implementado, o passo seguinte a realizar é a apresentação de um plano de atividades que permitiriam um maior rendimento na articulação dos processos desmonte/processamento, a maior parte das mesmas já incluídas no

anterior processo, sendo o principal contributo a sequência das mesmas, as quais se indicam de seguida.

- Levantamento geológico-geotécnico:

A primeira etapa a desenvolver no processo de caracterização do maciço rochoso é o levantamento geológico-geotécnico do local, o qual compreende a recolha de informação referente aos parâmetros estruturais do maciço, através da aplicação da técnica de amostragem linear. Após esta recolha, os dados obtidos são compilados através dos *softwares Dips e ScanGeoData|BGD*, os quais permitem a definição das principais famílias de discontinuidades e sua representatividade, bem como a análise dos diversos parâmetros registados aquando o levantamento de campo.

- Ensaio Laser:

De seguida, e com o principal intuito de determinação da localização da primeira fiada de furos consoante a regularidade da frente de bancada, o passo subsequente é a realização do barrimento da frente de desmonte (frente livre); este levantamento é efetuado com o auxílio de um laser, que possibilita o levantamento da estruturação da superfície livre (talude) e a clarificação da regularidade que a mesma apresenta.

- Elaboração do diagrama de desmonte:

Tendo em conta o resultado final pretendido, é efetuado o estudo para o cálculo do diagrama de fogo a implementar; esta etapa é bastante importante, visto articular os dados provenientes do levantamento geológico-geotécnico (atitude das discontinuidades, espaçamento entre as mesmas, continuidade, etc.) e as características do local de furação (inclinação do talude, regularidade, etc.). Através desses dados recolhidos e do tipo de maciço presente no local, estabelecesse os diversos parâmetros geométricos do diagrama a aplicar no local (distância à frente, espaçamento entre furos, inclinação do furo, etc.), parâmetros quantitativos referentes às cargas explosivas a aplicar, bem como do esquema de ligações a adotar e cada situação.

- Marcação pega de fogo:

Após a definição do diagrama de fogo a implementar, é necessário proceder à marcação dos furos no terreno. Esta etapa deve apresentar especial atenção, visto interferir com todo o processo a jusante, como é o caso da perfuração. Durante a marcação, é necessário ter em atenção aspetos como a regularidade da plataforma da bancada e frente livre, aspetos que poderão condicionar e alterar alguns parâmetros definidos teoricamente. Um deles é distribuição da primeira fiada de furos a furar; a distância à frente livre a adotar nos furos da primeira fiada é condicionada pela regularidade da frente livre, posteriormente afetando a restante distribuição dos outros furos.

- Perfuração:

Estando definido o diagrama de desmonte a aplicar, e articulando os parâmetros teóricos com a realidade presente no terreno, o próximo passo neste processo é a furação. Esta etapa é de grande relevância, e poderá ser imprescindível para potenciar o rendimento de todo o processo de desmonte.

Antes de avançar-se com a furação, o operador do *Roc* deve verificar o terreno para com a sua experiência tentar detetar algumas falhas na marcação da pega, o estado de limpeza da bancada e sua regularidade (aspetos que vão estar diretamente relacionados com o emboquilhamento), e todos as componentes do equipamento (como o caso do inclinómetro e medidor de profundidade). Após estes aspetos todos verificados, prossegue-se com a etapa de furação, sendo essencial prestar especial atenção durante todo o processo.

- Ensaio *Boretrak*:

Após a realização da furação dos respetivos furos, realiza-se o ensaio de *Boretrak* para verificar o desenvolvimento dos furos em profundidade, verificando a sua progressão nos dois sentidos (x e y), para avaliação da execução dos furos (e a ocorrência de desvios de perfuração). Com esta ferramenta é possível antecipar posteriores problemas relacionados com os desvios, e assim fazer uma correlação com as cargas a aplicar em cada caso.

- Carga explosiva e respetivo esquema de ligação:

Para finalizar, e após a realização dos ensaios de *Boretrak*, é realizado a carga dos furos com explosivos, considerando os aspetos estabelecidos anteriormente aquando da fase de cálculo do diagrama de fogo e inserindo as alterações que se entenderem convenientes consoante as “revisões” propostas. Logo de seguida efetua-se o esquema de ligação da pega de fogo (estipulada anteriormente) e avança-se para a detonação.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4. Resultados

O presente capítulo tem como principal objetivo a apreciação técnica (e posteriormente económica) do estudo levado a cabo e exposto no capítulo 3, relatando todos os parâmetros classificados e avaliados, realizando-se uma analogia apreciativa da qualidade do mesmo relativamente aos procedimentos anteriormente aplicados (metodologia existente).

Nesse sentido (e como já foi descrito anteriormente), realizou-se uma abordagem impar ao até então realizado na pedreira de Fornelo, com o intuito de verificar a sua fiabilidade, utilizando assim o *software WipFrag 2.4*, com o qual é possível realizar a análise granulométrica do material proveniente do desmorte através de fotografias.

O estudo elaborado teve duas fases distintas: numa primeira fase recorreu-se a fotografias de anteriores desmortes efetuados na pedreira de Fornelo, os quais tiveram as mesmas particularidades (orientação da bancada de desmorte, diagrama de desmorte, etc.), utilizando o programa informático supracitado para análise da distribuição granulométrica dessas pegas. Posteriormente, efetuou-se a caracterização do novo procedimento, o qual apresenta orientação da frente de trabalho distinta relativamente aos demais (desde o levantamento geológico-geotécnico até finalizar-se com a respetiva pega de fogo), analisando todos os parâmetros decorrentes do mesmo e que pudessem incutir direta influência no resultado final (ou seja, parâmetros que fossem influenciados pela orientação da bancada, como os parâmetros geológico-geotécnicos do local, e por consequente a etapa de perfuração e desvios, entre outros), dados esses posteriormente utilizados na realização da análise económica dos vários processos.

4.1. Caso de estudo: resultados

O presente ponto visa clarificar os parâmetros avaliados neste estudo, culminando com a análise económica de todo o processo.

Inicialmente realizar-se-á uma abordagem relativamente à caracterização granulométrica obtida em ambas as fases. Assim, apresentar-se-á os dados relativos aos anteriores desmontes e posteriormente o estudo do plano em vigor no presente trabalho.

De seguida, serão abordados alguns parâmetros específicos, parâmetros esses que terão estreita ligação com o principal parâmetro em estudo, orientação da frente livre do maciço aflorante. Assim sendo, os parâmetros em estudo foram desvios de perfuração e factor de carga (carga e transporte) e material para taqueio.

4.2. WipFrag 2.4

Este estudo tem como principal objetivo a análise da influência da orientação da frente de bancada no processo de desmonte e nos parâmetros neles envolvidos. Nesse sentido, e como o principal “objeto de estudo” na área de produção de agregados britados é o produto final, procedeu-se inicialmente à análise da granulometria expectável em diferentes desmontes de rocha, os quais teriam os mesmo pressupostos (paradigma anteriormente em uso), e posteriormente avançou-se para o estudo de uma nova conjectura, no qual se alterou o sentido da orientação da frente de desmonte (para carater desfavorável), procedendo-se ao estudo completo desse cenário, culminando na análise granulométrica resultante e dos seus resultados económicos no processo do mesmo.

