

**“A análise de Curvas Granulométricas de material desmontado na
detecção indireta de anomalias de operações de perfuração”**

Tiago André Moreira Gonçalves

Dissertação do MEMG

Orientador:

Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

Coorientador:

Mestre Francisco Sena Leite



Mestrado em Engenharia de Minas e Geoambiente

Porto, Novembro de 2017

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Tel. +351 225 081 986

+351 225 081 960

Fax +351 225 081 448

✉ minas@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351 225 081 400

Fax +351 225 081 440

✉ feup@fe.up.pt

<http://www.fe.up.pt>



O trabalho "A análise de Curvas Granulométricas de material desmontado na deteção indireta de anomalias de operações de perfuração" de Tiago André Moreira Gonçalves e Universidade do Porto está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição-NãoComercial- CompartilhaIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

*Eles não sabem, nem sonham,
Que o sonho comanda a vida,
Que sempre que um Homem sonha,
O Mundo pula e avança.
(...)*

António Gedeão em "Pedra Filosofal".

Agradecimentos

Deixo aqui um agradecimento muito especial ao Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a todos os seus Docentes pelo apoio ao longo deste percurso.

Ao Professor Alexandre Leite, professor deste Departamento e Orientador da presente dissertação o meu profundo agradecimento por todo o tempo disponibilizado, todo o trabalho realizado, e toda a dedicação para que o ciclo de estudos fosse enriquecido e a realização deste trabalho fosse possível.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Francisco Leite e a O-Pitblast, Lda, pela disponibilidade em cooperar com o esclarecimento de todas as dúvidas e com a pronta flexibilidade para fornecer alguns dados para análise.

À Empresa Secil Britas S.A. na pessoa do Engenheiro Diogo Silva e do encarregado Nuno pela facilidade de inclusão na Pedreira, pela autorização de recolha de dados para análise e por toda a elucidação relativamente ao trabalho de campo fornecida pelos mesmos.

Deixo um agradecimento especial á minha família, aos amigos a todos os que me motivaram e num ou outro momento me deram força para tornar o trabalho possível.

Aos meus Pais, pelas suas batalhas, pelos seus sacrifícios, pelas suas dificuldades sempre foram responsáveis pela minha educação e pelo meu crescimento, o meu muito obrigado.

Resumo

A exploração de matéria mineral ou de rocha industrial é uma atividade que acompanha o homem há muitas décadas. Evoluiu graças ao constante estudo e à introdução de novas tecnologias no processo de exploração e tratamento. A presente dissertação aborda possíveis melhorias e otimizações a efetuar durante o processo de planeamento do desmonte, etapas de perfuração e controlo dos respetivos resultados obtidos.

As fases de perfuração, detonação, carga, transporte e britagem têm um custo associado em função da granulometria obtida após o desmonte. A sua otimização melhorando os rendimentos finais da exploração, diminuindo a necessidade de realização de etapas secundárias, significa um melhor aproveitamento do processo de exploração diminuindo os custos associados e aumentando a capacidade de competitividade das empresas no mercado de comércio.

Existindo a possibilidade de análise da granulometria obtida através do recurso a uma fotografia digital, a presente dissertação aborda o contributo da análise foto-granulométrica, através do estudo das curvas granulométricas geradas, como forma de obtenção de erros ocorridos essencialmente durante a perfuração, de modo a controlar o processo e posteriormente gerar metodologias que permitam uma otimização do ciclo de desmonte obtendo um resultado rigoroso com o menor custo associado.

No decorrer da dissertação serão analisados dois casos práticos estudando alguns dados existentes, mas também recolhendo a aquisição de alguns dados de campo. Serão posteriormente enunciadas algumas propostas de melhoria tendo em conta os resultados obtidos durante o trabalho de campo.

“The analysis of granulometric curves of dismantled material in the indirect detection of anomalies of drilling operations”.

Abstract

The exploration of mineral matter or industrial rock is an activity that has accompanied man for many decades. It evolved thanks to constant study and the introduction of new technologies in the exploration and treatment process. The present dissertation discusses possible improvements and optimizations to be made during the planning process of the dismantling, drilling stages and control of the respective results obtained.

The phases of drilling, detonation, charging, transport and crushing have an associated cost depending on the granulometry obtained after dismantling. Its optimization by improving the final yields of the exploration, reducing the need to carry out secondary steps, means a better exploitation of the exploration process, reducing the associated costs and increasing the competitiveness capacity of the companies in the trade market.

With the possibility of analysis of the granulometry obtained through the use of a digital photograph, the present dissertation approaches the contribution of the photo-granulometric analysis, through the study of the granulometric curves generated, as a way to obtain errors occurred essentially during the drilling, so to control the process and later to generate methodologies that allow an optimization of the dismantling cycle obtaining a rigorous result with the lowest associated cost.

During the dissertation two practical cases will be analyzed by studying some existing data, but also collecting the acquisition of some field data. Some improvement proposals will then be enunciated taking into account the results obtained during the field work.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento e objetivos.....	1
1.2.	Metodologia	3
2.	O desmonte de rocha envolvendo o uso de explosivos.	5
2.1.	O desmonte de Rocha	5
2.2.	Variáveis do maciço rochoso que interferem com a perfuração e fragmentação de rocha.....	7
2.2.1.	Classificação Geológica	9
2.2.2.	Classificações Geomecânicas	9
2.2.3.	Métodos de exploração e desmonte de Rocha.....	10
2.2.4.	Propriedades dos explosivos.....	13
2.2.5.	A energia do explosivo	16
2.2.6.	Principais explosivos comercializados	20
2.2.7.	Detonadores	22
2.3.	Furação.....	23
2.3.1.	Métodos de furação	23
2.3.2.	Ciclo de furação.....	28
2.3.3.	Erros da perfuração.....	29
2.3.4.	Fatores não desejados (erros) oriundos do processo de perfuração.....	31
2.3.5.	Importância do controlo da direção, inclinação e profundidade dos furos na perfuração	32
2.4.	Metodologia para verificação da geometria da furação – o método “ <i>Boretrak</i> ” 34	
2.5.	Influência da posição final dos furos em relação aos furos “ideais”.	35

2.6.	Planeamento do diagrama de fogo.....	37
2.6.1.	Parâmetros diagrama de fogo	38
3.	Análise foto-granulométrica do material fragmentado.....	41
3.1.	Fragmentação	41
3.2.	Modelo <i>Kuz-Ram</i>	42
3.2.1.	Equação de Kuznetsov.....	43
3.2.2.	Equação de Rosin – Rammmler	43
3.2.3.	Índice de uniformidade	44
3.2.4.	Rock Factor	45
3.3.	Influência do desmonte na granulometria obtida.....	49
3.4.	Análise Foto-granulométrica	49
3.4.1	<i>Software</i> de análise de imagem “ <i>WipFrag</i> ”	51
4.	Caso de estudo	53
4.1.	Desmonte O-Pitblast, Lda.....	53
4.2.	Pedreira Secil Britas S.A.	63
4.2.1.	História	63
4.2.2.	Localização	65
4.2.3.	Principais matérias-primas produzidas.....	66
4.2.4.	Descrição do processo de exploração	68
4.2.4.1.	Estado geral das frentes de escavação	68
4.2.4.2.	Irregularidades das plataformas.....	69
4.2.5.	Características do desmonte.....	70
4.2.6.	Desmonte Abril 2017	73
4.2.7.	Resultados obtidos e propostas de melhoria.	83

5.	Alguns problemas inerentes ao processo de determinação de curvas granulométricas por análise de imagem. Eventuais trabalhos para futuro.	87
5.1.	Comparação de resultados resultantes de diversos <i>softwares</i> de análise de imagem	87
5.1.1.	A questão da representatividade	88
5.1.2.	A questão forma das partículas.....	88
5.2.	Estabelecimento de protocolos amostrais	89
5.2.1.	Promoção de movimentos da pilha de material desmontado	90
5.2.2.	Separação de matérias da pilha por calibres <i>in situ</i>	91
6.	Conclusões.....	93
7.	Referencias	95
8.	Anexo I	97

Índice de Figuras

Figura 1 – Os processos de perfuração e explosão influenciam todas as fases seguintes. [1]	2
Figura 2 - Critério de otimização do desmonte em função do grau de fragmentação.	5
Figura 3 – Consequências da geração de granulometrias indesejadas. [11]	7
Figura 4 – Diagrama ilustrativo da complexidade dos parâmetros geológicos. [2]	8
Figura 5 - Exemplo típico da distribuição de explosivos num furo de uma pega de fogo. [3]	14
Figura 6 - Influência da distribuição de NA e FO na Velocidade de Detonação. [11]	17
Figura 7 - Influência do Diâmetro do furo na Velocidade de Detonação. [11]	18
Figura 8 - Diferentes curvas de P-V em dois explosivos com a mesma energia. [11]	19
Figura 9 - Exemplo das características técnicas de um explosivo. [4]	20
Figura 10 - Explosivo ANFO. [5]	21
Figura 11 – Detonador eletrônico. [6]	23
Figura 12 - Exemplos de Perfuradora com martelo Top Hamer (esquerda) e Martelo Fundo de Furo (direita). [7]	24
Figura 13 – Exemplar de Perfuradora em bancada. [8]	25
Figura 14 – Exemplo de <i>bit</i> para martelo de superfície (Esquerda) e martelo de fundo de furo (Direita). [8]	27
Figura 15 – Exemplo <i>bit</i> furação. [8]	27
Figura 16 – Representação do ciclo de furação. [18]	28
Figura 17 – Dimensões e ângulo de trabalho de uma perfuradora. [8]	29
Figura 18 - Principais erros associados à perfuração. [10]	30
Figura 19 - Erros de direção e inclinação e comprimento dos furos.	30
Figura 20 – Importância do controlo da perfuração. [8]	32

Figura 21 - Verificação de inclinação de coluna de perfuração com inclinômetro digital.	33
Figura 22 - Níveis de bolha no controlo da inclinação de colunas de perfuração.....	33
Figura 23 – Exemplar de <i>Boretrak</i> . ^[9]	34
Figura 24 - Raio de influência de cada furo ao nível da soleira condicionado pelo desvio dos furos. ^[27]	36
Figura 25 - Raio de influência de cada furo ao nível da soleira na situação ideal sem desvios. ^[27]	36
Figura 26 – Representação das variáveis controláveis de um desmonte. ^[3]	38
Figura 27- Relação Inclinação do furo com a Subperfuração. ^[11]	39
Figura 28 – Esquema ilustrativo da influência entre variáveis geométricas do diagrama de fogo. ^[11]	40
Figura 29- Imagem ilustrativa do taqueio de blocos de grandes dimensões após a realização do desmonte com recurso a explosivos.	41
Figura 30- Efeito da relação entre o espaçamento entre furos e o espaçamento entre descontinuidades na fragmentação por explosivo. ^[11]	47
Figura 31 - Fatores de Rocha para alguns tipos de rocha e respetivo comportamento face ao rebentamento. ^[11]	48
Figura 32 – Exemplo de imagem obtida após desmonte com recurso a explosivos. (Pedreira Secil, Penafiel, 2017)	51
Figura 33 – Pilha de desmonte analisada no “WipFrag”	54
Figura 34 – Curva granulométrica com distribuição das classes no desmonte do flanco direito.....	55
Figura 35 – Parâmetros relativos ao desmonte.....	55
Figura 36 - Representação das curvas granulométricas real e teórica do flanco direito	56
Figura 37 - Parâmetros do furo analisado.....	57
Figura 38 - Esquema virtual direções e inclinações do furo.	57
Figura 39 - Curva granulométrica com distribuição das classes no desmonte do flanco esquerdo.....	58

Figura 40 - Parâmetros relativos ao desmonte.....	59
Figura 41 - Representação das curvas granulométricas real e teórica do flanco esquerdo.	59
Figura 42 - Parâmetros do furo analisado.....	60
Figura 43 - Esquema virtual direções e inclinações do furo.	60
Figura 44 – Representação da frente livre esperada.	61
Figura 45 - Representação da frente livre real.....	61
Figura 46 – Apresentação da empresa. ^[12]	64
Figura 47 - Localização geográfica da pedreira.	65
Figura 48 – Localização geográfica da pedreira.....	65
Figura 49 – Vista geral da pedreira.	66
Figura 50 – Estado das frentes de desmonte.....	68
Figura 51 – Estado da plataforma no local da perfuração.	69
Figura 52 – Perfuradora Atlas Copco ROC D9.....	70
Figura 53 – Explosivos utilizados no desmonte.	72
Figura 54 – Fotografia da pilha após desmonte da bancada superior.....	73
Figura 55 – Fotografia da pilha desmontada.	73
Figura 56 - Representação da análise foto-granulométrica do desmonte.....	74
Figura 57 – Representação da análise foto-granulométrica do desmonte.	74
Figura 58 – Análise da curva granulométrica com distribuição das classes.	75
Figura 59 – Representação das curvas granulométricas real e teórica.	75
Figura 60 - Parâmetros relativos ao desmonte.....	76
Figura 61 - Representação das curvas granulométricas real e teórica.	77
Figura 62 - Análise da curva granulométrica com distribuição das classes.	77
Figura 63 - Parâmetros relativos ao desmonte.....	78

Figura 64 - Análise da curva granulométrica com distribuição das classes.	78
Figura 65 - Representação das curvas granulométricas real e teórica.	79
Figura 66 - Parâmetros relativos ao desmonte.....	79
Figura 67 - Análise média da curva granulométrica com distribuição das classes.	80
Figura 68 – Representação das curvas granulométricas da média real e teórica.....	80
Figura 69 - Parâmetros relativos ao desmonte.....	81
Figura 70 – Colocação de blocos de grande dimensão.....	82
Figura 71 - Efeitos no processo de furação da existência de “repés” no piso de uma bancada. ^[24]	85
Figura 72 – Interior de uma perfuradora com sistema Robit instalado.	86
Figura 73 - Efeito da posição da partícula relativamente ao plano de observação e sua implicação na análise dimensional da mesma.	89
Figura 74 – Movimento de material desmontado em pilha, homogeneizando o seu conteúdo e oferecendo superfícies sucessivas da pilha com probabilidade de melhor representatividade dos calibres dos materiais que a constituem. ^[21]	90
Figura 75 – Segregação dos blocos maiores. ^[22]	91
Figura 76 – Sequência de formação das fileiras de material passante em 25 mm. ^[22] ...	92
Figura 77 - Modelo digital de terreno da pedreira da Madalena, situada em Canidelo- Vila Nova de Gaia.	98
Figura 78 – Equipamento leitura <i>laser</i>	98
Figura 79 - Esquema de operação de levantamento com perfilómetro laser sobre frente livre de bancada de pedreira. ^[26]	99
Figura 80 - Ficheiro de dados importados com valores de coordenadas X, Y e Z relativos a levantamento sobre terreno de pedreira (Plataforma O-Pitblast).....	100
Figura 81 - Modelo digital de terreno de uma frente livre em bancada de pedreira a céu-aberto.	100
Figura 82 - Pega de fogo projetada para o desmonte de um certo volume de rocha....	101
Figura 83 - Ícones de aquisição de dados de Boretrak na Plataforma O-Pitblast.....	102

Figura 84 - Sistema Boretrak – Por cabo e por barras – Capas de catálogos da Boretrak	102
Figura 85 - Imagem de geometrias e furos projetados e realmente implementados. ...	102
Figura 86 - Vistas de um dos furos da pega de fogo.	103
Figura 87 - Perfis de afastamentos entre furos e a frente livre que lhes está próxima.	103
Figura 88 - Fluxograma da Execução de um Desmonte com Recurso a Explosivos. ^[27]	104

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas de furação hidráulico e pneumático. ^[10]	26
Tabela 2 - Efeitos da má inclinação da coluna de perfuração em bancada.	31
Tabela 3- Valores de RMD. ^[11]	45
Tabela 4- Valores de JFC. ^[11]	46
Tabela 5- Valores de JPS. ^[11]	46
Tabela 6- Valores de JPA. ^[11]	47
Tabela 7 - Valores de HF. ^[11]	48
Tabela 8 – Principais produtos comercializados.	67
Tabela 9 – Parâmetros do desmonte.	71
Tabela 10 – Diâmetro teórico dos furos	84

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos

Ao longo do tempo, as técnicas de desmonte e fragmentação de rocha para diversos fins tem sofrido constante evolução em termos de metodologias, técnicas utilizadas e ferramentas ao dispor das empresas e técnicos vocacionados para a realização destas atividades.