Como procedimento geral, recorreu-se a uma imagem exemplificativa do produto final resultante de cada desmonte, através das quais e com auxílio do *software WipFrag* se procedeu à análise da granulometria, estudando a zona central de cada desmonte. A opção tomada deveu-se sobretudo porque na zona central a probabilidade de encontrar-se material de granulometria mais fina é significativamente maior que nas laterais, que devido ao confinamento das mesmas proporciona blocos de maior dimensão (este *software* tem maioritariamente dificuldade na definição dos limites de blocos de pequena dimensão, sendo esse também um fator importante neste estudo, e ao qual tentou-se superiorizar na referida análise).

4.2.1. Localização

Relativamente à localização das pegas efetuadas, as mesmas estão identificadas nas Figuras 50 e 51.



Figura 50-Vista panorâmica da pedreira de Fornelo (retirado de Google Earth, 28 de Março 2014).



Figura 51-Localização das pegas de fogo realizadas (retirado de Google Earth, 28 de Março 2014).

4.2.2. Modelo anterior

Neste estudo procedeu-se à caracterização de quatro desmontes efetuados previamente. As características dos mesmos são semelhantes (parâmetros geométricos, carga específica, etc.), sendo a orientação das frentes de bancada compreendidas entre N 100-120° E.

Com este tipo de cenários, o qual posteriormente verificar-se-á ser o mais favorável, devido à conjetura geológico-geotécnica do local (a orientação da frente de desmonte encontra-se perpendicularmente à principal família de descontinuidades presente no maciço rochoso, compreendida entre as atitudes N 20-39°), proporcionando uma distribuição granulométrica mais “suave” e “mais fina”, o que poderá indicar aumento da produtividade, quer a nível de carga e transporte, quer em termos de capacidade de britagem. Além destes aspetos, os cenários apresentados, proporcionam menor percentagem de granulometrias de grandes dimensões (“blocos”), diminuindo assim custos relativos a desmonte mecânico (“taqueio” de blocos).

4.2.2.1. Zona I

Como foi descrito anteriormente, as análises seguintes serão relacionadas com anteriores desmontes efetuados na pedreira de Fornelo, os quais apresentam características semelhantes entre si, sendo o aspeto mais relevante a orientação da frente de desmonte, a qual é perpendicular à principal família de descontinuidade presente no maciço aflorante.

A Figura 52 e o Gráfico 14 referem-se à primeira zona analisada (a sua localização encontra-se no ponto 4.2.1).



Figura 52-Granulometria observada na Zona I (Fornelo – Vila do Conde).

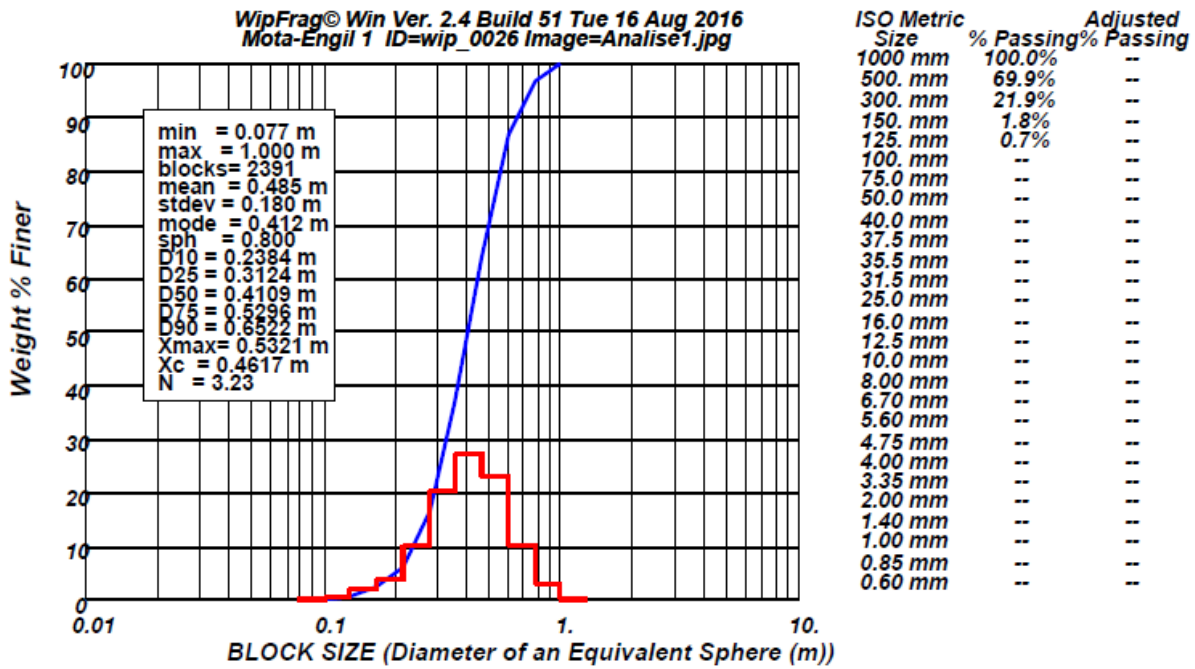


Gráfico 14- Caracterização granulométrica – Zona I (adaptado do software WipFrag 2.4).

Como se pode observar no gráfico anterior, a distribuição granulométrica da Zona I, a maior percentagem encontra-se distribuída pelas frações compreendidas entre 300-600 mm (70%), sendo as frações mais representativas compreendidas entre 380-490 mm com 30% da totalidade.

Relativamente à percentagem referente aos “blocos” (material de fração superior a 800 mm), podemos verificar no gráfico que a mesma é diminuta, representando 3-4% na totalidade.