Para qualquer empresa ou instituição, o trabalho de análise económica, previsão comercial e uma correta caracterização de resultados obtidos com a sua atividade, são fundamentais para o bom desempenho das atividades a planear. E esse bom desempenho só será permanentemente obtido através de processos, também eles de carácter permanente, de tentativa de otimização de todos os elos da cadeia produtiva.

O homem e as suas necessidades, no contexto de tentativas de otimização dos processos produtivos, obrigam-se a uma adaptação constante das técnicas e tecnologias de desmonte em função da variabilidade do contexto geológico do recurso em exploração, recorrendo à oferta oriunda da modernização tecnológica que cada vez mais se encontra em processo de aceleração.

Com a forte competitividade empresarial ao nível de qualidade e quantidade dos produtos finais da cadeia produtiva, as atividades de planeamento, previsão temporal dos projetos e custos associados, são sucessivamente maiores sendo possível observar cada vez mais um forte investimento das empresas nessas atividades de modo a poderem planear melhor as suas participações nesses projetos e consequentemente apresentar orçamentos mais vantajosos no mercado cada vez mais global da indústria extrativa.

Mas estas atividades de análise global nunca podem ter lugar sem uma análise de pormenor sobre todas as operações elementares que constituem o processo produtivo, definidas pela capacidade de discretização, da atividade global em atividades elementares, que os técnicos envolvidos sejam capazes de obter. Isto porque todo o processo de otimização global só poderá ocorrer através da otimização de cada uma dessas operações elementares em jogo. A complexidade do todo será otimizada através da otimização de cada parcela, necessariamente menos complexa que esse todo.

Nos processos de desmonte e consequente fragmentação dos maciços rochosos, existem diversos fatores que influenciam a granulometria final do material obtido. Para uma melhor previsão de qualidade do desmonte é necessário um estudo pormenorizado de todas as variáveis em questão, sendo que com base na análise desses fatores, é possível um melhor planeamento de circuitos de carga e transporte e processos de fragmentação subsequente ao desmonte, minimizando atividades indesejadas secundárias realizadas após o desmonte de rocha.

Alguns parâmetros que influenciam o desmonte são oriundos da atividade de furação, necessária quando se determina o desmonte recorrendo ao uso de explosivos industriais. Tendo em conta diversos fatores que resultam da furação, como por exemplo os desvios e a subfuração, a granulometria final obtida para o material desmontado é algo diferente da granulometria esperada, sendo necessário, por exemplo, atividades secundárias para fragmentação de blocos de grande porte, o que virá a implicar dispêndio de tempo, necessidade de aquisição de maquinaria própria com todo um conjunto de custos associados.



Figura 1 – Os processos de perfuração e explosão influenciam todas as fases seguintes. ^[1]

Deste modo, e como foco central para a realização desta dissertação, propomo-nos desenvolver uma eventual metodologia de análise das influências de fatores não desejados oriundos do processo de furação (ex. desvios, subfuração, sobrefuração, posição de emboquilhamento), que possam contribuir para um desfasamento entre as curvas granulométricas do material desmontado relativamente às curvas granulométricas previstas através de processos empíricos *standard* recorrentemente usados para esse fim.

Daremos particular ênfase às técnicas de análise de imagem que se encontram em desenvolvimento atual para a obtenção de curvas granulométricas do material desmontado em pilha. Esta ênfase resulta da disponibilidade de *software* credenciado existente para esse desiderato, que recorre à análise de imagem através de fotografias obtidas sobre as pilhas de material desmontado. Esta análise é denominada ao longo desta dissertação como sendo uma análise foto-granulométrica.

1.2. Metodologia

Para a realização desta dissertação de mestrado, foi escolhida uma metodologia que, à partida, se perspectivava ser garantia de resultados finais práticos e que poderiam ser apresentados sob a proposta de processo metodológico a extrapolar para as mais diversas atividades de desmonte de rocha recorrendo a explosivos.

Assim, optamos por, numa primeira parte da dissertação, apresentar uma abordagem teórica ao problema estabelecido, envolvendo conceitos relacionados com o comportamento mecânico dos maciços rochosos e procedimentos técnicos relativos ao processo de desmonte. Algum enfoque é feito sobre a problemática relativa aos fatores não desejados oriundos do processo de furação. Ainda nesta parte, apresentam-se os princípios inerentes a um processo comum de determinação das curvas granulométricas a partir de diversos parâmetros intrínsecos ao maciço rochoso e à metodologia de desmonte.

Numa segunda parte, propomo-nos expor os resultados de dois Estudos de Caso onde se procurou levar à prática a análise descrita anteriormente. Estes estudos comportaram a obtenção e tratamento dos dados oriundos de duas fontes distintas, numa tentativa de validação cruzada de eventuais conclusões que permitissem estabelecer procedimentos que conduzissem a processos de otimização do processo de furação. No final desta dissertação, gostaríamos de poder relacionar a granulometria dos desmontes observados com possíveis desvios ocorridos durante a fase da furação.

Assim, esta metodologia tem como objetivo principal permitir interpretar o modo como a granulometria observada no desmonte, por comparação com a prevista teoricamente, poderá estar associada a erros inesperados como desvios observados após a realização da etapa de furação no ciclo de desmonte de rocha a céu aberto.

2. O desmonte de rocha envolvendo o uso de explosivos.

2.1. O desmonte de Rocha

Entende-se por desmonte de rocha, um conjunto de atividades que conduzem à obtenção de parte da Crusta Terrestre para um determinado fim definido à partida.

É uma das primeiras atividades necessária e fundamental, tendo em vista a economia de tempo e recursos, é aquela que conduz a um melhor conhecimento geológico e geotécnico desse maciço rochoso.

Quanto maior e melhor for o conhecimento geológico de um dado maciço rochoso, melhor poderá ser projetado o processo de desmonte que conduza ao destaque de parcelas desse maciço por forma a se obter material ao qual se possa acrescentar mais-valia em processos subsequentes ao desmonte, tendo em vista superar uma carência detetada na sociedade. Diríamos que, inerente às ações de Engenharia de Minas na indústria extrativa, estão os conhecimentos das denominadas Ciências da Terra, em particular os da Geologia.

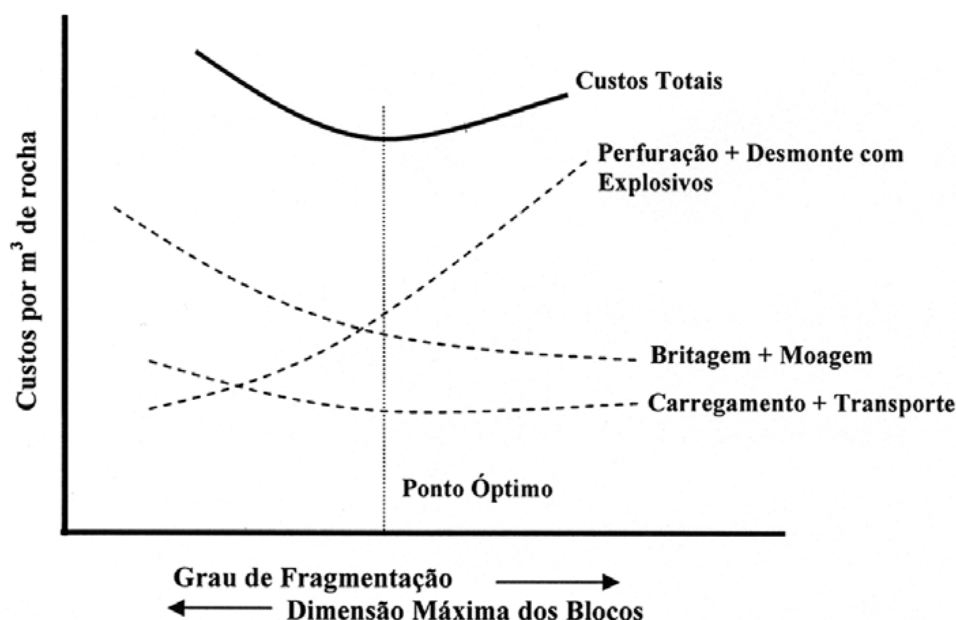


Figura 2 - Critério de otimização do desmonte em função do grau de fragmentação.

A figura anterior, figura 2, relaciona três parâmetros importantes no desmonte de rocha com recurso a explosivos, o grau de fragmentação, a dimensão máxima dos blocos, e o custo por metro cubico de rocha desmontada.

O grau de fragmentação está relacionado diretamente com a dimensão máxima dos blocos obtidos no desmonte. Quanto maior for o grau de fragmentação da rocha desmontada menor a dimensão máxima de blocos obtida. Este é um aspeto importante, sobretudo no desmonte de rocha em pedreira para produção de areias e britas, mas, no entanto, devemos realçar que, neste caso, o custo associado por metro cubico de material desmontado também irá ser superior. O mesmo acontece quando o grau e fragmentação é baixo. Neste caso, ocorrerão maiores quantidades de calibres de material de maior dimensão. Mas aqui, o aumento de custo por metro cubico de material obtido virá associado diretamente a custos dos processos de britagem primária e secundária. Naturalmente que outros custos surgirão por efeitos em cadeia, nomeadamente em desvios do ótimo no elo de carga e transporte que antecede este da britagem.

Existe então um ponto ótimo, onde os custos totais serão mínimos, que é uma tentativa de controlo intermédio dos aspetos de perfuração, desmonte, carregamento de explosivos, carga e transporte de modo a que os sejam obtidos graus de fragmentação desejados, sem a existência de blocos de grandes dimensões e grandes quantidades de finos, tornando os custos associados ao desmonte o mais reduzido possível. Este ponto é designado por calibre de corte, onde está definido o grau de fragmentação, tendo em conta a curva granulométrica gerada e o volume de blocos de grandes dimensões produzidos.

Em particular, e inserindo-nos no tema escolhido para esta dissertação, o desmonte recorrendo ao uso de explosivos industriais, é constituído por um conjunto vasto de atividades subsequentes à caracterização do maciço, tendo como resultado final a obtenção de pilhas de material mais ou menos disperso em praças de bancadas.

Ora, a quantidade de material obtido nas diversas classes granulométricas de material desmontado recorrendo a explosivos industriais, apresenta-se como um fator com elevado peso quando se pretende otimizar os processos subsequentes de carga, transporte e fragmentação.

Reis (2016) realça esta importância na sua dissertação, como é possível conceptualizar no diagrama de conceitos da Figura 3.

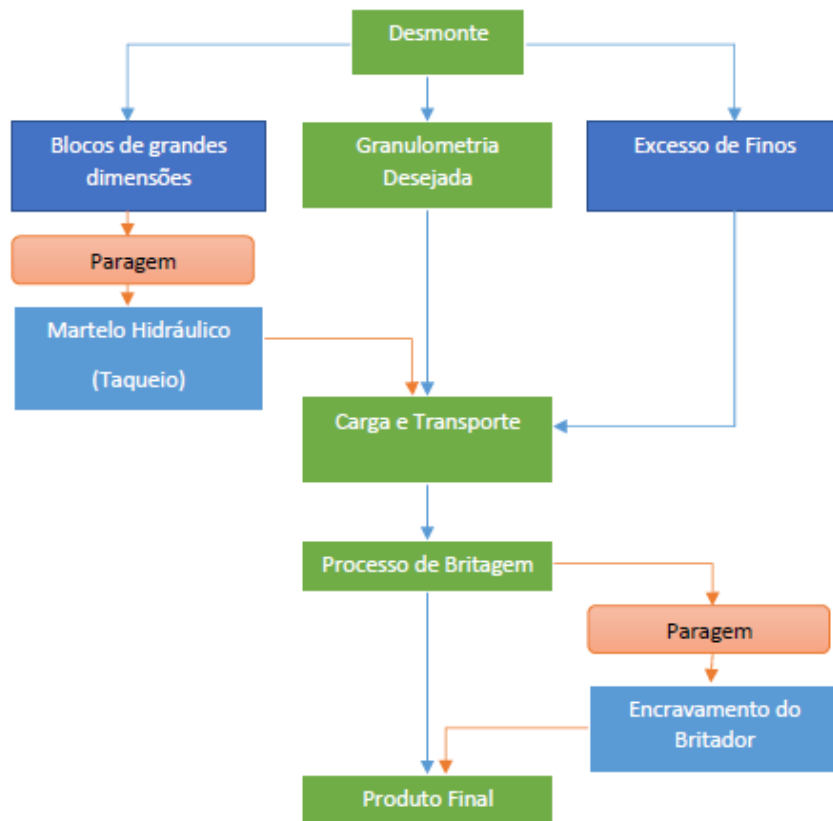


Figura 3 – Consequências da geração de granulometrias indesejadas. ^[11]

2.2. Variáveis do maciço rochoso que interferem com a perfuração e fragmentação de rocha.

A classificação de maciços rochosos tem por base um conhecimento prévio, tendo em conta diversos fatores e informações obtidas através de um estudo pormenorizado e rigoroso sobre um determinado espaço geológico. As principais informações recolhidas sobre um determinado maciço rochoso são a geologia do local, a geotecnia, hidrologia e hidrogeologia, a petrologia, mineralogia e composição química. A classificação de um maciço rochoso pode ser realizada tendo em conta os parâmetros e dados existentes (maioritariamente obtidos in-situ), mas também ajustada ao fim a que se destina. As classificações geológicas e geomecânicas são os dois principais grupos de classificação de um dado maciço rochoso, sendo que o grupo mais frequentemente usado em processos que se destinam ao desmorte, é o grupo de classificação geomecânica. Dependendo das características geomecânicas do maciço rochoso, determinadas através de inúmeros meios em que não se excluem os meios geofísicos, ditos indiretos, e outros meios que podem mesmo ditar a obtenção de provetes e respetivos ensaios laboratório, assim se

determinará qual o método técnico a usar para operacionalizar o desmonte desse maciço rochoso. Ver Figura 4.