4.2.2.2. Zona II

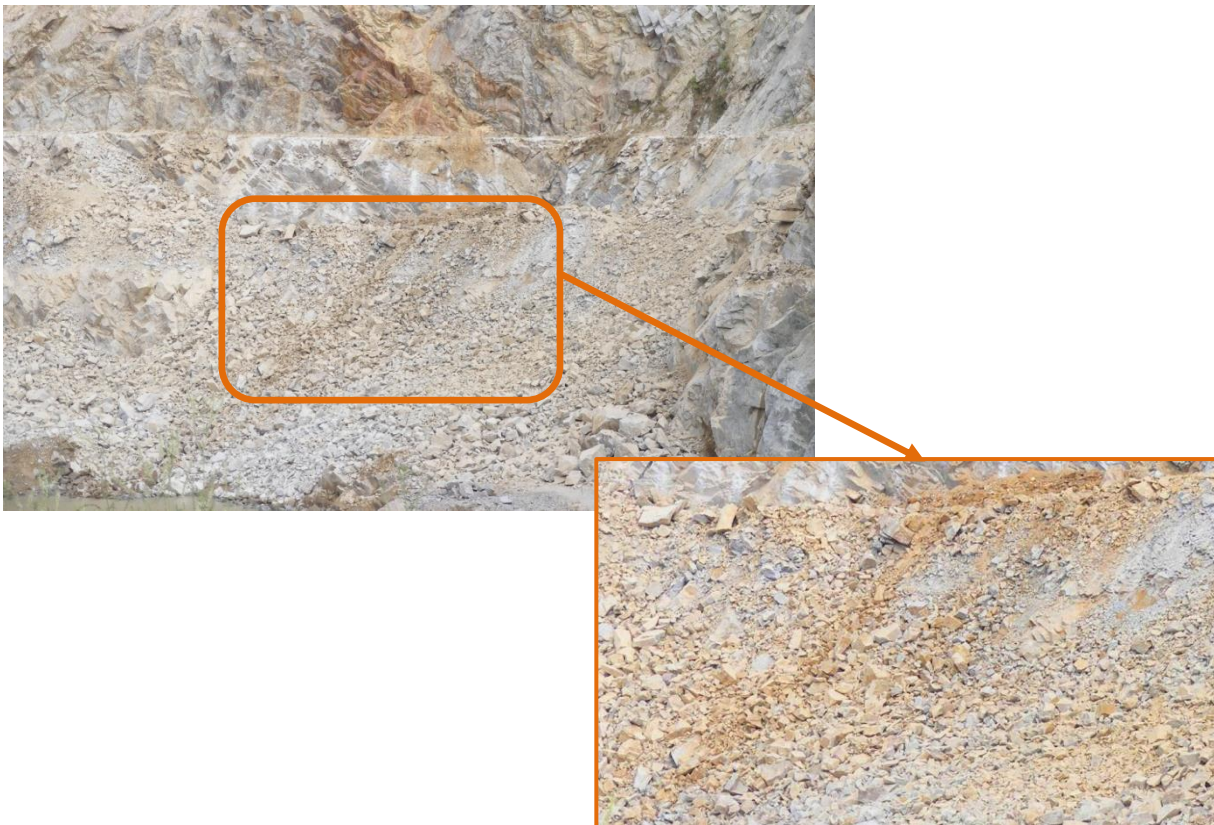


Figura 53-Granulometria observada na Zona II (Fornelo – Vila do Conde).

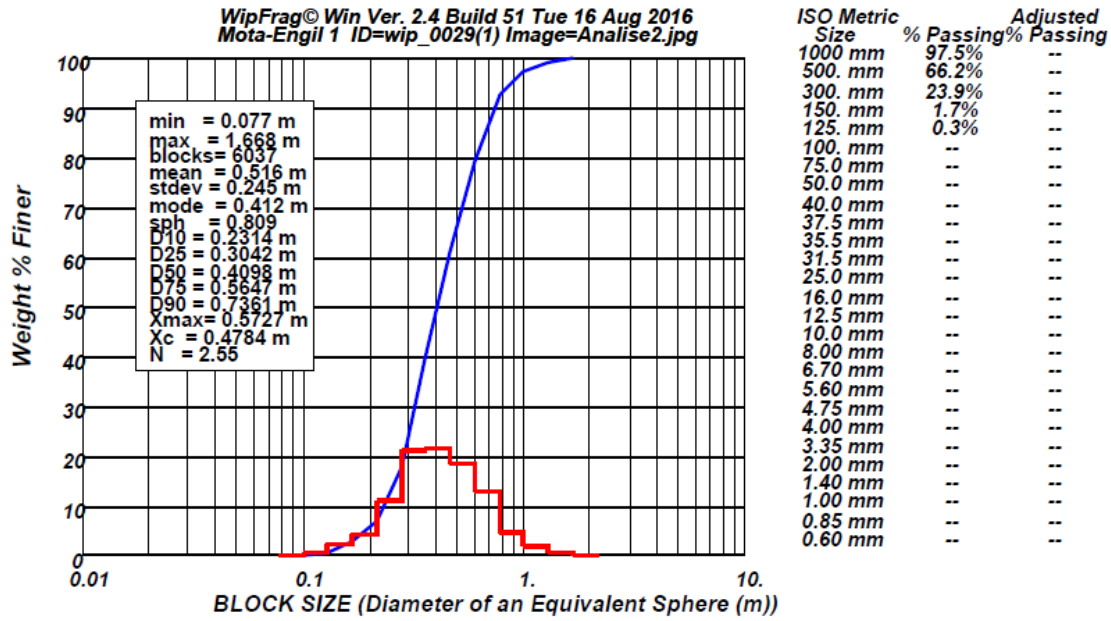


Gráfico 15-Characterização granulométrica – Zona II (adaptado do software WipFrag 2.4).

Relativamente à distribuição granulométrica da Zona II, a maior percentagem encontra-se distribuída pelas frações compreendidas entre 300-600 mm (60%), sendo as frações mais representativas compreendidas entre 290-480 mm, com 42% da totalidade.

Relativamente à percentagem referente aos “blocos”, neste caso a quantidade apresentada é superior à anterior análise, no qual surge com percentagem de 7-8% na totalidade.

4.2.2.3. Zona III



Figura 54-Granulometria observada na Zona III (Fornelo – Vila do Conde).

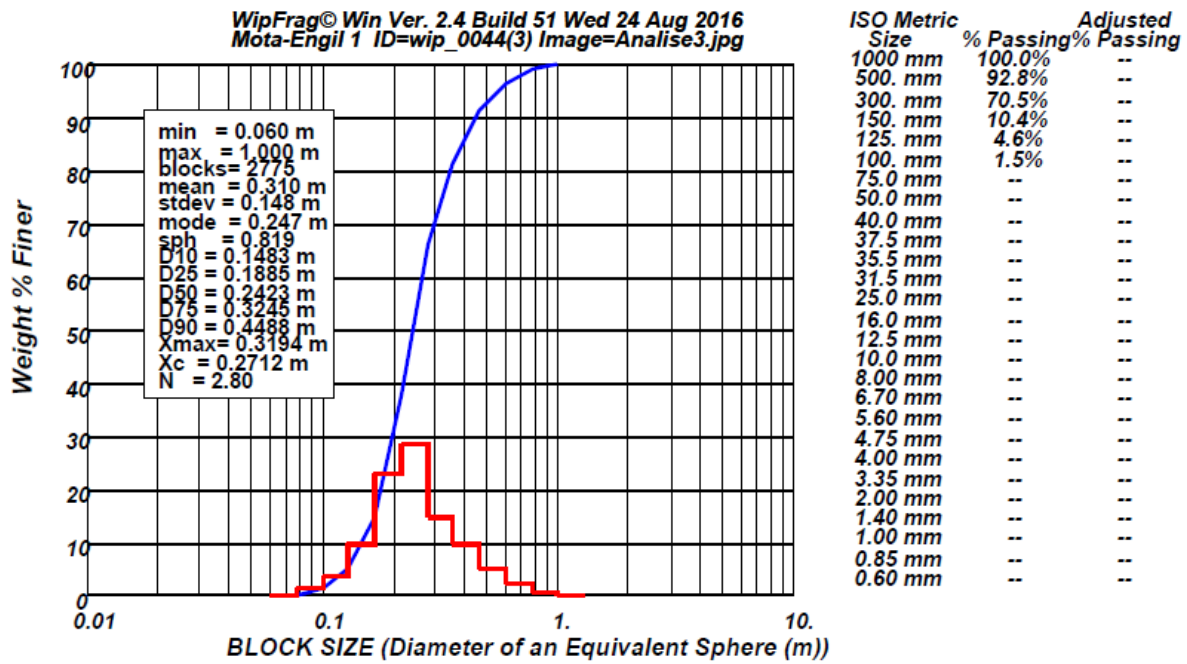


Gráfico 16- Caracterização granulométrica – Zona III (adaptado do software WipFrag 2.4).

Comparativamente à distribuição granulométrica da Zona III, a maior percentagem encontra-se distribuída pelas frações compreendidas entre 200-300 mm (55%), sendo as frações mais representativas compreendidas entre 210-290 mm com 29%.

Em termos de quantidade de material de maiores dimensões presente zona identificada, como podemos comprovar pelo respetivo gráfico, é mínima, sendo a mesmo entre 1-2% na totalidade.

4.2.2.4. Zona IV



Figura 55-Granulometria observada na Zona IV (Fornelo – Vila do Conde).

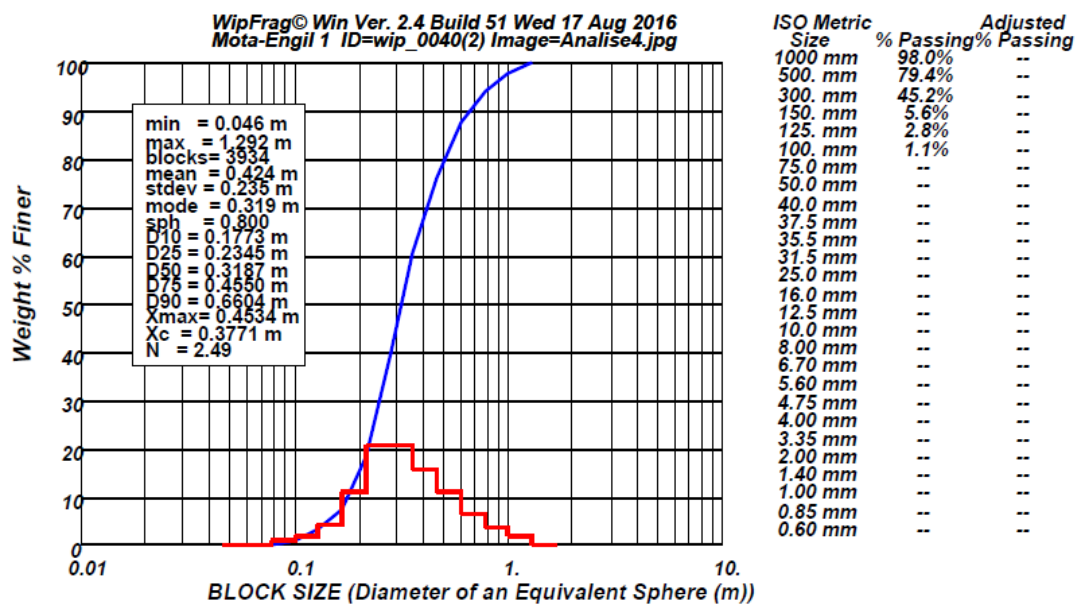


Gráfico 17-Characterização granulométrica zona IV (adaptado do software WipFrag 2.4).

Relativamente à zona IV, a mesma apresenta uma distribuição granulométrica de carácter extenso, sendo as frações mais representativas compreendidas entre 210-360 mm (44%).

Em termos de blocos com granulometria superior a 800 mm, a zona identificada apresenta 6-8% de material que necessitará de desmonte mecânico.

4.2.3. Caso de estudo – Caracterização granulométrica

Como foi previamente descrito, o caso de estudo em análise no presente trabalho tem como principal objetivo o estudo da interação da orientação da frente de desmonte com os demais parâmetros. Nesse sentido, elaborou-se uma análise completa culminando na caracterização granulométrica obtida, com auxílio do software WipFrag 2.4.

O caso em estudo é distinto dos demais, sendo o principal fator de distinção a orientação da frente de desmonte, sendo esta no quadrante N 10-15° E. Este fator é bastante importante, pois em termos de orientação, esta coincidirá com a orientação da principal família de descontinuidades (N 20-39° E), o que implicará um decréscimo de rendimento na etapa de desmonte, afetando os parâmetros subsequentes (nomeadamente carga-transporte, aumento desmonte mecânico, e finalmente afetando a britagem primária).



Figura 56-Granulometria observada no Caso de estudo.

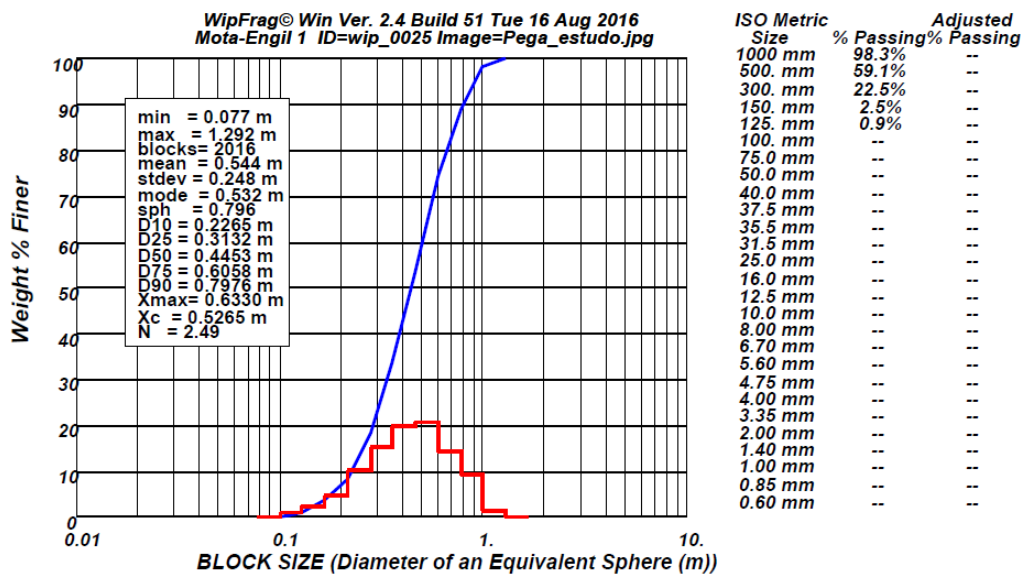


Gráfico 18-Characterização granulométrica - caso de estudo (adaptado do software WipFrag 2.4).

Como foi referido anteriormente, o presente caso tem algumas particularidades relativamente as análises apresentadas anteriormente.

Tendo como base a observação do Gráfico 18, podemos verificar que a distribuição da amostra representativa apresenta granulometria mais graúda que as demais (41% do material apresenta granulometria superior a 500mm). As frações mais representativas da presente distribuição encontram-se distribuídas entre 370-600 mm, com 42% de material na totalidade.

Quanto à quantidade de material rocha com granulometria superior a 800 mm, a percentagem presente é superior a 12%.

4.2.4. Reflexão

Tendo como base as caracterizações supracitadas, podemos concluir o seguinte:

- Nos primeiros quatro casos em que a orientação da frente de bancada se encontrava perpendicularmente à orientação da principal família de descontinuidades presente no maciço rochoso, a distribuição granulométrica presente é mais suave e de fração mais miúda – isto proporcionará maior rendimento e produtividade, nomeadamente nas etapas de carga-transporte e britagem primária;
- Em termos de granulometria, a última caracterização (caso de estudo) apresenta uma distribuição mais graúda que as demais (40% do material tem granulometria superior a 500 mm), sendo o reverso do ponto anterior;
- Em termos de material rochoso que necessitará posteriormente desmonte mecânico, as primeiras análises apresentam valores menores (em percentagem), enquanto que o caso de estudo apresenta valor superior a 12% da sua totalidade – numa análise geral, e considerando os casos de maior grandeza, este último caso apresenta aumento de 4 a 9% da quantidade de grandes blocos, o que é prenúncio de menor qualidade na trabalhabilidade do explosivo, assim como aumento de custos posteriores em desmonte mecânico.

No gráfico 19 é possível visualizar o desenvolvimento granulométricos das cinco situações analisadas anteriormente.