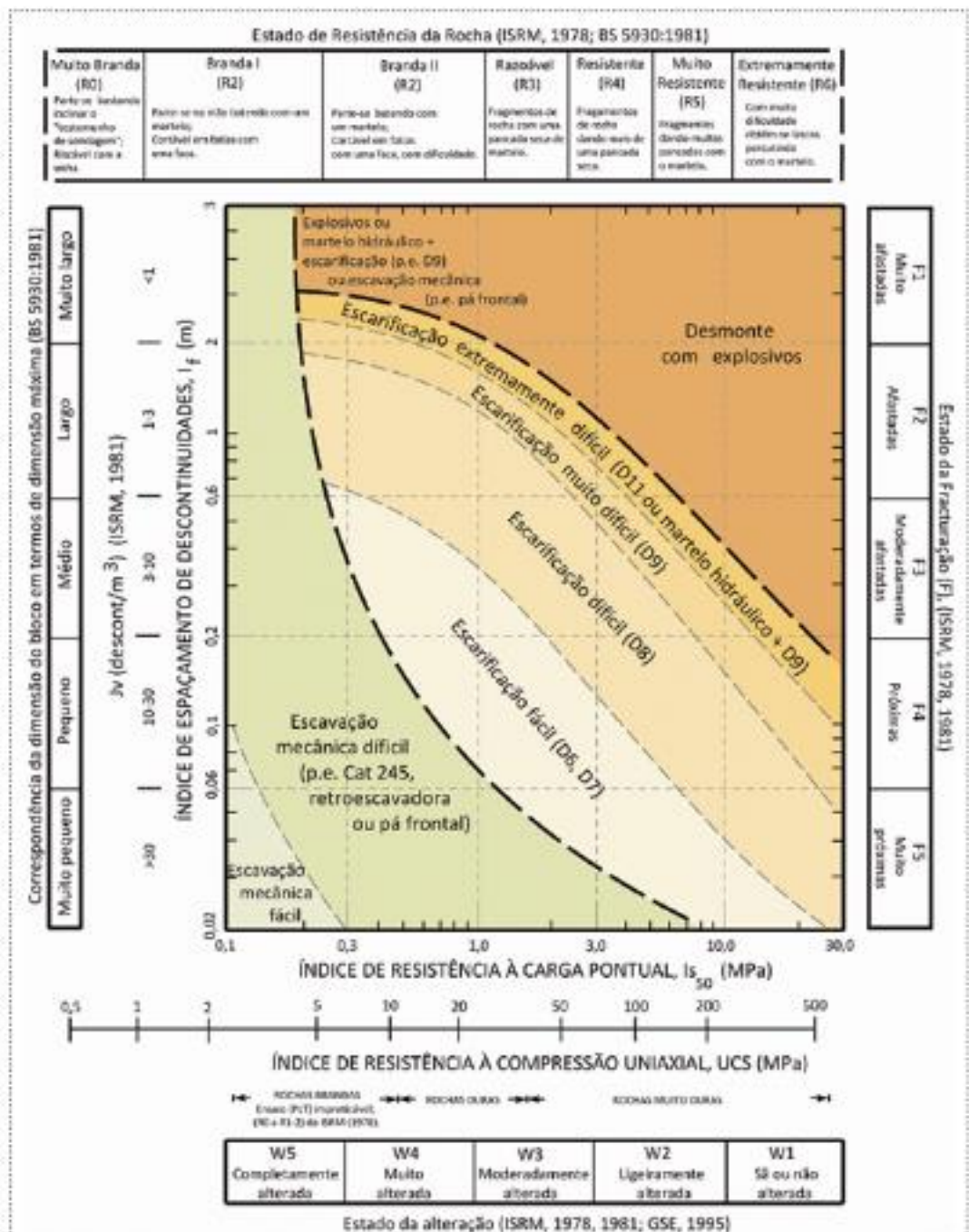


Figura 4 – Diagrama ilustrativo da complexidade dos parâmetros geológicos.^[2]

2.2.1. Classificação Geológica

A classificação geológica de um maciço rochoso é uma classificação mais simples, muitas vezes considerada uma classificação visual uma vez que se baseia essencialmente em dados recolhidos e ensaios *in-situ*.

Devido ao seu elevado grau de simplicidade, este tipo de classificação não é normalmente conclusivo, pelo que é acompanhada de uma classificação geomecânica para melhor definição do maciço.

O principal parâmetro a ser determinado nesta classificação é o tipo de rocha, sendo complementado com diversas informações mineralógicas e petrográficas. Eventualmente, estas poderão ser completadas com alguma informação da dinâmica tectónica que afetou o maciço. Após o conhecimento do tipo de rocha é necessário a realização de diversos ensaios para complementar a classificação, pois o tipo de rocha ou rochas presentes num dado maciço rochoso não é conclusivo para uma caracterização rigorosa uma vez que o mesmo tipo de rocha pode, em circunstâncias diferentes, apresentar comportamentos distintos que determinam a sua génese e a sua vida geológica. É necessário então a determinação e registo de informações complementares como o número e família das fraturas presentes, suas direções e inclinações, densidade e dimensão média de afastamento, grau de preenchimento, índice de atrito das superfícies de fratura, etc.

2.2.2. Classificações Geomecânicas

Após a determinação das características geológicas de um determinado maciço rochoso, e para melhor complementar a classificação do mesmo, é necessária a determinação de parâmetros geomecânicos.

Os parâmetros de classificação geomecânica de um dado maciço rochoso sofreram algumas alterações ao longo dos anos. Diversos autores apresentaram diferentes formas de determinar diferentes parâmetros de classificação geomecânica de um maciço rochoso. Uma das primeiras classificações que há registo consta do ano de 1879 onde RILTTER apresentou uma das primeiras propostas de classificar massas rochosas. Após esta data, em que RILTTER apresentou classificação de rocha através da interligação das características de um maciço com a construção de alguns tuneis e posteriores métodos de suporte realizados no interior, foram apresentadas diversas outras classificações como Terzaghi (1946), Wickham (1972), Rocha (1976) e Hoek (1994), onde através de formas diferentes, todos apresentam formas de determinação de parâmetros distintos com o intuito de classificar geomecânicamente um maciço.

Alguns destes parâmetros são fundamentais na determinação da granulometria prevista para um desmonte com o recurso a explosivos, uma vez que muitos deles, e em particular o grau de fracturação do maciço, diminuirão a eficácia do explosivo utilizado no processo de fragmentação procurado.

2.2.3. Métodos de exploração e desmonte de Rocha.

No que respeita aos conceitos fundamentais da exploração, torna-se importante definir o que se entende por exploração e quais os tipos de exploração de rocha existentes, introduzindo o conceito de método de exploração e por último o de método de desmonte.

Exploração é a atividade posterior à prospeção e pesquisa, abrangendo o reconhecimento, a preparação e a extração do minério bruto, do solo ou subsolo, bem como o seu tratamento e transformação, quando processados em anexos mineiros (LNEG, 1999). Esta pode ser de quatro tipos:

- Subterrânea;
- A céu aberto;
- A partir de perfurações;
- Hidráulica.

Neste momento, a nomenclatura associada à atividade mineira de retirar material da Crusta Terrestre tem vindo a ser reescrita, sendo já muito comum vê-la referida como extração, reservando o termo exploração para a globalidade da atividade mineira, incluindo nela a prospeção, extração, preparação de minérios e restantes atividades de encerramento, preservação ambiental e recuperação paisagística.

Uma atividade extrativa é considerada uma exploração subterrânea quando as escavações realizadas para a extração do minério não estão em contacto direto com o ar livre, encontrando-se rodeadas pelos terrenos do subsolo. Por consequência, a exploração diz-se a céu aberto quando as escavações realizadas para a exploração do minério estão em contacto direto com o ar livre. É o caso das pedreiras e minas a céu aberto.

A exploração por perfuração acontece quando o jazigo, embora subterrâneo, é explorado sem necessidade de se abandonar a superfície, por exemplo a partir de furos como o caso de algumas explorações por lixiviação *in-situ* de minerais uraníferos, dissolução de sal-gema e extração de petróleo.

Já a exploração hidráulica, que pode ser tanto subterrânea como a céu aberto, consiste em utilizar a força hidráulica (essencialmente água) nas frentes de trabalho para o desmonte do minério. Naturalmente que este método estará fortemente condicionado pelo comportamento geomecânico do maciço rochosos e pela tecnologia disponível para a produção de pressões hidráulicas suficientes para operacionalização do desmonte.

O método de lavra pode então ser definido como o conjunto de processos utilizados e soluções adotadas para a remoção da substância útil contida numa fração da Crusta Terrestre. Este conceito é mais geral que o método de desmonte pois engloba muitos outros elementos fundamentais que surgem em paralelo com as denominadas Operações Auxiliares Mineiras:

- Domínio dos terrenos;
- Apoio topográfico;

- Esgoto de água;
- Fornecimento de energia;
- Higiene e Segurança;
- Tipo de preparação;
- Posição das vias de transporte;
- Forma, extensão, orientação e sentido de progressão da frente de desmonte;
- Modo de evacuação dos produtos;
- Tratamento dos vazios da exploração;

Uma vez compreendidos os conceitos de método de exploração e método de desmonte, torna-se fundamental compreender os princípios e regras fundamentais que regem a exploração mineira.

Foram definidos alguns princípios fundamentais para a realização de uma exploração mineira em moldes modernos e globalmente otimizados, a saber:

- Segurança;
- Economia;
- Bom aproveitamento do jazigo.
- Proteção Ambiental;

A segurança é o primeiro, fundamental e o mais importante princípio fundamental de uma exploração a respeitar ("*safety first*"), estando relacionada com o princípio atrás referido. Desejando que uma exploração possa decorrer com normalidade e eficiência, os trabalhadores deverão sentir-se seguros e com condições que lhes permitam desempenhar os trabalhos adequadamente. Caso tal não aconteça, resultará numa menor otimização do trabalho com o consequente aumento dos custos de exploração, o que vai contra outro dos princípios enunciados.

A economia é um princípio fundamental já que um jazigo só será explorável se a globalidade do processo de exploração for rentável. Deste modo há que dedicar particular atenção a todos os fatores suscetíveis de se traduzirem em redução dos preços de custo do minério extraído, como sejam por exemplo, a boa organização e otimização do trabalho e a procura de melhores soluções técnicas nos diversos elos da cadeia produtiva, tentando valorizar cada vez mais o produto comercializado de forma a competir com o mercado internacional.

O bom aproveitamento do jazigo é importante pois não se deve esquecer que a indústria mineira se caracteriza pelo esgotamento progressivo do seu objeto. Tal significa que a riqueza mineral, salvo raras exceções, não se regenera em tempo útil, sendo, por conseguinte, esgotável. É então indispensável que a boa técnica mineira se baseie no bom aproveitamento dos jazigos. Para tal é necessário ter em consideração inúmeros aspetos resumidos nas regras fundamentais da exploração enunciadas. Aqui é de realçar que os recursos minerais do subsolo são recurso do chamado domínio público, pelo que é dever de todas as entidades envolvidas na sua extração, tudo fazerem para o seu integral aproveitamento. Se tal não acontecer, poderá inviabilizar-se a sua futura recuperação.

No que diz respeito à proteção ambiental, é cada vez mais essencial em qualquer projeto de exploração mineira, ter em conta o denominado conceito de desenvolvimento sustentável na medida em que é necessário preservar o meio que nos rodeia para as gerações seguintes. Por conseguinte qualquer plano de lavra deverá adotar medidas e sistemas de proteção do ambiente, bem como um plano de recuperação ambiental e paisagística (PARP) que será executado após a vida útil de extração de minério.

Podem-se assim definir um conjunto de regras de uma boa prática mineira:

- Equilíbrio entre os princípios fundamentais;
- Boa aplicação do método de exploração;
- Economia global;
- Minimização de custo de operações diferentes;
- Aperfeiçoamento permanente;
- Aproveitamento racional das condições naturais.

Após uma análise inicial dos quatro princípios fundamentais anteriormente enunciados poderá obter-se a conclusão de que atuam em sentido inverso, já que uma exploração com um índice de segurança muito rigoroso pode ser cara e de mau rendimento, ou então que uma extração muito económica pode ser perigosa para os seus trabalhadores e ambientalmente opressiva. Sendo que no final pode-se referir que uma das características que melhor define a perfeição de uma exploração mineira é o grau de equilíbrio conseguido entre aqueles os quatro princípios fundamentais.

A melhor escolha e a melhor aplicação dos métodos de exploração são importantes, sendo considerado bom método todo aquele que é seguro, tenha um bom rendimento económico, aproveite o jazigo de forma rentável e proteja o meio ambiente circundante.

Em termos gerais da economia de uma exploração, a visão global de todo o processo produtivo é importante na medida em que qualquer tentativa exagerada de minimização de custos numa dada operação poderá refletir-se de uma forma negativa numa operação subsequente. Deste modo o esforço tendente à redução do preço de custo do produto deve ser feito de um modo geral considerando o circuito global e não apenas uma só das suas partes.

Em todo o mundo empresarial, a capacidade de melhoramento de condições de trabalho e aperfeiçoamento/modernização/otimização permanentes são sem dúvida regras a ter em consideração e que se repercutirão nos processos técnicos produtivos das empresas. O ramo mineiro da indústria, não poderá nunca ignorar estes aspetos, tanto mais por lidas como matérias-primas naturais, o que o distingue da maioria de outros ramos da indústria. A atualização e modernização na indústria extrativa, quando comparada com a atualização e modernização de outras indústrias, podem ser consideradas, em algumas particularidades, de elevado grau, sendo mesmo em alguns casos motor de desenvolvimento importado para outros setores. Basta considerar, por exemplo, a rápida eliminação de passivos ambientais herdados do passado que tem ocorrido recentemente em Portugal.

O aproveitamento inteligente de fatores naturais, como características mecânicas, geológicas ou estruturas ocorrentes na área do jazigo, pode determinar substancialmente as economias, caso sejam tomadas em consideração na aplicação cuidada do método de exploração.

2.2.4. Propriedades dos explosivos

Nesta dissertação, a metodologia de desmonte de rocha considerada é a que recorre ao uso de explosivos industriais e respetivos artefactos passíveis de, quando acionados/detonados, produzirem energia suficiente para a fragmentação da rocha. Daí que se afigurou importante para nós o estudo das características de algum deste material disponível no mercado, considerando os diversos tipos e artefactos associados, suas propriedades, energias desenvolvidas aquando da detonação, metodologias de escolha, etc. E fazemos a sua apresentação antes das considerações relativas à atividade de perfuração, uma vez que esta última, embora como atividade anteceda a de carregamento de explosivos, será um ponto central de atenção do nosso trabalho.

Com a utilização de métodos de desmonte com recurso a explosivos, estes tornam-se um ponto essencial na criação do projeto e determinação dos parâmetros de desmonte a realizar.

Para um bom manuseamento dos explosivos, é necessário ter presentes regras de segurança adequadas e que fazem parte de um quadro normativo legal em vigor. A começar logo pelo facto de o seu manuseamento está exclusivamente permitido a técnicos especializados, com experiência e formação adequada e munidos das licenças respetivas para tal atividade.

A utilização de explosivos para o desmonte de parcelas de um maciço rochoso é, tecnicamente antecedido da perfuração de uma malha de furos implementada tendo em vista o desmonte de um certo volume de rocha. A realização de furos cilíndricos na rocha, de diâmetro predefinido e com um comprimento devidamente dimensionado, destina-se a receber as substâncias explosivas diversas. A sua acomodação nos furos e o seu acionamento a partir de um sistema de iniciação, quando todo processo está bem dimensionado, permitirá obter resultados de fragmentação do maciço o mais semelhantes possível aos resultados esperados.

A implementação de uma pega de fogo tem como pressuposto que os furos, numa primeira análise, serão preenchidos com substâncias explosivas naquilo que se denomina de coluna de carga explosiva e uma coluna mais superficial designada de coluna tampão.

A coluna de carga explosiva pode ainda ser subdividida em duas zonas distintas que poderão receber, se assim for projetado, tipos de explosivos diferentes, nomeadamente quando à densidade dos mesmos:

- Coluna: Secção intermédia do furo, normalmente de maior comprimento onde tem como principal função acomodar grande parte do explosivo que será responsável pela fragmentação da rocha. Esta secção é normalmente designada como carga de coluna.
- Fundo: Parte normalmente mais profunda, ou mais afastada da boca do furo. Nesta zona é colocado um explosivo tal como na coluna, mas desta vez um explosivo com maior energia, para durante o desmonte ser possível fragmentar a rocha do fundo com um maior confinamento. Este conjunto é designado como carga de fundo e são nestas secções que são também colocados os dispositivos de iniciação dos explosivos. Ver figura 5.

Como explicado anteriormente, e é possível observar na figura 5, é graças a estas secções que ocorre o desmonte da rocha, pois é nelas que se acomoda o explosivo definido anteriormente. Já o tipo de explosivo utilizado deve ser definido previamente tendo em conta a criação do diagrama de fogo. Este explosivo é determinado tendo em conta diversos fatores como as características do maciço rochoso, exigências da construção, tipo de furos, existência de água, ou presença de construções antrópicas nas proximidades.

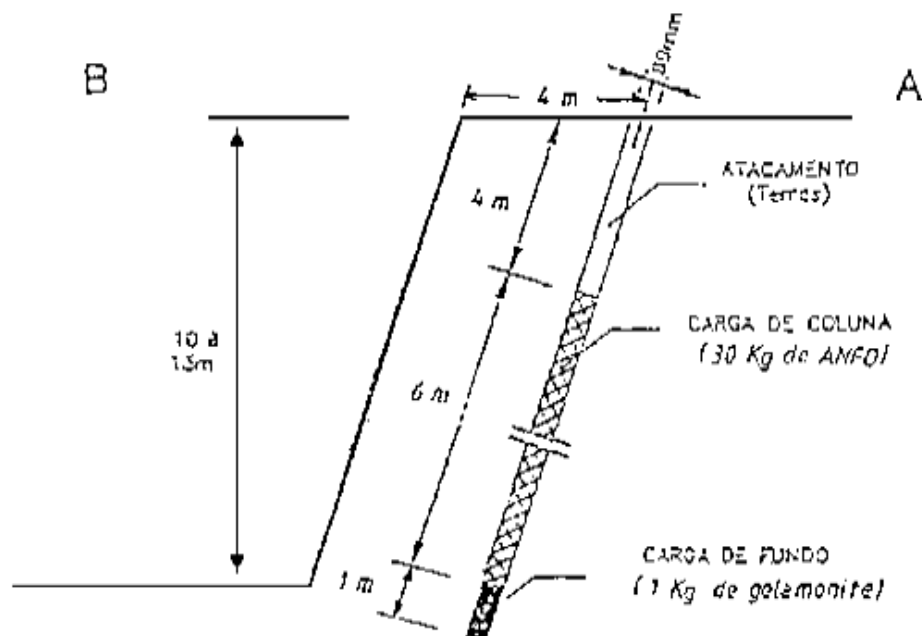


Figura 5 - Exemplo típico da distribuição de explosivos num furo de uma pega de fogo. [3]

Como referido anteriormente, e é possível observar na figura 5, uma distribuição de matérias deste tipo em cada furo de uma pega de fogo, é responsável por permitir o desmonte da rocha, pois a distribuição do material explosivo e o seu confinamento conseguido, é que permitirão no momento da detonação, aproveitar todas as energias desenvolvidas para facilitar a fragmentação da rocha. Já o tipo de explosivo utilizado deve ser definido previamente tendo em conta diversos fatores como as características do maciço rochoso, a geometria do diagrama de fogo, exigências da construção, tipo de furos, existência de água, ou presença de construções antrópicas nas proximidades.

Na figura 5 fica bem explícita a estrutura interna de distribuição dos materiais no furo, desde a carga de fundo, a carga de coluna e no topo o respetivo tamponamento confinador. Em geral, é na carga de fundo que é colocado o detonador que tem como missão a iniciação da detonação. Este detonador estará ligado à superfície através de um meio relacionado com o próprio tipo de detonador usado (elétrico, não-elétrico ou eletrónico).

A zona de tamponamento destina-se a selar todos os espaços abertos de modo a confinar todo o explosivo no interior do furo. Se este tamponamento for eficaz, ficam garantidas as condições para a realização de um desmonte mais eficiente e com resultados muito próximos do desejado. Para a realização deste tamponamento é normalmente utilizado material granular. Este material é fornecido pelas empresas de comercialização de explosivos, ou então como forma de reduzir custos é utilizado material previamente desmontado e com granulometria pequena de forma a tamponar todos os furos antes da realização da pega. Desta forma as empresas estão a poupar muitas vezes recursos financeiros que no final de vida de um projeto podem ter uma expressão significativa.

Relativamente aos explosivos, estes são comercializados, e fornecidos pelas empresas aos consumidores de três formas distintas, a granel, em cartuchos, ou em pó. Para a realização de desmontes a céu aberto e com furos verticais, as formas mais comuns de se comercializar e manusear explosivos é a granel e em cartuchos previamente montados.

Os explosivos a granel são explosivos comercializados no estado líquido (pasta viscosa - emulsões), com diferentes consistências dependendo das características do explosivo. Para a sua aplicação, e introdução nos furos é necessário o recurso a bombas para injeção dentro dos furos. As principais características dos explosivos a granel, e vantagens relativamente a outros tipos de explosivo são:

- Carregamento fácil e seguro controlado atualmente quase por computadores;
- Ajuste total às paredes do furo, evitando assim espaços vazios entre o explosivo e o furo como ocorre muitas vezes com os cartuchos;
- Carregamento rápido enquanto comparado com os restantes tipos de explosivo;
- A sua elevada resistência à água possibilita a sua utilização em furos húmidos;
- São suscetíveis à dispersão em falhas e fraturas;
- São necessários equipamentos adequados e seguros para o seu transporte, como veículos certificados para o efeito, e com uma bomba acoplada de forma a bombear o explosivo para o interior do furo.

Já os explosivos em cartucho são explosivos comercializados em pequenos cartuchos plastificados, de forma cilíndrica que são introduzidos nos furos. O seu comprimento depende das necessidades do consumidor e as características do próprio explosivo. Uma determinada carga de coluna apresentará um determinado comprimento e diâmetro, sendo que para um bom desmonte, os cartuchos escolhidos devem apresentar umas dimensões que possibilitem um melhor preenchimento de todos os espaços vazios possível.

As dimensões dos cartuchos variam de fabricante para fabricante, é normal encontrarem-se cartuchos com dimensões entre os 20 e os 200 milímetros para o diâmetro, já o seu comprimento pode variar entre os 200 e os 600 milímetros.^[4] Estas são as medidas normalmente comercializadas, contudo, com a forte concorrência de mercado os fabricantes hoje em dia, acabam por comercializar cartuchos com dimensões diferentes, de modo a que seja possível satisfazer consumidores com necessidades diferentes consoante a sua exploração. A nível da aplicação dos cartuchos, os consumidores costumam optar normalmente por cartuchos com diâmetros 10 milímetros inferiores ao diâmetro do furo, de forma a permitir a sua introdução com o menor risco de rompimento e encravamento possível. Quanto ao comprimento, os cartuchos devem ser escolhidos de forma a satisfazer as necessidades do diagrama de fogo, sendo que para introdução nos furos devem ser colocados números redondos de forma a evitar o corte de cartuchos que se pode tornar uma prática perigosa para os manuseadores.

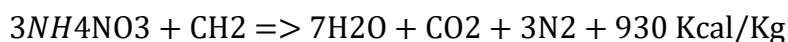
Estes explosivos na forma de cartucho apresentam características como:

- Manuseamento mais fácil;
- Carregamento por vezes mais lento e complicado pois é necessário uma total desobstrução e limpeza dos furos;
- Durante o carregamento é necessário recorrer a atacadores para empurrar os cartuchos para o fundo dos furos principalmente na presença de água e nos furos horizontais;
- Não necessita de veículos especiais, apenas licenciados para o devido transporte nem reservatórios próprios comparando com os explosivos a granel.

Um dos principais pontos a ter em consideração na escolha do explosivo a utilizar é a sua eficiência energética. Para a escolha do explosivo, tendo em conta os requisitos predefinidos para o material desmontado, quer quanto à sua granulometria, quer sobre o modo como esse material se dispersará na praça da pedreira, deve ser analisada a eficiência energética do explosivo e o seu custo.

2.2.5. A energia do explosivo

Uma detonação de um explosivo é uma reação química de oxidação/redução que acontece num intervalo de tempo muito curto e que tem como resultado a produção de gases de alta temperatura. Uma mistura explosiva que é muito frequente encontrar no desmonte de rocha é uma mistura de nitrato de amónio (AN) com combustível (FO). Apesar de ambos não serem isoladamente compostos explosivos, em determinadas condições, a sua mistura pode ser usada para causar detonação (Hustrulid et al, 1999 p.62).



(Equação 1)

De acordo com Bhandari (1997) a equação 1 ilustra um balanço perfeito de oxigênio. Por excesso ou carência de NA, aquele balanço de oxigênio poderá não existir, o que fará ocorrer uma reação química que será uma fonte de gases tóxicos para a atmosfera.

Um dos fatores que diferencia os explosivos é a sua potência relativa (%), a densidade (g/cm^3), a velocidade de detonação (m/s) e o calor de explosão (cal/g). Estes parâmetros diferem de explosivo para explosivo de acordo com a sua marca e os seus produtores. Estes parâmetros estão normalmente catalogados por gamas de explosivos sendo regularmente estabelecidas relações de modo a ser retidas elações do explosivo indicado para um determinado desmonte. Analisando as quantidades percentuais distribuídas de nitrato de amônio e combustível num explosivo, estas tem influência com a onda de choque que atravessa o mesmo explosivo, sendo esta velocidade determinada como velocidade de detonação (VOD). Naturalmente que esta, velocidade será influenciada também pelo diâmetro da carga como é representado nas figuras 6 e 7.

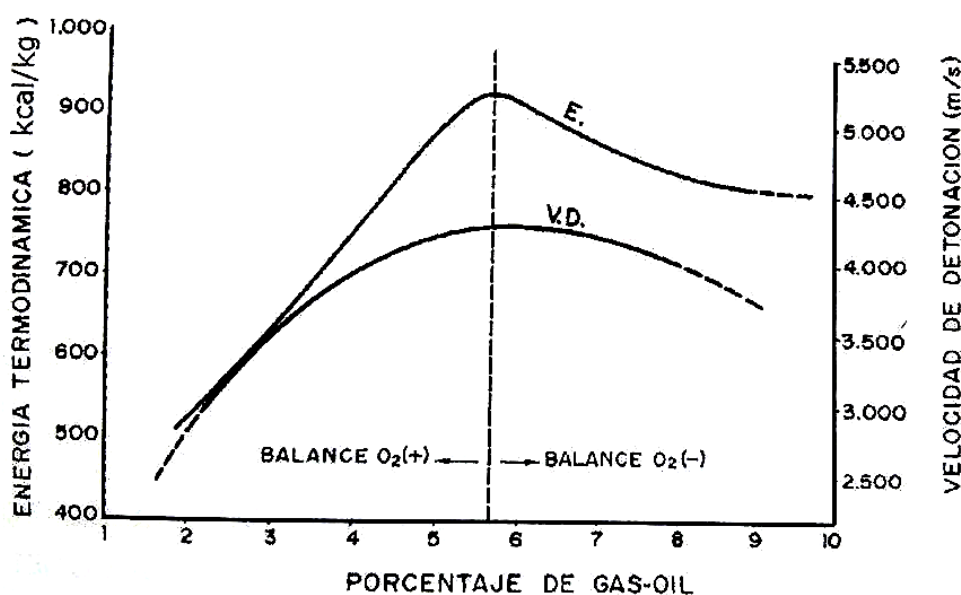


Figura 6 - Influência da distribuição de NA e FO na Velocidade de Detonação. ^[11]

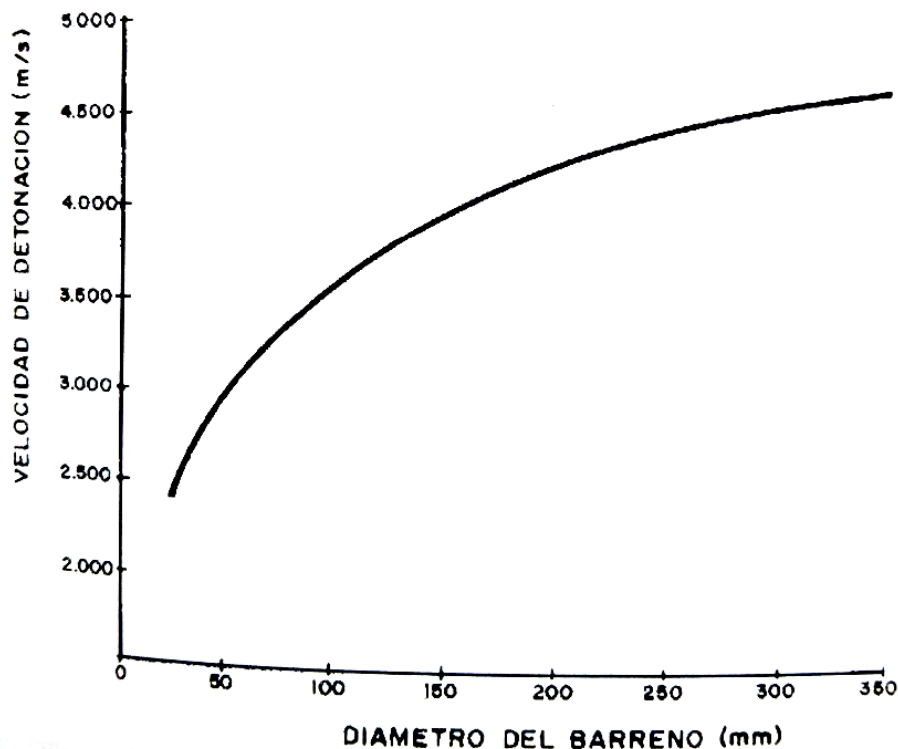


Figura 7 - Influência do Diâmetro do furo na Velocidade de Detonação. ^[11]

Uma vez iniciada a detonação, a progressão da reação é feita ao longo do furo com uma velocidade igual à sua velocidade de detonação (VOD), tendo uma pressão de gases inicial (P_{DET}) que diminui de acordo com o volume, originando assim as denominadas curvas de Pressão-Volume (Hustrulid *et al*, 1999 p63).

A Pressão de Detonação pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_{DET} \text{ (atm)} = 2.5 \rho e \text{ (VOD)}^2 \quad \text{(Equação 2)}$$

Nesta equação, ρ representa a densidade do explosivo em kg/m³.

Estabelecida esta relação, pode-se construir uma outra que dá a pressão da explosão (P_e) que se exerce na parede do furo no momento da detonação, sendo esta aproximadamente metade de P_{DET} conforme ilustra a equação 3.

$$P_e \cong 12 P_{DET} \quad \text{(Equação 3)}$$

No desmonte com recurso a explosivos, a energia libertada deve criar novas fraturas e estender as previamente existentes no maciço sem que haja efeitos secundários indesejados.

Assim, a Figura 9 representa um bom exemplo de como a energia pode ser otimizada permitindo a escolha do tipo de explosivo de acordo com as propriedades da rocha. Se esta já se encontrar naturalmente muito fraturada, interessa escolher um explosivo que tenha maior libertação de gases para que estes se estendam ao longo das fraturas existentes causando a sua fragmentação (Explosivo B). Para a situação oposta, se a rocha se encontrar muito coesa, optar-se-á por um tipo de explosivo que tenha uma maior Pressão de explosão (Hustrulid *et al*, 1999).

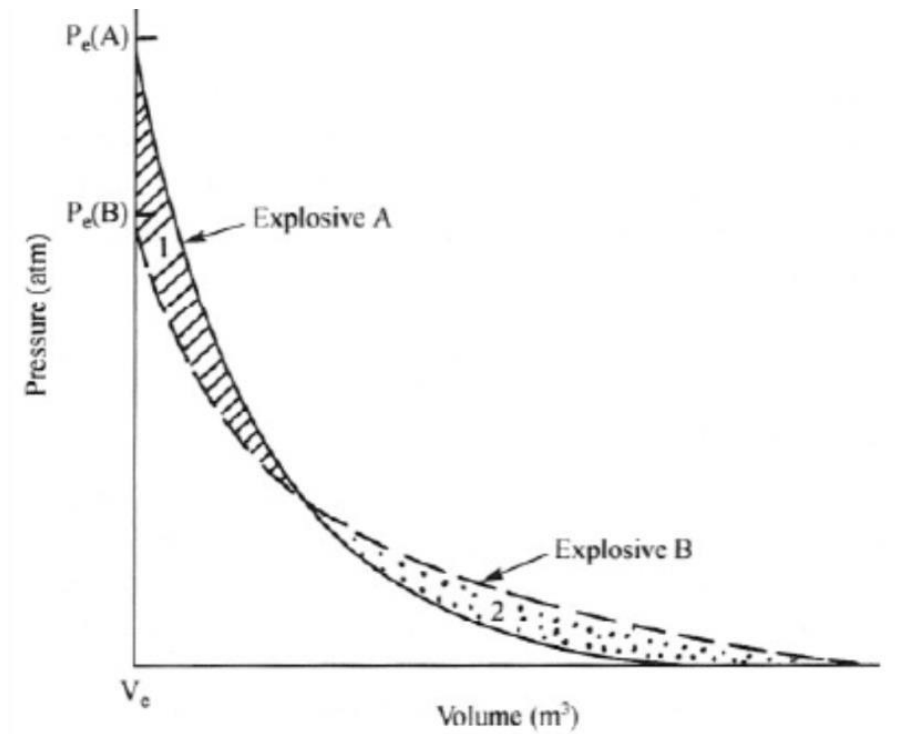


Figura 8 - Diferentes curvas de P-V em dois explosivos com a mesma energia. ^[11]

Cada explosivo possui as suas características técnicas, as suas propriedades, normalmente catalogadas, como sejam a velocidade de detonação, densidade, volume de gases produzidos, resistência à água, pressão de detonação ou calor de explosão.