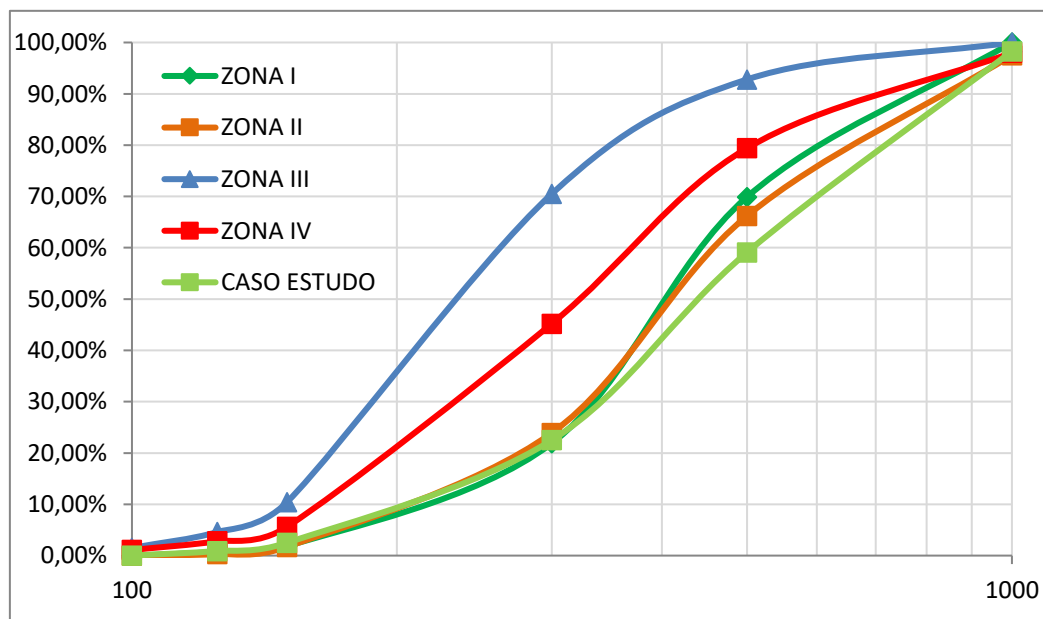


Gráfico 19-Distribuições granulométricas dos casos analisados

O Quadro 19 apresenta em resumo as considerações anteriormente identificadas.

Quadro 19-Quadro Resumo

Localização	Orientação de Desmorte (Em relação à orientação da família de descontinuidades)	Frete de (Em relação à principal)	Frações Granulométricas mais representadas	Quantidade de Material Rochoso Com Granulometria >800 mm (Desmorte Mecânico)
Zona I	Perpendicular		300-600 mm (70%)	3-4%
Zona II	Perpendicular		290-480 mm (42%)	7-8%
Zona III	Perpendicular		200-300 mm (55%)	1-2%
Zona IV	Perpendicular		210-360 mm (44%)	6-8%
Caso de Estudo	Paralela		370-600 mm (42%)	> 12%

4.3. Desvios de perfuração

Como foi descrito anteriormente, após a conclusão da etapa de perfuração foi realizado o ensaio *Boretrak* na maioria dos furos realizados (alguns dos quais não foi possível porque encontravam-se com material retido no seu interior). Com este ensaio foi possível vislumbrar o desenvolvimento de cada um deles (em profundidade) e os desvios ocorridos.

O Quadro 20 relata o desenvolvimento em termos de desvios, segundo os planos X e Y, dos furos realizados.

Quadro 20-Qualidade dos furos de perfuração.

Tipo de desvio	Desvio (cm/m)
X (total)	5,25 cm/m
X (positivo)	3,67 cm/m
X (negativo)	5,54 cm/m
Y (total)	5,77 cm/m
Y (positivo)	4,17 cm/m
Y (negativo)	6,52 cm/m

A definição destes parâmetros foi resultante da monitorização efetuada com o levantamento dos dados relativos ao ensaio *Boretrak*, com os quais se verificou as diferenças em termos de desenvolvimento dos furos (afastamentos dos valores *standard* considerados), valores que indicam o grau de fiabilidade em termos de qualidade de perfuração.

4.4. Fator de carga

Outro fator contabilizado e em estudo foi o fator de carga em termos de equipamentos de carga-transporte, o qual serviu para estimar a influência da granulométrica resultante do desmonte em termos de distribuição espacial.

Com os dados recolhidos (volume de material desmontado, cargas necessárias para transporte e capacidade do equipamento de transporte - *dumper*) foi possível calcular-se o fator de carga através da Equação 1:

$$\text{Fator de carga} = \frac{\text{Material desmontado}}{n^{\circ} \text{ de cargas} \times \text{capacidade Dumper}}$$

Equação 1-Fator de carga.

Assim sendo, foi possível verificar que o mesmo era de:

$$\text{Fator de carga} = \frac{24.572 \text{ Toneladas}}{814 \text{ cargas} \times 21 \text{ m}^3} = 1,44 \text{ ton/m}^3$$

Como esclarecemos anteriormente, a granulometria resultante tem estreita ligação entre a articulação da orientação da frente de desmonte e as características geológico-geotécnicas do maciço, e o fator de carga é uma condicionante de toda esta interação. Assim sendo, podemos considerar que consoante a “qualidade” deste processo, o valor do fator de carga será distinto (de referir que a etapa de carga foi realizada pelo mesmo operador ao longo de todo o processo).

4.5. Taqueio

Um fator de grande importância neste estudo é relacionado com a quantidade de material proveniente do desmonte de maciço rochoso e que posteriormente necessitará de um segundo estágio de desmonte – desmonte mecânico.

Após a análise efetuada e apresentada anteriormente, podemos comprovar que a orientação da frente de desmonte em relação à orientação das descontinuidades presentes no maciço aflorante tem influência no resultado final (granulometria), e de salientar o aumento de “produção” de blocos de grande dimensão. Este aspeto é de elevada importância, podendo mesmo acarretar valores superiores em 5% em relação aos casos mais “desfavoráveis”, mesmo quando a orientação se adequa melhor às características geológico-geotécnica do maciço.

4.6. Análise financeira

O presente ponto consiste na análise financeira do caso de estudo, e surge descrito de seguida com detalhe por atividade. Posteriormente apresentar-se-á algumas considerações acerca desta análise e da contribuição que tais resultados podem induzir no procedimento industrial da presente matéria.

Custos efetivos:

- Ensaio elaborados:
 - *Boretrak*: 500€ (0,05€/m³; 0,02€/ton)
 - *Laser*: 300€ (0,03€/m³; 0,01€/ton)

- Desmonte:
 - Marcação: 173,25€ (0,02€/m³; 0,01€/ton)
 - Acompanhamento perfuração: 156,00€ (0,02€/m³; 0,01€/ton)
 - Perfuração: 4.775,00€ (0,50€/m³; 0,19€/ton)
 - Carregamento/Detonação: 7.988,95(0,83€/m³; 0,31€/ton)

- Carga e Transporte:
 - Giratória Komatsu PC 450LC-6: 9.122,40 € (0,95€/m³; 0,36€/ton)
 - Dumper Euclid-Hitachi HE 600 R32 C N°15: 14.476,80 € (1,51€/m³; 0,57€/ton)

- Desmonte mecânico “Taqueio”: 5.250€ (0,55€/m³; 0,21€/ton)

- Britagem Primária:
 - Britador Primário SVEDALA JM 1211 HD: 20.430 € (2,13€/m³; 0,80€/ton)

Em termos gerais, os custos associados encontram-se agrupados no Quadro 21, no qual podemos verificar que para a produção de 1 metro cubico de material o preço de custo é aproximadamente 6,57€, enquanto que para a produção de 1 tonelada de material o preço é 2,48€, tendo as atividades “Carga e Transporte” e “Britagem Primária” as maiores percentagens de custos efetivos (37,4% e 32,3%, respetivamente).