A figura 9 representa um exemplo das características técnicas catalogadas de um explosivo.

POWERGEL		815	820	825
Dens. da emulsão	g/cm³	1,15	1,20	1,25
Veloc. de detonação*	m/s	5.200	5.200	5.200
TNT	%	72	74	76
RWS**	a 100 MPa	108%	111%	114%
RBS**	a 100 MPa	155%	166%	178%
Classe de gases		1	1	1
Volume de gases	l/Kg	1.100	1.100	1.100
Air gap	diâmetro	1	1	1
Iniciação	MANTESPO n° 8 / MANTICORD NP 10 / CORDTEX 10 / EXEL			
Resistência a água	Excelente			

VALORES NOMINAIS

(*) Em 2" de diâmetro não confinado - (**) Comparado ao ANFO padrão.

OBS.: Para densidade de 1,25 g/cm é recomendada a iniciação com booster

Figura 9 - Exemplo das características técnicas de um explosivo. [4]

Com a informação presente nos catálogos é possível realizar o cálculo do *RWS* (*Relative Weight Strenght*) do explosivo, considerando o calor de explosão, e relaciona-lo com o calor da explosão do explosivo do tipo ANFO que de acordo com Hustrulid (1999) é de 930 calorias/grama, ou 3894 Quilojoule/Quilograma conforme ilustrado na equação 4.

$$RWS = AWS / AWS(anfo) \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

O *RWS* (*Relative Weight Strenght*) é a energia disponível por massa de um determinado explosivo. Este cálculo é normalmente realizado com a finalidade de determinar a energia de um explosivo tendo por base a comparação com a energia de outro determinado explosivo considerado padrão.

2.2.6. Principais explosivos comercializados

A escolha de um explosivo para realizar um desmonte deve ser feita com recurso a uma avaliação em termos técnicos, como sejam as características da rocha, as exigências do projeto de desmonte, os níveis de segurança, fatores económicos mas também as propriedades do explosivo como a densidade, a sensibilidade à iniciação, os gases gerados pelo explosivo e a resistência à água.

Existem diferentes tipos de explosivo, e ao longo dos anos o desenvolvimento da tecnologia associada aos desmontes, e a elevada exigência comercial, tem originado também um progressivo desenvolvimento dos explosivos com a criação de novos tipos, com diferentes propriedades para as diferentes aplicações, e com níveis de segurança cada vez bastante mais elevados. Os explosivos mais comuns na atualidade são:

- Explosivos gelatinosos
- ANFO
- ANFO Pesado.
- Emulsão

Simplesmente como exemplificação, pois existe toda uma panóplia de outros tipos de explosivos e suas variantes referimo-nos agora somente ao ANFO. O ANFO é uma sigla resultante de “*Ammonium Nitrate / Fuel Oil*” e na atualidade tem um papel fundamental no desmonte de rocha a céu aberto. Resulta de uma mistura de nitrato de amônio e gasóleo, que contém hidrocarbonetos líquidos, numa percentagem de 94% e 6% respetivamente.



Figura 10 - Explosivo ANFO. [5]

Uma vasta gama de aplicações é uma das principais vantagens do ANFO, bem como o seu baixo custo. Como principal desvantagem comparativamente com os restantes explosivos é a sua não resistência à água, o que impede a sua utilização em muitas das situações desejadas. Na atualidade o ANFO é dos explosivos mais comercializados em todos os Países do Mundo.

Através desta análise a diferentes características dos explosivos, foi possível observar que diversas necessidades de desmonte de rocha com distintas características geológicas influenciam a escolha do uso de explosivos a utilizar no desmonte. O mercado oferece uma grande quantidade de explosivos com diferentes marcas a produzir e comercializar os respetivos produtos. Para um melhor desmonte e obtenção dos requisitos propostos, o explosivo deve ser escolhido tendo em conta diversos fatores como:

- Geologia do maciço;
- Características do projeto;
- Volume de rocha a ser desmontado por pega de fogo;
- Condições atmosféricas;
- Condições de segurança;
- Custo do explosivo;
- Diâmetro do furo e do Explosivo;
- Existência de água;
- Fumos e toxicidades.

2.2.7. Detonadores

De todos os artefactos usados em paralelo como as substâncias explosivas em desmonte, deve-se um particular destaque aos denominados detonadores, pois no tipo de detonador usado poderá residir a diferença entre uma pega de fogo bem conseguida e uma que não atingiu os objetivos para ela delineado.

Os detonadores são instrumentos fundamentais na realização de uma pega de fogo. Os explosivos são responsáveis pelo desmonte e pela fragmentação da rocha através da sua energia libertada quando são iniciados recorrendo a diferentes tipos de detonadores. Para a ocorrência de uma detonação é necessário a transmissão de um sinal desde a central do operador até aos detonadores, que são responsáveis pela inicialização, permitindo que a detonação ocorra.

Como os restantes equipamentos e produtos ligados ao desmonte de rocha a céu aberto e em túnel os detonadores tem sofrido significativas melhorias, sendo cada vez mais equipamentos evoluídos. Esta evolução ocorre essencialmente a nível de segurança e controlo/eficácia da detonação. Uma detonação involuntária de um explosivo pode causar danos irreversíveis, ou mesmo acidentes com os seus manuseadores. Os principais tipos de detonadores comercializados são os não-elétricos e os eletrónicos, sendo também mais seguros. Existe ainda os detonadores elétricos menos eficientes e mais perigosos para os manuseadores.

Os detonadores eletrónicos são uma forma mais recente de detonação do explosivo durante um desmonte. Surgem como resposta as exigências e necessidades dos planeamentos das pegas de fogo da atualidade. São os mais recentes e evoluídos a serem comercializados e apresentam um grau de segurança elevado comparado com os restantes detonadores. As principais características destes detonadores são:

- Possibilidade de pequenos tempos de atraso até 1 milissegundo;
- Atrasos máximos superior a 6 segundos;
- Iniciação apenas é realizada após introdução de um código;
- Os detonadores por si só possuem energia para realizar a iniciação;
- Energia para a iniciação é fornecida pelo equipamento de detonação;
- Possuem uma proteção contra altas voltagens;

É um detonador que apresenta um nível de segurança mais elevado e um vasto campo de vantagens, o que nos últimos anos faz com que se tenha distribuído mundialmente e é aplicado em muitos dos desmontes realizados nos dias de hoje. Em termos de contributo para a otimização do desmonte, talvez a sua principal vantagem seja a possibilidade de poderem ser programados para instantes de detonação muito de acordo com o projeto de pega de fogo definido, aliada esta a uma clara simplificação da implementação do plano de retardos no terreno. A sua principal desvantagem comparada com os restantes detonadores é o seu preço mais elevado que ainda cria algum constrangimento na sua comercialização.



Figura 11 – Detonador eletrônico. ^[6]

2.3. Furação

A operação de furação de uma bancada para desmonte com recurso a explosivos é uma operação que é precedida pelo processo de marcação da pega de fogo. Estas operações têm como objetivo a realização de furos, com determinada profundidade, diâmetro e inclinação previamente definidos, para que estes possam receber o explosivo a ser utilizado no desmonte. Este processo de marcação de uma pega de fogo é realizado após um estudo rigoroso das características do maciço de forma a originar o desmonte necessário.

A furação e a perfuração são termos muito coincidentes, ambos utilizados na realização desta dissertação, mas com um significado um pouco distinto. O termo perfuração refere-se à globalidade da atividade realizada, a qual inclui a operação de furação. Quando é mencionado o termo furação, deve referir-se à atividade restrita de furação da rocha. Utilizando o termo perfuração é enunciada a atividade de perfuração da rocha de um modo geral, que inclui a totalidade de operações atividades do ciclo de implementação da furação de uma pega de fogo.

Existem deferentes métodos de furação.

2.3.1. Métodos de furação

A furação é uma operação no desmonte de rocha que tal como as restantes operações tem sofrido uma evolução ao longo dos tempos. No passado a furação da rocha, para pegas de fogo, era uma operação realizada através de martelos pneumáticos, carregados pelos operadores, que como é se possível imaginar, eram bastante ineficientes e perigosos,

sendo que a furação era uma atividade que ocupava grande parte do tempo disponível para realização do projeto. Contudo, com a evolução da tecnologia, a operação de furação, na engenharia de minas, que engloba a perfuração em bancadas, teve um grande avanço, levando a processos mais rápidos, eficientes e seguros, fundamentalmente devido ao aparecimento das Perfuradoras. As Perfuradoras, como visualizado nas figuras 12 e 13, são equipamentos, geralmente sobre lagartas, para facilitar a sua aderência e estabilidade no solo, mas podendo ser observado também sobre rodas, que apresentam braços frontais, geralmente entre um e quatro, onde podem ser colocados martelos de perfuração, que poderão realizar a furação simultaneamente. O aparecimento destas Perfuradoras levou a uma grande diminuição da mão-de-obra envolvida na operação de perfuração, pois deixou de ser necessário que os operadores carregassem e segurassem os martelos de furação, evitando-os a grandes vibrações provocadas pela atividade. No caso da realização de furos em desmontes de bancada, os equipamentos de furação apenas possuem um braço, ainda assim versátil em termos das possibilidades de movimento para a sua colocação em posição ótima, pré-definida em projeto, para a direção e inclinação dos furos a realizar. Deste braço fazem parte, para além do martelo de perfuração, capaz de produção de movimentos de rotação e percussão que serão transmitidos à coluna de aço e perfuração respetiva, um carrocel de armazenamento de hastes de perfuração que serão usadas como extensões que permitem realizar furos com os comprimentos desejados.



Figura 12 - Exemplos de Perfuradora com martelo Top Hammer (esquerda) e Martelo Fundo de Furo (direita). ^[7]



Figura 13 – Exemplo de Perfuradora em bancada. [8]

Após uma escolha da Perfuradora é necessário ter em conta o tipo de martelo a selecionar para promover as dinâmicas de rotação e percussão necessárias. Naturalmente que esta seleção terá que considerar diversas variáveis como a altura de bancada, o diâmetro do furo e alguns parâmetros geomorfológicos do maciço.

Os martelos de furação apresentam diferentes características e possuem um papel fundamental na furação de rocha, pois são estes equipamentos que produzem a energia empregada na fragmentação do material. Dentro dos martelos de furação, os mais utilizados na indústria mineira são os designados como *Top-hammer* (martelo de superfície), assim designados devido à fonte de energia estar localizada no topo das hastes, ou simplesmente no exterior do furo.

Quanto ao tipo de martelo de furação, poderão ser encontrados, principalmente dois tipos de martelo: os pneumáticos e os hidráulicos. Os martelos pneumáticos, cujo funcionamento é promovido através do uso de ar comprimido, têm vindo a cair em desuso desde a década de 80. Para o funcionamento deste tipo de martelos é comum observar extensas tubagens para transporte do ar comprimido até ao martelo ou até mesmo compressores pneumáticos portáteis para serem instalados no junto a bancada a desmontar.

A introdução dos martelos hidráulicos no mercado foi responsável pela queda da utilização dos martelos pneumáticos. Os martelos hidráulicos oferecem uma maior eficiência e mecanização na operação. Como é do conhecimento, um sistema hidráulico baseia-se na utilização, sob pressão, de óleo característico ou água, em vez de ar comprimido.

Na seguinte tabela (tabela 1) são apresentadas as principais características dos dois tipos de martelos em cada um dos sistemas de furação:

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas de furação hidráulico e pneumático. ^[10]

Sistema Pneumático	Sistema Hidráulico
Ineficiente	Eficiente
Baixa capacidade	Capacidade 50% superior ao outro sistema
Eficiência fortemente dependente das condições de fornecimento externo de ar comprimido	Fiável, com eficiência alta e constante
Inflexível	Facilmente ajustável a diferentes rochas e condições de perfuração
Não-ergonómico	Ergonómico
Barulhento, mistura de água - ar, ambiente de trabalho desagradável, fluxos de ar frio	Ruido reduzido, sem alteração da temperatura
Pouco económico	Economico
Baixa capacidade, dependente de compressores e tubagens de ar, trabalho mais intenso	Alta capacidade, independente, trabalho menos intenso e agradável para operadores

Em circunstâncias em que os martelos de superfície (*top-hammer*) perdem eficácia, pode-se recorrer a outros martelos, que permitem mais eficiência e melhores resultados: os martelos fundo de furo.

Os martelos fundo de furo (DTH), são martelos bastante diferentes dos anteriores, pois nestes o pistão de precursão está localizado na frente da coluna de aços de perfuração, descrevendo deste modo um percurso dentro do furo que está a ser perfurado. Estes martelos são muito eficientes, pois graças ao componente de precursão se situar junto à rocha, existiram poucas perdas de energia percussiva ao longo das varas de perfuração, permitindo uma taxa de penetração muito alta, independentemente do comprimento do furo, evitando grandes desvios observados após a realização dos furos. Martelos deste genero, apesar das suas vantagens, apresentam uma grande complexidade, pois a energia de precursão é fornecida por um sistema pneumático, sendo que a rotação realizada no exterior do furo, é normalmente fornecida por um sistema hidráulico. Para além da complexidade dos sistemas, estes martelos apresentam grandes consumos de energia. Os martelos são os equipamentos responsáveis pela criação dos movimentos que irão realizar desmonte, seja rotativo ou de precursão, contudo o instrumento que estará em contacto com a rocha, transmitindo-lhe essa energia, serão os *bits* de furação.



Figura 14 – Exemplo de *bit* para martelo de superfície (Esquerda) e martelo de fundo de furo (Direita).^[8]

Os *bits* de furação apresentam uma imensa variedade de estilos, desde o seu tamanho, geometria e matérias constituintes. O diâmetro dos *bits* de perfuração é fulcral num determinado projeto de desmonte, pois será com esse mesmo diâmetro que serão realizados os furos da pega de fogo, logo o diâmetro escolhido para eles deverá ser em conformidade com a geometria do diagrama de fogo planeado.



Figura 15 – Exemplo *bit* furação.^[8]

2.3.2. Ciclo de furação

A figura 16 representa-se um esquema do ciclo de perfuração da rocha envolvendo uma perfuradora para a realização dos furos para posterior carregamento com explosivo necessário para desmontar uma parcela de uma bancada.

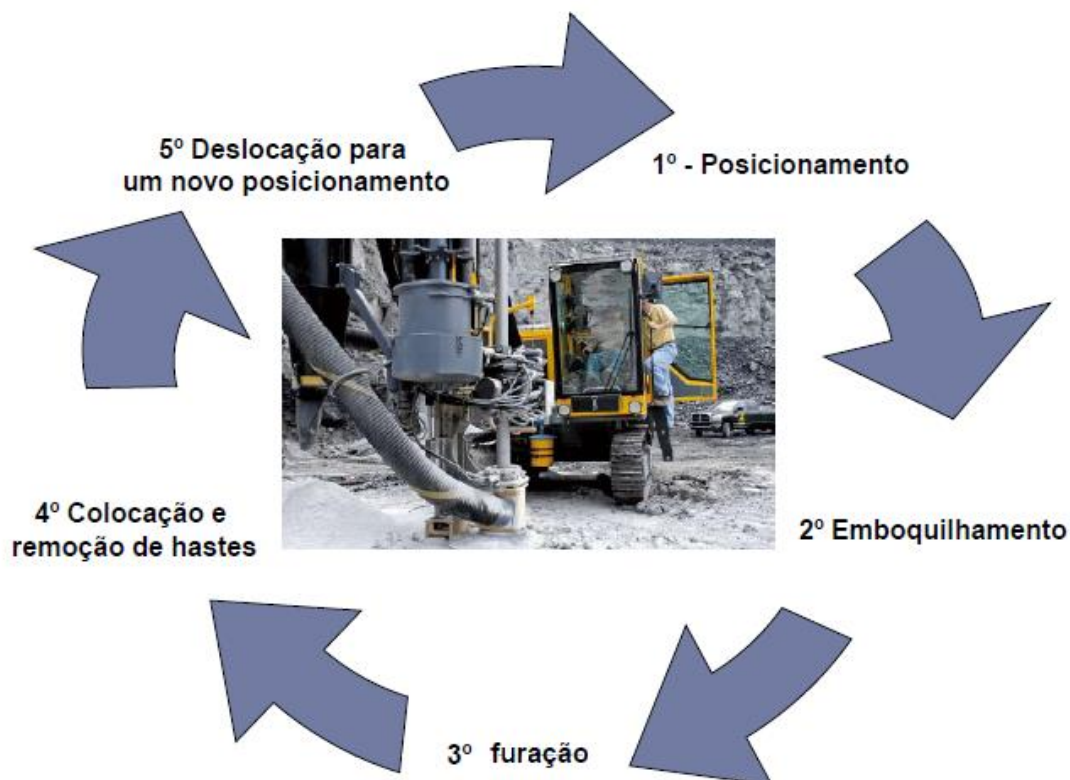


Figura 16 – Representação do ciclo de furação. ^[18]

O primeiro passo a realizar será o posicionamento da perfuradora que, consiste na sua colocação no local pretendido tendo em conta a marcação prévia da pega de fogo e respeitando a direção e inclinação estabelecidas para cada furo projetado.

Realizada a fase de posicionamento é iniciado o emboquilhamento do *bit* de perfuração. É colocado o *bit* na extremidade da coluna de perfuração e procede-se ao seu acionamento no local exato para realizar a furação do maciço rochoso que constituirá o terceiro paço do ciclo de perfuração.

A furação é a etapa normalmente mais demorada do ciclo de perfuração. Esta etapa deve ser especialmente controlada, para evitar erros e desvios no final da realização dos furos. Caracteriza-se pela rotação e percussão das ferramentas de furação com o objetivo de “desgastar” a rocha. Deve ser mantida uma especial atenção na parte inicial da realização do furo, onde existe material muito fragmentado que e frequentemente provoca desgaste abusivo do material de perfuração, desvios na condução do *bit*, ou encravamento da coluna de furação.

Avançando com o desenvolvimento da furação, existe a necessidade de colocação de hastes no topo da coluna de modo a poder atingir a profundidade pretendida inicialmente a quando do planeamento do desmonte a realizar.

Esta atividade de adição e remoção de haste é designada como sendo a quarta etapa do ciclo de perfuração observado na figura 16.

No final do ciclo, sendo identificada como última, mas podendo ser considerada a primeira etapa, é necessário deslocar a perfuradora até a nova posição para realização do novo furo. Atualmente, e dada a versatilidade de muitas perfuradoras existentes no mercado, esta pode ser excluída de alguns ciclos de perfuração.

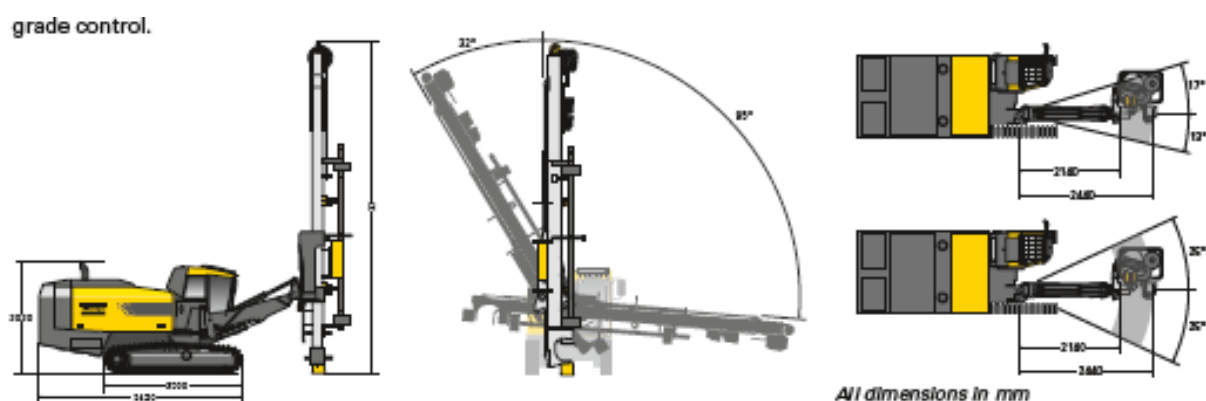


Figura 17 – Dimensões e ângulo de trabalho de uma perfuradora. [8]

Na figura 17, é possível observar o ângulo de movimento da coluna de furação. Este movimento representa uma vantagem em relação a outras perfuradoras pois significa que um manobrador experiente pode colocar o equipamento em local estratégico que durante o ciclo de perfuração, a etapa de deslocação do equipamento para nova posição pode ser ignorada pois na mesma posição a perfuradora tem capacidade de realizar mais do que um furo.

2.3.3. Erros da perfuração

A perfuração no desmonte de rocha é uma atividade que recorre a maquinaria não completamente autónoma, mas que necessita de uma componente humana na grande parte das tarefas para a sua operacionalidade. Como resultado da ainda forte componente humana presente neste processo e dadas as anisotropias sempre existentes nos maciços rochosos, é de esperar que a perfuração de furos possa conter erros que se tornarão em factos indesejados para os objetivos do desmonte, em particular para a gama de granulometrias esperadas para o material desmontado. Alguns dos erros mais frequentes são descritos na figura 18:

- Erros de marcação no posicionamento dos furos e erros de emboquilhamento;
- Erros de alinhamento da direção e inclinação dos furos;
- Erros por flexão das varas nos furos;
- Erros de profundidade;
- Furos encravados.

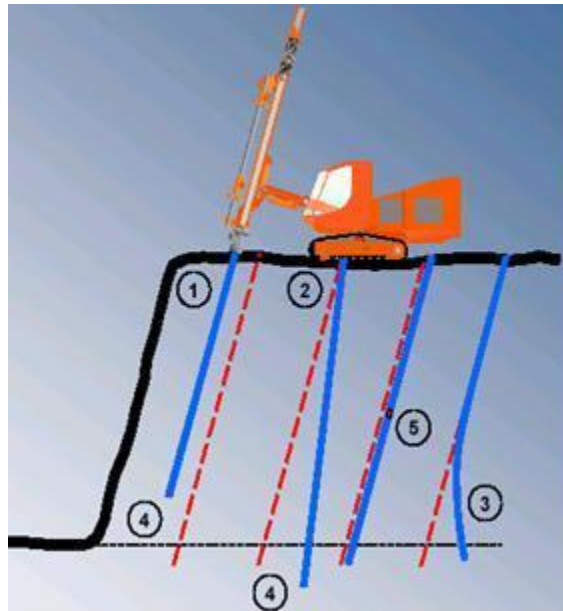


Figura 18 - Principais erros associados à perfuração. ^[10]

Na Fotografia 19 podem observar-se erros de direção e inclinação de furos, bem como o espaçamento entre furos não uniforme. Na parte inferior da bancada é possível verificar que a incoerência dos espaçamentos entre os diversos furos poderá resultar de desvios ocorridos durante o processo de perfuração da rocha.



Figura 19 - Erros de direção e inclinação e comprimento dos furos.

Na tabela 2, pode-se observar que a diferença de 1 a 5 graus de inclinação na coluna de perfuração, influencia diretamente a posição final dos furos traduzindo-se num desvio que aumenta proporcionalmente com a altura de bancada a perfurar. Como exemplo, verifica-se que para um furo de 17 m de profundidade, considerando a má colocação da coluna com um erro inicial de 5°, o desvio rondará um erro de 1,50 m da posição desejada em profundidade. Se não existir sensibilidade para este efeito por parte dos operadores ou responsáveis das operações, estes desvios, quando no sentido da frente livre, darão origem a projeções de pedras que poderão resultar em acidentes graves, quer para os equipamentos presentes na pedreira quer para as infraestruturas envolventes. Este eventual efeito resultará de uma maior concentração de explosivos na base da bancada, resultante da proximidade entre furos nesse local por via da aproximação do furo desviado relativamente ao que lhe estará contíguo.

Tabela 2 - Efeitos da má inclinação da coluna de perfuração em bancada.

Esquema de erro de má perfuração (Furo com 17 metros)		
ERRO (°)	Desvio (cm/m)	Desvio fundo do furo (m)
1°	1.8	0.31
2°	3.5	0.60
3°	5.2	0.88
4°	7	1.19
5°	8.8	1.50

2.3.4. Fatores não desejados (erros) oriundos do processo de perfuração

Com o iniciar de novas atividades de perfuração, novos ciclos são repetidos e é necessário ter em consideração diversos fatores que podem determinar a granulometria obtida após o desmonte. Um dos fatores que influencia a perfuração e o consequente desmonte da rocha é a visibilidade da rocha firme. Uma soleira pouco visível pode influenciar a marcação da malha de perfuração e consequentemente a própria atividade de perfuração. Este fenómeno pode originar um resultado final que não é o mais adequado, o que nos leva a um decréscimo de rendimento e aumento do custo devido a:

- Perfuração das irregularidades das plataformas o que obriga o equipamento de perfuração a deslocar-se ao patamar inferior da bancada em que está a perfurar;

- Dificuldades de carregamento dos furos, com realce para os furos de irregularidades de plataforma aumentando o risco de projeções;
- Maior consumo de detonadores e explosivos no carregamento das irregularidades da plataforma;
- Maior dificuldade na fragmentação da rocha;
- Dificuldade no carregamento da rocha com a pá carregadora;
- Instabilidade da frente de trabalho (maior risco para os trabalhadores e equipamentos);
- Vias de acesso irregulares (desgaste dos pneus dos equipamentos, aumento acentuado do tempo de circulação por ciclo, aumento dos problemas mecânicos ao nível das transmissões e amortecedores);
- Dificuldades de drenagem (com consequência no desgaste de pneus, pois não se vêm pedras que danificam os pneus e sistemas de travagem dos equipamentos de carga e transporte);
- Dificuldades em executar a perfuração e possibilidade de introduzir erros na localização dos furos que podem produzir blocos de maior dimensão em relação à dimensão pretendida.

2.3.5. Importância do controlo da direção, inclinação e profundidade dos furos na perfuração

Para que o desmonte de rocha com o recurso a explosivos seja eficiente, é necessário que o processo de perfuração seja tecnicamente bem realizado, acompanhado de uma atenção especial aos parâmetros de projeto, em particular a direção e a inclinação dos furos bem como o da profundidade pretendida. Em particular, estes parâmetros revestem-se de grande importância no que diz respeito a se conseguir resultados finais eficientes, com vista ao aumento da produtividade e à redução de custos em todo o processo de desmonte (ver Figura 20)

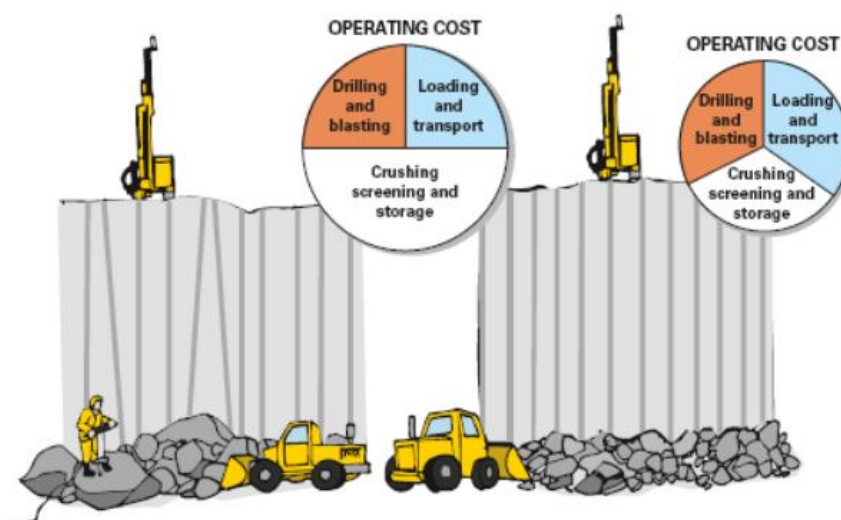


Figura 20 – Importância do controlo da perfuração. [8]



Figura 21 - Verificação de inclinação de coluna de perfuração com inclinômetro digital.



Figura 22 - Níveis de bolha no controle da inclinação de colunas de perfuração.

Com perfurações executadas em condições ideais, acompanhadas de verificação do rigor das suas diversas operações elementares (Figuras 21 e 22), aumenta-se a probabilidade de serem obtidos resultados positivos na fragmentação resultante do desmonte e nas condições criadas na bancada para trabalhos seguintes de carga e transporte do material, uma vez que seguramente se obterá uma plataforma (praça da pedreira) nivelada e frente livre estável, com a consequente melhoria para a segurança dos trabalhadores e equipamentos.

Com a existência de diversos fatores condicionantes, falta de rigor, executando tarefas como a perfuração de forma pouco exigente, obtendo furos com inclinações, direções e profundidades incorretas. Em consequência, o perfil da bancada e da soleira serão irregulares e obrigarão a que os equipamentos de carga tenham um maior tempo de ciclo de trabalho, exista uma maior percentagem blocos de dimensão superior ao desejado, seja necessária a realização de Taqueio ou então a entrada dos equipamentos de carga no escombros do rebentamento será mais complicada, as irregularidades dificultarão a operação dos equipamentos de carga, a velocidade de circulação dos *Dumpers* será inferior e a drenagem dificultada com consequências para a manutenção dos respetivos equipamentos.

2.4. Metodologia para verificação da geometria da furação – o método “*Boretrak*”

A possibilidade de, antes do carregamento do explosivo, ter acesso a informação real sobre a geometria dos furos realizados numa pega de fogo, pode apresentar-se como um fator decisivo para a obtenção de um bom resultado final do desmonte.

Existem diversos recursos no mercado para este fim, sendo o mais vulgarizado o denominado sistema *boretrak*. O *boretrak* é um equipamento de medida que permite a determinação da direção, inclinação e profundidade de cada furo. A figura 23 é uma representação do equipamento, constituído por uma sonda que vai progressivamente sendo introduzida dentro do furo à medida que se vão fazendo os registos em profundidade. Esses registos podem ser realizados a diferentes intervalos de acordo com o rigor pretendido. Naturalmente que, para bancadas de maiores dimensões em altura, os intervalos de medição podem ser valores maiores, enquanto os intervalos de medição em bancadas com alturas menores requerem intervalos de medição menores, para uma maior perceção da geometria de cada furo. Os intervalos de medição são, geralmente, valores entre um e dois metros, mas em casos excecionais podem atingir valores um pouco superiores. A sonda possui um inclinómetro digital e uma bússola digital que permitem obter, a cada profundidade, a inclinação e direção (azimute horizontal) do furo.

Depois de terminada a etapa da perfuração, é muito importante verificar e registar, para cada furo, a sua inclinação, direção e comprimento de modo a sobrepor estas informações a modelos digitais de terrenos construídos a partir de levantamentos previamente executados através de perfilómetros laser, aparelhos hoje em dia já bastante vulgares em muitas unidades industriais de desmonte de rocha. A conjugação dos dois tipos de informação pode revelar factos importantes para definição de alguns parâmetros relativos ao carregamento da pega de fogo.



Figura 23 – Exemplar de *Boretrak*.^[9]

Existem dois tipos de *boretrak*, um que recorre a um cabo, como mostra a figura 23, na extremidade do qual se encontra a sonda com os sensores e um outro tipo de aparelho que em vez de cabo, é constituído por um conjunto de varas unidas e articuladas entre si. O método de medição com recurso a cabo é um método cada vez mais comum uma vez que o transporte da sonda para o interior de cada furo é mais facilitado, e a utilização do próprio equipamento é mais simples.

Este equipamento apresenta várias vantagens, nomeadamente:

- Facilidade de utilização apenas com um operador;
- Visualização direta dos dados em tempo real à medida que se desce em profundidade;
- Tomadas de decisão com base na informação recolhida, nomeadamente a nível técnico-económico.