Quadro 21-Custos do método atual aplicado, por atividade.

Atividade	Valor Global (€)	Custo €/m ³	Custo €/ton	Percentagem %
Ensaio Realizados	800,00 €	0,08 €/m³	0,03 €/ton	1,3%
Boretrak	500,00 €	0,05 €/m ³	0,02 €/ton	0,8%
Laser	300,00 €	0,03 €/m ³	0,01 €/ton	0,5%
Desmonte	13.093,20 €	1,36 €/m³	0,51 €/ton	20,7%
Marcação	173,25 €	0,02 €/m ³	0,01 €/ton	0,3%
Acompanhamento (Perfuração)	156,00 €	0,02 €/m ³	0,01 €/ton	0,2%
Perfuração	4.775,00 €	0,50 €/m ³	0,19 €/ton	7,6%
Carregamento/Detonação	7.988,95 €	0,83 €/m ³	0,31 €/ton	12,6%
Carga e Transporte	23.599,20 €	2,46 €/m³	0,93 €/ton	37,4%
Giratória	9.122,40 €	0,95 €/m ³	0,36 €/ton	14,4%
Dumper	14.476,80 €	1,51 €/m ³	0,57 €/ton	22,9%
Desmonte Secundário ("Taqueio")	5.250,00 €	0,55 €/m³	0,21 €/ton	8,3%
Britagem	20.430,00 €	2,13 €/m³	0,80 €/ton	32,3%
Total	63.172,40 €	6,57 €/m³	2,48 €/ton	100,0%

Este caso apresentado teve como base o levantamento efetuado ao longo do presente estudo. Como foi possível esclarecer-se no ponto 4.2.4, o mesmo apresenta alguns pontos que acarretam aumento de custos relativamente ao procedimento desenvolvido anteriormente e que também foi apresentado no presente trabalho.

Em termos de distribuição granulométrica, foi possível verificar que no caso de estudo a granulometria resultante é mais graúda que as restantes análises, havendo também aumento da percentagem de material com granulometria \geq a 800 mm, casos esses que necessitariam posteriormente de desmonte secundário (desmonte mecânico). Em termos de material rocha que necessitará de desmonte secundário, é possível fazer-se uma analogia com os resultados obtidos das curvas granulométricas obtidas anteriormente.

Como foi apresentado, nos casos em que a orientação da frente de desmonte se encontrava perpendicular à orientação da principal família de descontinuidades, os valores obtidos em relação à "produção" de grandes blocos surge na ordem de 3 a 8% da totalidade do material obtido; na circunstância do caso de estudo, este valor apresenta-se superior a 12%, ou seja, 4 a 9% a mais que os casos anteriores (considerando neste cenário o caso analisado de carácter mais desfavorável e favorável, respetivamente).

Assim sendo, e tendo em conta a descrição supracitada podemos considerar que em termos económicos, na etapa de desmonte secundário, o presente estudo tem um incremento de 5 a 10% relativamente ao procedimento implementado anteriormente, apresentando valores entre 208-468€ por desmonte da mesma importância. Outro aspeto importante e a ter em conta neste tipo de caso é

relacionado com custos associados e relativos às etapas de carga-transporte deste material. Apresentado o mesmo grau de grandeza, com este tipo de cenários descritos anteriormente, e economicamente falando, neste aspeto há um incremento de 943,97-2.123,93€ no extremo.

Ou seja, na totalidade o caso descrito tem aumento de preço de custo em 1.151,97 a 2.591,93€, valor esse bastante elevado considerando apenas custos relacionados com desmonte secundário e carga e transporte de grandes “blocos”.

Relativamente à granulometria resultante, este aspeto também tem influência no processo geral de produção. Como podemos verificar nos gráficos apresentados anteriormente e que representa a análise dos produtos finais em distintos casos, quando a orientação da frente de desmonte encontra-se paralelamente (ou próximo) à orientação da principal família de descontinuidades, a granulometria resultante apresenta características mais graúdas, tendo este aspeto direto influência/contributo no aumento do preço de custo de produção.

Ora vejamos, quando o material resultante apresenta grandes variações no seu tamanho, e em que a percentagem de material graúdo é elevada, este aquando das etapas de carga-transporte e britagem primária ocasiona alguns problemas.

No caso da etapa de carga e transporte, este aspeto perturba o correto carregamento, visto que o operador da carregadora necessita de maior número de manobras e ações para poder carregar o *Dumper* na “perfeição” (este desembolsa mais tempo a escavar e seleccionar o material, prejudicando assim a produtividade das etapas subsequentes). Além disso, visto o material ser de calibres muitos distintos e por vezes de grandes dimensões, quando este é carregado no equipamento de transporte, a sua “produtividade” diminui visto não ser possível um correto carregamento, ocasionando imensos espaços vazios proporcionados pela “difícil” organização do material, diminuindo a operacionalidade deste equipamento na sua plenitude. Assim, neste caso, o processo de carga e transporte vai alongar devido à baixa produtividade do processo (em relação a desmontes de igual dimensão). Como foi possível verificar anteriormente, o fator de carga durante este processamento foi próximo de 1,44 ton/m³; com os aspetos referidos anteriormente, é possível considerar-se que no caso em que a granulometria resultante é mais “fina” o fator de carga aumenta, pois as partículas dos materiais organizam-se melhor no interior da carroçaria do equipamento de transporte, sendo necessário menos carregamentos para transporte da mesma quantidade de material.

Relativamente à britagem primária, este processo será afetado pelos procedimentos precedentes. Como foi acima descrito, a granulometria resultante é fator preponderante e a qual afeta todo o processo industrial, sendo a mesma influenciada pelos procedimentos desenvolvidos precedentemente. Assim, quando falamos da etapa de britagem primária temos de ter em atenção todo o processo antecedente; relativamente à carga e transporte do material desde a frente de desmonte até ao britador primário, o tempo de ciclo deste processo influencia a operacionalidade e produtividade deste equipamento, por vezes estando períodos largos em funcionamento mesmo não estando efetivamente a trabalhar (“trabalhar vazio”). Este tipo de situações é prejudicial para o

processo de produção, atendendo à utilização do equipamento em vão, proporcionando desgaste do mesmo e consumo de combustível/energia.

Outro importante fator é a dimensão do material. O material rocha proveniente do desmonte, sendo de grande dimensão, tem tendência a proporcionar mais encravamentos, afetando a produção devido à constante necessidade de paragem do equipamento para desencravamento do material; ao invés, se o material for muito fino, e se a percentagem do mesmo for elevada, poderá ocasionar engasgamento, sendo necessário paragens constantes para limpeza do equipamento.

Tendo por base a consideração exposta anteriormente, a distribuição presente no caso de estudo tem tendência a proporcionar encravamentos em maior escala que os restantes casos, visto apresentar elevada percentagem de material com dimensões superiores a 500-600 mm; ao invés, as restantes análises, e tendo em consideração as análises granulométricas indicadas, apresentam distribuições granulométricas onde a maior percentagem encontra-se distribuída entre as dimensões 200/300 – 500mm (alguns casos chegando aos 600 mm, mas em valor menor), dimensões essas que em termos de britagem primária serão mais “recomendáveis” e proporcionaram uma maior produtividade do equipamento de britagem.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

5. Conclusões

O presente trabalho teve como base o estudo da influência da orientação da frente de desmonte em termos de resultado final (granulometria resultante). Nesse sentido foi elaborado um estudo em pormenor em relação ao procedimento de desmonte implementado na pedreira de Fornelo, o qual teve contornos distintos, visto que o paradigma posto em prática é diferenciado do histórico recente. Assim sendo procedeu-se ao levantamento de todos os parâmetros que entendemos estarem diretamente relacionados com a execução e posteriormente com o produto final obtido.