2.5. Influência da posição final dos furos em relação aos furos “ideais”.

A realização de uma boa pega de fogo está profundamente dependente das etapas precedentes como a marcação da posição de emboquilhamento de cada furo e do modo de execução da perfuração. O rigor da marcação na superfície da bancada da posição de cada furo é um fator que deve ser cumprido rigorosamente uma vez que essa marcação vai permitir um correto posicionamento da perfuradora e consequentemente o emboquilhamento do *bit* de perfuração para a realização dos furos. As figuras seguintes (Figuras 24 e 25) são um exemplo de uma marcação rigorosa à superfície, com parâmetros devidamente marcados em relação a espaçamento e afastamento, mas com a realização de furos com profundidades incoerentes, influenciando o resultado da fragmentação final do maciço rochoso. O facto de ocorrerem furos que, em profundidade, apresentam posições um pouco incoerentes é muitas vezes resultado de desvios ocorridos durante o processo de perfuração. O *bit* desvia da sua direção pretendida devendo-se este facto a diversos fatores como:

- Mau posicionamento da coluna em termos de direção e inclinação (equipamentos sem sistema de inclinómetros ou avariado e incorreta utilização);
- Superfície inicial de perfuração com material afetado dos desmontes anteriores originando deficiente emboquilhamento;
- Emboquilhamento deficiente por não correção do desvio causado no início do furo em superfícies irregulares ou por utilização de força de avanço exagerada;
- Desvios relacionados com a natureza geológica do local;
- Desvios por flexão das varas.

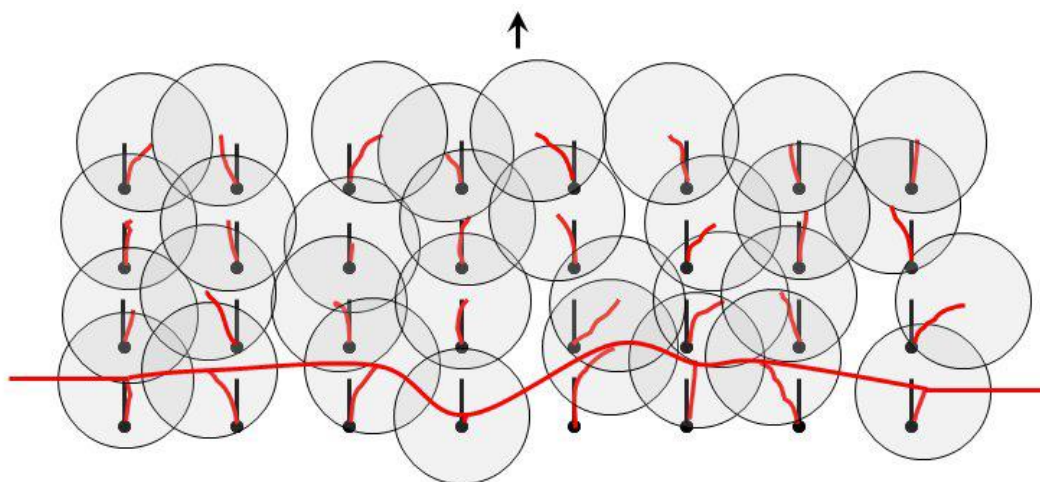


Figura 24 - Raio de influência de cada furo ao nível da soleira condicionado pelo desvio dos furos. ^[27]

Na figura 24 são observados desvios na posição final dos furos, desvios com diferentes origens e com diferentes resultados finais recorrentes da etapa de perfuração. Analisando a figura 25 é possível verificar uma malha de furação com o respectivo raio de influência de cada furo na forma ideal. Estes furos foram realizados com uma precisão elevada, com um alto rigor de perfuração tendo obtido a situação ideal para resultado final da etapa de perfuração.

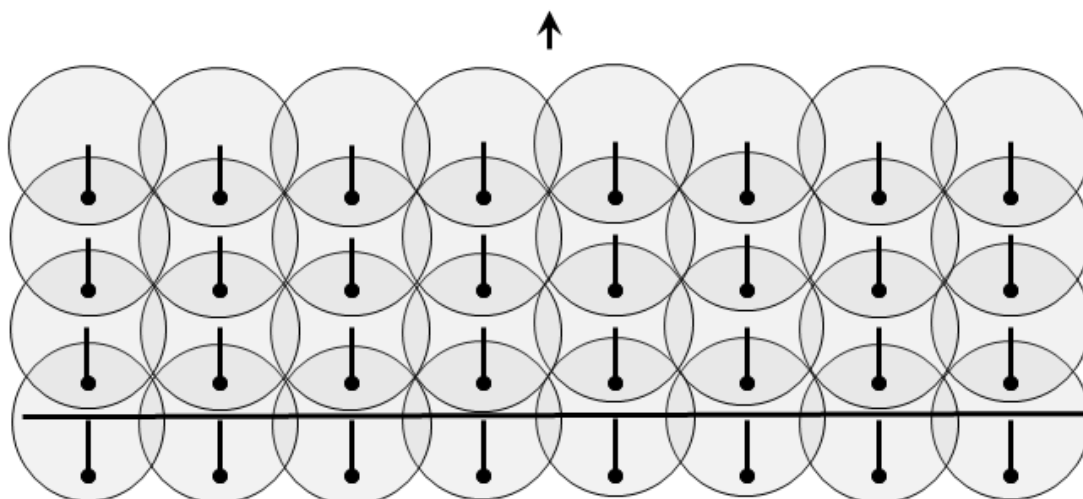


Figura 25 - Raio de influência de cada furo ao nível da soleira na situação ideal sem desvios. ^[27]

Após a realização da perfuração e posteriormente do carregamento dos respectivos explosivos será realizado desmonte da rocha. Deste desmonte resultará uma granulometria final, com uma determinada curva granulométrica que, de acordo com os

parâmetros impostos, será extremamente coincidente com a granulometria teórica que é passível de ser calculada antecipadamente, como veremos, para este desmonte.

2.6. Planeamento do diagrama de fogo

Na implementação de um diagrama para uma pega de fogo existem sempre em jogo variáveis controláveis, possuidoras de um certo grau de liberdade entre limites conhecidos, e variáveis não controláveis, que podemos considerar como constantes pois são atributos do maciço rochoso a desmontar.

O correto planeamento de uma pega de fogo envolve o estudo da adaptação das variáveis controláveis às não controláveis, de modo a que todo o processo seja otimizado, e os custos a ele inerentes seja o mais reduzido possível. As variáveis não controláveis segundo alguns autores como Jimeno (2003) e Hustrulid (1999) são a presença de água, a geologia e consequentes propriedades mecânicas do maciço. Como de uma forma geral em todos os desmontes a empresa que fornece o explosivo não é a mesma empresa que promove a perfuração, quando é planeada uma pega de fogo, alguns parâmetros importantes como o diâmetro do furo e a altura da bancada (H) são considerados parâmetros não controláveis no planeamento.

Existem diferentes variáveis geométricas que podem ser manipuladas de acordo com as exigências requeridas pelo planeamento de uma pega de fogo.

2.6.1. Parâmetros diagrama de fogo

Na figura 26 é possível observar os parâmetros controláveis fundamentais de uma pega de fogo.

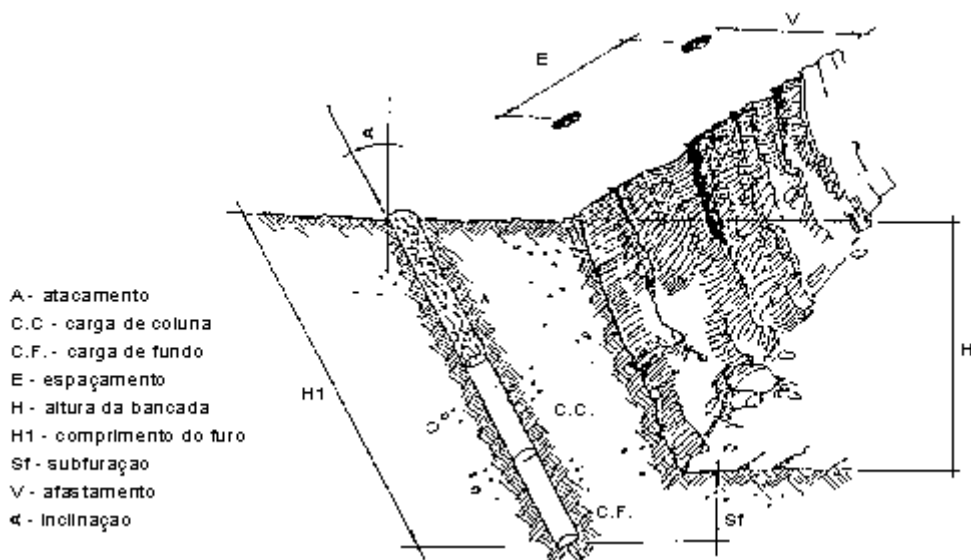


Figura 26 – Representação das variáveis controláveis de um desmonte. [3]

Os parâmetros são a altura da bancada (H), o afastamento (V), o espaçamento (E), o comprimento do furo (H1), a subfuração (Sf), o Tamponamento (A), e o diâmetro do furo. O diâmetro do furo e a altura de bancada são duas variáveis que se encontram condicionadas pelo tipo de equipamento disponível para realizar a furação. [11]

- **Afastamento (V)** – O afastamento é definido como sendo a unidade de medida entre a boca do furo até a frente livre do desmonte. É o parâmetro mais crucial na geometria da pega de fogo (Bhandari, 1997).

$$V = K_B * \text{Diâmetro} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde K_B é um parâmetro calculado com base nas propriedades dos explosivos a utilizar expresso pela seguinte equação:

$$Kb = 25 * \sqrt{\frac{Q * RWS}{0.8 * 100}} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que g representa a densidade do explosivo em g/cm^3 , e o RWS é obtido através da equação 4.

- **Espaçamento (E)** – O espaçamento é a distância longitudinal entre furos existindo uma relação direta com o afastamento (V).

Segundo Bhandari (1997), Hustrulid (1999) e Jimeno (2003) o rácio entre o espaçamento e o afastamento deve obedecer ao rácio estabelecido na equação 7.

$$1 \leq \frac{E}{V} \leq 1.5 \quad (\text{Equação 7})$$

- **Subfuração (Sf)** – A subfuração é a distância de furo realizado entre o final abaixo do nível do patamar final do desmorte de modo a que o material que está na base da frente do desmorte consiga ser fragmentado e extraído com eficácia. O valor da subfuração pode ser variado, Sánchez et al (2007) referiu que o valor para a subfuração deveria ser de $0,3 * V$. Jimeno et Al (2003) referiu que o valor pode atingir $0,5 * V$.



Figura 27- Relação Inclinação do furo com a Subperfuração. ^[11]

Jimeno *et al* (2003) fazem uma relação entre a inclinação do furo e a subperfuração de acordo com o Afastamento que é representado pela figura 27. Um aumento da inclinação da frente livre aumenta o efeito no sucesso do arranque do material da base do desmorte, sendo necessários valores de subperfuração menores.

- **Tamponamento (A)** - O tamponamento serve para evitar que os gases produzidos pelo explosivo se escapem direta e/ou prematuramente para a atmosfera ao longo da parte superficial do furo, sendo assim aproveitados para se propagarem através das fraturas aumentando deste modo o processo de fragmentação da rocha. O tamponamento é realizado com material granular e segundo Bhandari (1997) e Jimeno (2003), o tamponamento deverá ter o intervalo de valores da equação 8.

$$0,7 * B \leq A \leq 1 * B \quad (\text{Equação 8})$$

Analisando o rácio entre variáveis é possível observar que:

- Todos os parâmetros têm uma relação direta com o Afastamento (V);
- O rácio entre a altura da bancada e o afastamento para desmontes a céu aberto é de valor igual ou superior a 1, sendo normal obedecer a um valor igual ou superior a 1,6. (Hustrulid, 1999).
- O diâmetro da furação e a altura da bancada são parâmetros fixos.

Com este conjunto de variáveis é possível desenhar o diagrama da figura 29, que representa a influência entre as diversas variáveis do planeamento do diagrama de fogo.

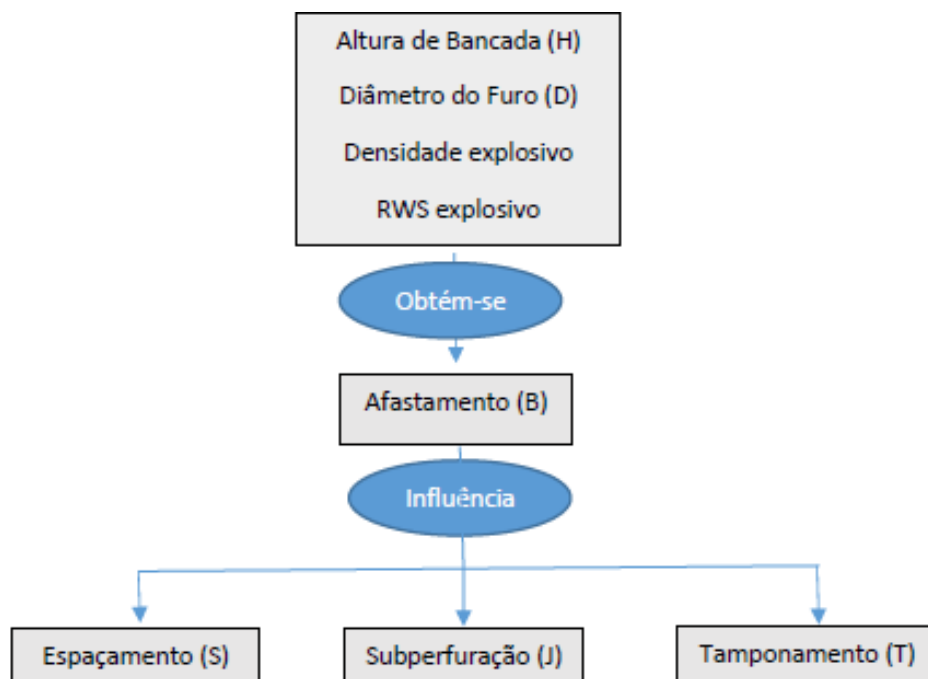


Figura 28 – Esquema ilustrativo da influência entre variáveis geométricas do diagrama de fogo. ^[11]

3. Análise foto-granulométrica do material fragmentado.

3.1. Fragmentação

A granulometria obtida no desmonte, após a realização de uma pega de fogo, e a capacidade de exercer controlo (ainda que provisional) sobre essa fragmentação, é um dos fatores mais importantes tendo em vista a minimização global dos custos de toda a operação de extração. Mesmo que após a realização de uma pega de fogo ainda seja possível a realização de um processo de taqueio, fragmentação de blocos de grande dimensão, segundo Holmberg et al (2005) um projeto de exploração pode ser inviabilizado se o processo de fragmentação não for devidamente controlado. Na figura 29 é possível observar um exemplo de blocos de grandes dimensões, com uma granulometria superior a abertura do britador primário, o que pode resultar na paragem do processo de britagem com consequentes atrasos ou mesmo paragens nos ciclos de carga e transporte adjacentes.



Figura 29- Imagem ilustrativa do taqueio de blocos de grandes dimensões após a realização do desmonte com recurso a explosivos.

Existem diversos fatores que influenciam o grau de a fragmentação do maciço desmontado em bancada como:

- Estado da fracturação natural do maciço rochoso;
- Características geomecânicas do maciço rochoso;
- Tipo de diagrama de fogo;
- Perfuração específica;
- Tipo de explosivos;
- Carga específica do explosivo;
- Qualidade da perfuração (desvios);
- Dimensão do desmonte.

Com uma melhor caracterização do terreno e do maciço rochoso, e tendo em conta que a elevada produção de blocos de grande dimensão pode levar a custos acrescidos e algumas repercussões no ciclo de carga e transporte e na utilização do martelo pneumático para a realização de taqueio, também o excesso na produção de finos, partículas com granulometrias inferiores a 12 mm segundo Yermakov (2013), sobrecarrega o processo de britagem. É necessário assim estabelecer uma curva granulométrica teórica previsional, de projeto, que ajuste o desmonte ao processo de britagem evitando dispêndios financeiros elevados.

Para a criação de uma curva granulométrica teórica do desmonte, é possível recorrer ao uso de modelos empíricos que permitem a previsão da granulometria do desmonte tendo em conta diversas variáveis como as propriedades geomecânicas do maciço, o diagrama de fogo, as características do explosivo utilizado.