Como conclusões finais deste estudo, destacam-se:

- Em termos geológicos, o maciço intrusivo é composto pela fácies de granito porfiróide de grão grosseiro, nomeadamente biotítico de grão médio ou grosseiro. Trata-se de um maciço de grão médio a grosseiro, onde os minerais constituintes do granito, o feldspato potássico, a plagioclase e o quartzo, surgem sem evidenciarem qualquer simetria à vista desarmada. São visíveis cristais de biotite, e por vezes surgem raros megacristais, em geral com contornos arredondados, de feldspato potássico.
- Em termos de análise geológico-geotécnica do painel em estudo, as principais famílias de descontinuidades com uma amplitude de 20° englobam 44% do total de descontinuidades cartografadas. Tal facto releva a importância do conhecimento profundo de todas as descontinuidades no maciço (diaclasses, 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. Este aspeto é bastante importante relativamente à compartimentação do maciço rochoso local e na definição da fracturação regional do maciço aflorante.
- Relativamente ao processo do desmonte de rocha com recurso a explosivos, este é constituído por diversas operações desenroladas sequencialmente (perfuração, carregamento e detonação), sendo diversos os fatores que condicionam direta e indiretamente a qualidade do desmonte de rocha tendo em conta cada processo, sendo que a qualidade/rentabilidade com cada operação executada depende das anteriores e influencia a seguinte, e por consequente, todo o restante processamento de valorização industrial
- Como foi referido, a qualidade das etapas que surgem associadas ao desmonte condicionam-se direta e indiretamente; assim sendo, no presente estudo analisou-se as referidas etapas, nomeadamente a etapa de perfuração;

- Durante este trabalho de análise, fez-se um acompanhamento em pormenor de todos procedimentos, desde a marcação da furação até execução dos respetivos furos;
 - Após conclusão deste processo, efetuou-se o ensaio *Boretrak* na maioria dos furos (nos quais foi possível realizar o ensaio visto que após a etapa de perfuração e devido à intensa fracturação do local em estudo, acabaram por ficar “encravados” com material); através destes ensaios foi possível verificar o grau de desvios ocorridos durante a furação, apresentando em média 5,25cm por metro perfurado no quadrante X, e 5,77 cm de desvio por metro perfurado relativamente ao quadrante Y.
 - Foi realizado também o ensaio *Laser* à frente livre de desmonte, ensaio esse que permitiu verificar a regularidade/irregularidade da mesma; devido ao paralelismo da orientação da frente de desmonte em articulação à orientação da principal família de descontinuidades, é possível observar alguns planos de falha característicos deste tipo de interação (denominados “lisos”).
 - Os parâmetros de regulação do equipamento de perfuração são bastante importantes, pois permitem ajustar os diversos dispositivos às características do local de furação. Neste tipo de processo, o principal fator condicionante é o operador da máquina, que com a sua experiência como manobrador na atividade de perfurar, a sensibilidade de compreender a correta interação equipamento de perfuração-maçiço a furar, bem como o conhecimento geral desta área, são aspetos importantes a levar em conta e a avaliar
- A articulação entre a orientação da frente de desmonte e da orientação da principal família de descontinuidades desempenham grande importância no resultado final pretendido num desmonte em maciços rochosos;
 - Realizou-se o estudo/análise do produto final correspondente a 5 desmontes, em que os quatro primeiros desmontes identificavam o histórico existente na pedreira de Fornelo, sendo o último exemplo correspondente ao presente projeto, no qual o paradigma principal (orientação da frente de desmonte) foi modificado; Para isso, utilizou-se o *software WipFrag*, *software* este capaz de analisar uma imagem fotográfica, e através dela reproduzir e dimensionar a granulometria de um produto. Neste estudo foi possível verificar as seguintes particularidades:
 - Nos primeiros quatro casos em que a orientação da frente de bancada encontrava-se perpendicularmente à orientação da principal família de

descontinuidades presente no maciço rochoso, a distribuição granulométrica presente é mais suave e de fração mais miúda – isto proporcionará maior rendimento e produtividade, nomeadamente nas etapas de carga-transporte e britagem primária;

- Em termos de granulometria, a última caracterização (caso de estudo) apresenta uma distribuição mais graúda que as demais (40% do material tem granulometria superior a 500 mm), sendo o reverso do ponto anterior;
 - Em termos de material rochoso que necessitará posteriormente desmonte mecânico, as primeiras análises apresentam valores menores (em percentagem), enquanto que o caso de estudo apresenta valor superior a 12% da sua totalidade – numa análise geral, e considerando os casos de maior grandeza, este último caso apresenta aumento de 4 a 9% da quantidade de grandes blocos, o que é prenúncio de menor qualidade na trabalhabilidade do explosivo, assim como do aumento de custos posteriores em desmonte mecânico;
 - Relativamente ao ponto anterior, este aspeto vai não só acarretar aumento de custos de desmonte mecânico, como vai interferir no bom funcionamento das etapas a jusante (nomeadamente carga-transporte e britagem primária), visto que no primeiro, este aspeto vai dificultar os trabalhos da carregadora, bem como dificultar o correto carregamento e condicionamento do material no *Dumper* (devido à imensa heterogeneidade de tamanho de blocos existente, sendo na sua maioria de grandes dimensões), aumentando o tempo de ciclo neste processo; no segundo caso, permitirá a ocorrência em maior escala de encravamentos, sendo necessário a constante paragem da produção, diminuindo a rentabilidade e produtividade deste processo.
- Quanto à etapa de carga-transporte, efetuou-se o estudo do fator de carga do presente projeto: o valor alcançado foi de 1,44 ton/m³; como esclarecemos anteriormente, granulometria resultante tem estreita ligação entre a articulação da orientação da frente de desmonte e as características geológico-geotécnicas do maciço, e o fator de carga é uma condicionante de toda esta interação. Assim sendo, podemos concluir que consoante a “qualidade” deste processo, o valor do fator de carga será distinto, e no caso de estudo aqui presente, esse fator seria superior nos quatro primeiros casos identificados.
 - Outro aspeto considerado neste projeto surge relativamente ao volume de material proveniente do desmonte de rocha com explosivos, que posteriormente necessitará de desmonte mecânico; neste caso, e com auxílio do *software WipFrag*, foi possível verificar que

a interação frente de desmonte-características do maciço contribui para a qualidade em termos de “grandes blocos”.

- Por último, efetuou-se a análise económica do presente projeto, englobando todas as etapas do seu processamento, desde a caracterização geológico-geotécnica até culminar no processo de britagem primária; Em termos gerais, os custos associados para a produção de 1 metro cúbico de material é aproximadamente 6,57€, enquanto que para a produção de 1 tonelada de material o preço é 2,48€, tendo as atividades “Carga e Transporte” e “Britagem Primária” as maiores percentagens de custos efetivos (23.599,20€ e 20.430,00€, respetivamente).

A temática desenvolvida neste projeto poderá merecer estudos futuros. Assim, tendo em consideração os objetivos traçados para este projeto, sugere-se que as investigações a realizar futuramente incidam sobre:

- Abordagem de outros maciços rochosos para obter diferentes cenários geológicos, geotécnicos e geomecânicos para reforçar e avaliar a influência da orientação da frente de desmonte com o resultado granulométrico final;
- Investigar a influência da orientação da frente de desmonte e os desvios de perfuração, e a sua interação com os resultados granulométricos finais;
- Continuar o estudo entre a articulação da orientação da frente de desmonte adotada com as características geológico-geotécnicas do local.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. 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.

Chaminé, H. I., 2013. Geomecânica aplicada. ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto

Chaminé, H. I. & Gaspar, A. F., 1995, Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear. Aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min., Porto, 37: 97-111.

Chaminé, H. I., Afonso, M. J., Teixeira, J., Ramos, L., Fonseca, L., Pinheiro, R. & Galiza, A. C. 2013, Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. European Geologist Magazine, Journal of the European Federation of Geologists 36: 27-33.

Chaminé, H. I., Afonso, M. J., Ramos, L. & Pinheiro, R. 2014. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In Proceedings IAEG XII Congress, Torino. Springer, 6 p.

Dias, A., 2013. Influência dos parâmetros geotécnicos na qualidade do desmonte de maciços rochosos fracturados. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 172 pp. (Tese de Mestrado).

Direcção Geral de Geologia e minas, 1992. Carta Geológica de Portugal, a escala 1: 500 000

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

Fernandes, J. A., 2006. Georrecurso. ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

Ferreira, N., Iglésias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L. (1987) - Granitoides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. Libro Homenaje a L. C. Garcia de Figuerola, Ed. Rueda, Madrid, pp. 37-51.

Ferrer, M. & González de Vallejo, L. [eds.], 1999, Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rochosos en afloramientos. Publicaciones ITGE, Madrid. 81 pp, 41 fotografías.

Franklin, J. A. & Dusseault, M. B. (1991). Rock engineering applications. McGraw-Hill Publishing Company, New York. 431 pp.

Franklin, J. A., Broch, E. & Walton, G. (1971). Logging the mechanical character of rock. Trans. Inst. Min. Metall 80: A1-A9

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: consequência técnico-económicas. In: Gomes Correia A. et al. (eds), Actas do 12 Congresso Nacional de Geotecnia (Geotécnica e Desenvolvimento Sustentável), SPG/UM, Guimarães.

Galiza, A. C., Gomes, C., Bernardo, P. & Chaminé H. I., 2011. Manual do operador de produtos explosivos, 169 pp.

Galiza A.C., Ramos L., Fonseca L. & Chaminé H.I., 2010. Optimização técnico-económica dos processos de extracção e transformação de maciços rochosos fracturados. Portugal Mineral, Revista da Indústria Extractiva, ANIET, 1: 48-53.

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

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

Galiza A.C., Ramos L., Fonseca L. & Chaminé H.I., 2011c. Geomechanical control of jointed rock mass blasting by aligned drilling. In: Holmberg R. (ed.), Lisbon Conference Proceedings 2011, EFEE - European Federation of Explosives Engineers, pp. 271-280.

- Gomes, L., Galiza, A. C. & Vieira, A., 2007. Desmonte de maciços Rochosos I, Versão 2007-2008. ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 167 pp. (Texto não publicado)
- González de Vallego, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. [coords.], 2002. Ingeniería geológica Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- González de Vallego, L. I. & Ferrer, M., 2011. Geological Engineering, 669 pp.
- Goodman, R., 1993. Engineering geology: rock in engineering construction. John Wiley & Sons, New York, 412 pp.
- Griffiths, J. S. & Stokes, M., 2008. Engineering geomorphological input to ground models: A possible approach based on earth systems. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 41, 73-91.
- 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.
- Hudson, J.A. & Harrison J.P., 1997: “Engineering rock mechanics: an introduction to the principles.” Elsevier Science Ltd Oxford, UK.
- Hudson, J. A. & Priest, S. D., 1983, Discontinuity frequency in rock masses Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 20: pp. 73-89.
- Hudson, J. A. & Cosgrove, J. W. 1997. Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34 (3/4): p 136.1-p136.15.
- 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. Sci. & Geom. Abstr., 18: pp. 85-110.
- I.S.R.M. – International Society for Rock Mechanics 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.

Keaton, J. 2013. Engineering geology: fundamental input or random variable?. In J. L. Withiam, K.-K. Phoon, M. Hussein (ed.), *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty: Honoring Fred H. Kulhawy*. ASCE. GSP 229. p. 232-253

Langefors U. & Kihlstrom B., 1978. *The modern technique of rock blasting*. 3rd revised edition. John Wiley and Sons Ltd, New York, 438 pp.

Maerz, N. H., 1996a. Reconstructing 3-D Block Size Distributions from 2-D Measurements on Sections. Proc. ISRM/Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement, Montreal, A. A. Balkema

Maerz, N. H., 1996b. Image Sampling Techniques and Requirements for Automated Image Analysis of Rock Fragments. Proc. ISRM/Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement, Montreal, A. A. Balkema

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

Mazzoccola, D. F., Millar, D. L. & Hudson, J. A. 1997. Information, uncertainty and decision making in site investigation for rock engineering. *Geotechnical and Geological Engineering* 15: 145-180

Medeiros, A. C., Pereira, E. & Moreira, A., 1980. *Carta geológica de Portugal na escala 1/50 000: Notícia explicativa da folha 9-D (Penafiel)*. Ed. Dos S.G.P., Lisboa.

Palangio, T. C., 1985. WipFrag – A new Tool For Blast Evaluation. Proc. 11th Ann. ISEE Symp. On Blasting Research, Nashville, Tennessee, Int. Soc. Explosives Engrs., Vol. 1, pp. 269-285.

Palangio, T. C., Franklin, J. A. & Maerz, N. H., 1995. WipFrag – A Breakthrough in Fragmentation Measurement. Proc. 6th HighTech Seminar on State of the Art Blasting Technology, Instrumentation, and Explosives, Boston, Mass., pp. 943-971.

Palmstrom, A. & Stille, H. 2010. *Rock engineering*. London: Thomas Telford Ltd.

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.

Pereira, J. J. C. P., 1985. *Caracterização geotécnica de maciços rochosos*. Universidade Nova de Lisboa. 404 pp. (Tese de mestrado).

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

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

Ramos, L., 2008. Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 197 pp. (Tese de mestrado).

Rocha, M. 1981. Mecânica das Rochas. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.

Sandvik/Tamrock, 1999. Rock Excavation Handbook. Sandvik/Tamrock.

Sampaio M. J. C., 2006. Processamento de Matérias – Primas Minerais e Resíduos. Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, 214 pp. (Texto não publicado).

Spínola, S., 2000, Movimento de Terras pp. 191-195.

Vidal Romani J.R. e Twidale C.R., 1999. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. *Geomorphology*, 31 (1-4), pp. 13-27.

Sites consultados:

- <http://www.elevogroup.com/pt/> (consultado em 15 de Novembro 2013);
- <http://www.lneg.pt/> (consultado em 18 de Fevereiro 2014);
- <http://www.google.com/earth/> (consultado em 28 de Março 2014);
- <http://www.viamichelin.com/> (consultado em 28 de Março 2014);
- <http://www.metso.com> (consultado em 2 de Abril 2014);
- <http://www.home.sandvik/en/> (consultado em 2 de Abril 2014);
- <http://www.miningandconstruction.sandvik.com/> (consultado em 2 de Abril 2014);

- <http://www.oricaminingservices.com/pt/pt> (consultado em 27 de Janeiro 2015);
- <http://www.wipware.com/> (consultado em 11 de Maio 2016).