3.2. Modelo *Kuz-Ram*

O processo de estimação da granulometria de um desmonte com recurso a explosivos é um fator importante na estimação prévia de custos e definição da viabilidade de um projeto de exploração. Em 1983, Cunningham no seu estudo para compreender o processo de fragmentação da rocha utilizou o modelo previamente formulado por Kuznetsov em 1973. Este processo era o único modelo disponível para prever a fragmentação até muito recentemente. No entanto, este modelo continua a ser o mais utilizado para estimar a fragmentação de um desmonte com explosivos.

O modelo de *Kuz-Ram*, segundo Cunningham, (2005) é um modelo empírico que relaciona as propriedades do explosivo, as variáveis geométricas do plano de fogo e as propriedades do maciço rochoso a desmontar.

Este modelo tem por base três equações fundamentais:

3.2.1. Equação de Kuznetsov

$$X_m = AK^{-0.8} Q^{\left(\frac{1}{6}\right)} \left(\frac{115}{RWS}\right)^{\frac{19}{20}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde,

X_m - Tamanho médio das partículas (cm);

A - Fator de rocha;

K - Carga específica (kg/m³);

Q - Carga total por furo (kg);

RWS – Potencia relativa do explosivo em relação ao ANFO;

3.2.2. Equação de Rosin – Rammler

$$Px = 1 - \exp\left(-0.693 \frac{x}{x_m}\right)^n \quad (\text{Equação 10})$$

Onde,

P(x) - Fração de material passante no peneiro de tamanho x;

x - Abertura do peneiro;

X_m - Tamanho médio das partículas;

n - Índice de uniformidade;

A representação analítica de distribuição contínua tem por base a percentagem de material passado num conjunto de peneiros. A função de Rosin-Rammler representa bem a distribuição de calibres da rocha fragmentada. Esta equação permite traçar a curva granulométrica tendo em conta os valores da malha do peneiro que são valores estandardizados e o declive da curva **n**.

3.2.3. Índice de uniformidade

$$n = \left(2.2 - \frac{14B}{d}\right) * \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right)} * \left(1 - \frac{W}{B}\right) * \left(\text{abs}\left(\frac{BCL - CCL}{L}\right) + 0.1\right)^{0.1} * \left(\frac{L}{H}\right)$$

(Equação 11)

Onde,

B - Afastamento (m);

S - Espaçamento (m);

d - Diâmetro do furo (mm);

W - Desvio da perfuração (m);

L - Comprimento total da carga (m);

H - Altura da bancada (m);

BCL - Comprimento da carga de fundo (m);

CCL - Comprimento da carga de coluna (m);

Gheibie et al (2009), defendeu num artigo publicado pelo mesmo que valores baixos de **n** implicam uma gama de granulometrias elevada, já quando os valores de **n** são valores altos, estamos perante uma granulometria uniforme.

Para obter uma diminuição uniforme da fragmentação é possível através de um aumento do Afastamento (B) e do Espaçamento (S) Kaneko et al (2004).

Jimeno et al (2003) defendem que o valor do índice de uniformidade deve variar entre valores de 0.7 e 2.2.

3.2.4. Rock Factor

O *Rock Factor* ou fator rocha em Português foi desenvolvido por Lilly em 1986 e modificado por Cunningham em 1987. É um parâmetro calculado através das propriedades geomecânicas do maciço rochoso, onde são incluídas as descontinuidades do mesmo e obtém-se através da seguinte expressão:

$$A = 0.06(RMD + RDI + HF) \quad (\text{Equação 12})$$

Onde,

RMD – Descrição do maciço rochoso

RDI – Influência da densidade

HF – Fator dureza

Os valores dos parâmetros acima referidos podem ser obtidos da seguinte forma

Tabela 3- Valores de RMD. ^[11]

Condição da Rocha	Valor do RMD
Friável	10
Fraturado	JF
Maciço	50

O valor do JF (*Joint Rock Factor*) representa o fator de rocha quando esta apresenta fraturas ou descontinuidades e obtém-se através da seguinte expressão:

$$JF = (JCF * JPS) + JPA \quad (\text{Equação 13})$$

O parâmetro JFC (*Joint Condition Factor*) refere-se à abertura e condição em que as descontinuidades se encontram e os seus fatores estão indicados na tabela seguinte:

Tabela 4- Valores de JFC. ^[11]

Condição das descontinuidades	Fator JFC
Fraturas apertadas	1
Fraturas relaxadas (com alguma abertura entre elas)	1.5
Fraturas abertas, mas com preenchimento	2

O parâmetro JPS (*Joint Plane Spacing*) reproduz um fator que depende do espaçamento absoluto entre fraturas. Se o espaçamento for superior a 30 centímetros, calcula-se o valor P (*Pattern*) através da seguinte expressão que depende de dados geométricos do plano de fogo: o afastamento (B) e o espaçamento (S):

$$P = (B * S)^{0.5} \quad \text{(Equação 14)}$$

O fator JPS encontra-se na tabela seguinte:

Tabela 5- Valores de JPS. ^[11]

Espaço entre fraturas	Valor a atribuir JPS
$\leq 0,1 \text{ m}$	10
$0,1 < 0,3 \text{ m}$	20
$0,3 < 0,95 P$	80
$> P$	50

Analisando o espaçamento das descontinuidades é possível verificar que este pode variar entre um peso de valor 10 e um valor de 80. Este facto deve-se ao fenómeno de as descontinuidades se poder encontrar muito ou pouco espaçadas (Holmberg et al 2005). Após o processo de detonação, as descontinuidades condicionam fortemente a granulometria do desmonte obtida. Quando as descontinuidades se encontram mais afastadas, a fragmentação dependerá essencialmente das características do explosivo e do espaçamento entre furos.

A figura seguinte ilustra a relação entre o espaçamento absoluto entre as descontinuidades e o rácio de espaçamento da furação. Ou seja, representa o efeito do rácio do espaçamento entre furos com o espaçamento entre descontinuidades na fragmentação por explosivos.

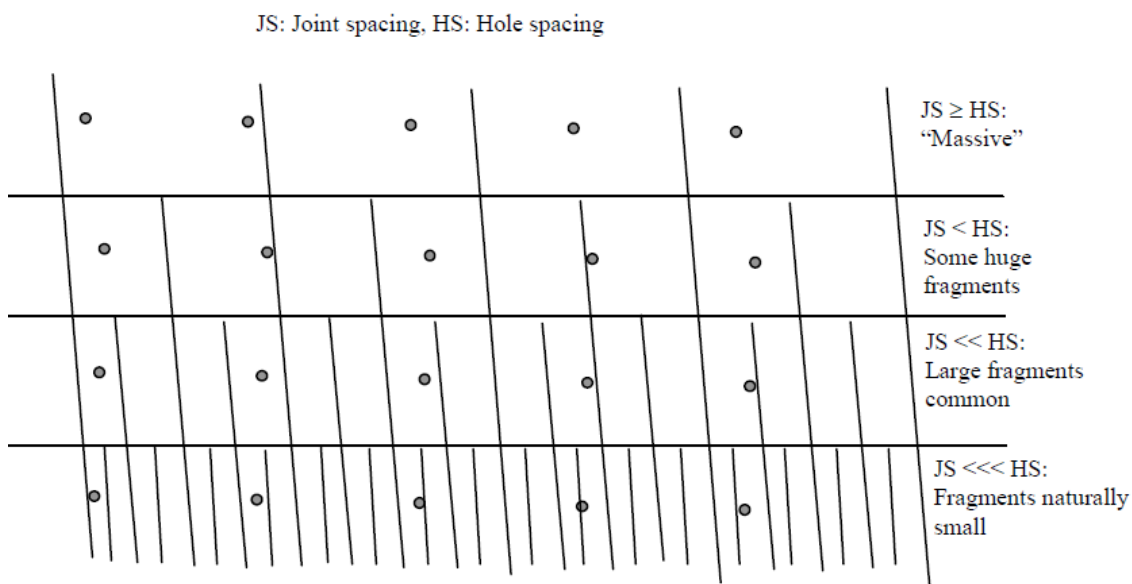


Figura 30- Efeito da relação entre o espaçamento entre furos e o espaçamento entre descontinuidades na fragmentação por explosivo. ^[11]

Segundo Cunningham, 2004, se o espaçamento entre descontinuidades e o padrão de furação forem ambos inferiores a 30 centímetros, ou se o valor de P for inferior a 1 metro, este algoritmo produz resultados anómalos.

Para a determinação do parâmetro JPA (*Joint Plane angle factor*) caracteriza o ângulo do plano de fraturas em relação à face livre, ou seja, é em função da direção e da inclinação em relação à face livre. E o seu valor é obtido através da tabela seguinte.

Tabela 6- Valores de JPA. ^[11]

Ângulo do plano das fraturas	JPA
Inclinação para fora da cara livre	40
Direção perpendicular à face livre	30
Inclinação para dentro da cara livre	20

Em seguida, calcula-se o fator RDI (*Rock Density influence*) a influência da densidade, através da seguinte expressão:

$$RDI = 25d - 50 \quad (\text{Equação 15})$$

Por último, HF (*Hardness factor*) representa o fator de dureza da rocha. Para tal, utilizam-se os valores do Módulo de Young (*Y-Elasticity Modulus*) ou Módulo de Elasticidade que é a razão entre a tensão e a deformação e do UCS (*Unconfined Compressive Strength*), o valor da resistência à compressão uniaxial da rocha.

Tabela 7 - Valores de HF. ^[11]

Condição	HF
$Y < 50 \text{ GPa}$	$Y/3$
$Y > 50 \text{ GPa}$	$UCS / 5$

Para rochas de fraca resistência o valor de resistência à compressão uniaxial é praticamente desprezável, pelo que desta forma, se utiliza o valor do Módulo de Young.

Blasting behavior	Rock type	Rock factor	Technical powder factor (kg/m ³)	Rock constant (kg/m ³)
Bad	Andesite, Dolerite, Granite Ironstone, Silcrete	12-14	0.70	0.62
Fair	Dolomite, Quartzite, Serpentine, Schist	10-11	0.45	0.40
Good	Sandstone, Calcrete Limestone, Shale	8-9	0.30	0.27
Very good	Coal	6	0.15-0.25	0.14- 0.22

Figura 31 - Fatores de Rocha para alguns tipos de rocha e respetivo comportamento face ao rebentamento. ^[11]

O fator de rocha (A) é um valor crítico, ou seja, representa a difícil tarefa de determinar o efeito real da geologia no processo de estimativa dos valores dos calibres. Procura-se a sua otimização ou a utilização de um outro fator de correção que Cunningham (2005) indica situar-se entre 0,5 e 2.

3.3. Influência do desmonte na granulometria obtida

Segundo Sanchidrian *et al* (2012), no contexto da fragmentação de rocha é possível representar estatisticamente a população de partículas. As partículas em estudo não têm forma esférica ou cúbicas perfeitas, são antes, fragmentos de geometria indefinida e variada. A distribuição realizada agrupa as partículas, desde as de menor dimensão de grão até às de maior dimensão, de acordo com a sua capacidade de passar uma determinada malha.

A amostragem para determinar essa distribuição envolve a medição das partículas representativas através de um sistema viável, a construção de um histograma através do qual se identifica a função densidade, ou seja, qual a quantidade de material num determinado intervalo de calibres. A distribuição percentual desses calibres é representada numa curva cumulante que indica a percentagem de material abaixo de cada calibre.

Quando a fragmentação é avaliada por análise de imagem, apenas é considerada a área que o fragmento representa, a partir do qual se pode estimar o seu volume. Os modelos empíricos de previsão são função de vários parâmetros e permitem facilmente estabelecer a relação funcional entre os dados no maciço a desmontar e a distribuição de calibres.

Por um lado, os modelos preveem os parâmetros de uma determinada função de distribuição de calibres para os quais se pode construir a curva. Vários trabalhos se destacam no estudo de modelos de interação explosivo-rocha para compreender o processo de fragmentação da rocha com explosivos nomeadamente Kuznetsov (1973), Cunningham (1983), Lilly (1986), Sarma (1994) e Djordjevic (1999). Por outro lado, o processamento das imagens digitais inclui uma determinada relação de calibre versus distribuição para a qual os parâmetros se adequam. ^[20]

3.4. Análise Foto-granulométrica

A determinação da granulometria da fragmentação do material desmontado através do método de crivagem tradicional, recorrendo a baterias de crivos em agitadores, principalmente pela presença de grandes quantidades de material de calibre muito elevado, torna-se inviável devido aos montantes de custos associados e à interrupção que poderá provocar no ciclo da produção para a operacionalização desta eventual atividade. Para contornar estas situações, foram criadas para medir a fragmentação, nomeadamente leitores de escala que se colocam nas instalações de processamento de minerais e captam, de forma mais ou menos contínua, as quantidades de material em cada calibre através de

software de análise de imagem digital. A este processo é atribuído o nome de análise foto-granulométrica.

Os *softwares* de processamento de imagem digital foram desenvolvidos e comercializados nos anos 90 do século XX e são uma ferramenta aceite pela indústria mineira e construção civil, quer na produção, quer no processamento de minerais (Catasus, 2004). Com o desenvolvimento tecnológico muitos são os *softwares* que operam no mercado como por exemplo o *Fragscan*® (Schleifer & Tessier, 2000); *Spilt Desktop*® (Split Engineering, 2001); *PowerSieve*®; e *Wipfrag*® (Maerz & Pelangio, 1999).

Estes *softwares* não afetam o processo de produção e desmonte de material e são praticamente a única ferramenta que avalia os calibres de fragmentação do material logo após o desmonte ou em situações desejadas. A avaliação granulométrica permite controlar a distribuição dos calibres obtida que, quando comparada com a pretendida, permitirá intervir no processo de fragmentação e, dessa forma, tentar otimizar o processo de classificação e fragmentação. Apresentam ainda algumas vantagens como:

- Serem um método económico e expedito de fácil obtenção de resultados;
- O processamento é bastante rápido, mesmo que se trate de uma grande quantidade de material.
- Possível o seu uso em qualquer altura, mesmo que em paralelo com outras operações a decorrerem.

Estes programas utilitários consistem no processamento de imagens digitais, à escala cinzenta, desenhado para calcular a distribuição de tamanhos da rocha fragmentada resultante do desmonte com recurso a explosivos. As imagens digitais, em escala cinzenta, obtêm-se com uma simples máquina fotográfica digital ou mesmo a camara de um telemóvel ou suporte portátil que possa captar imagem ou vídeo. Uma vez inserida no programa, este processa a imagem analisando a cor e convertendo-a numa escala de cinzentos. Em seguida estima a lineação de contorno das partículas e realiza a análise estatística com correção e estima da quantidade de finos.

Os programas de processamento de imagem podem ser utilizados para avaliar desmontes com explosivos, material intacto extraído de uma mina, pilhas de lixiviação ou ainda aterros de estéreis.

Apesar das vantagens, salienta-se que a estimativa de calibres através do processamento de imagens apresenta algumas limitações a ela inerentes. Alguns erros de leitura da pilha de material são mais ou menos permanentes, nomeadamente o local onde a foto é captada, a luminosidade que incide sobre a pilha no momento da captação, as alterações produzidas pelo operador do programa e a colocação dos objetos com medida previamente definida para efeito de escala. A juntar a estas imperfeições somam-se ainda os desvios e erros inerentes ao próprio sistema. Para uma melhor análise foto-granulométrica, os operadores optam pela captação de imagem em tela transportadora

uma vez que apresenta menores erros do que a captação de imagem na pilha. Como maior inconveniente e principal dificuldade de obtenção, o material do desmonte com explosivo comporta calibres que não podem ser transportados em telas, logo é necessária a obtenção de imagens da pilha de material desmontado.



**Figura 32 – Exemplo de imagem obtida após desmonte com recurso a explosivos.
(Pedreira Secil, Penafiel, 2017)**

Para a determinação da granulometria do material desmontado existem diversos *softwares* para análise e posterior determinação da curva granulométrica respetiva como é possível verificar anteriormente. Durante a elaboração desta dissertação o *software* utilizado é o *WipFrag*, este vai permitir a determinação das classes granulométricas do material desmontado, bem como obter a curva granulométrica para posteriormente analisar, calibrar e obter as respetivas conclusões.

O *WipFrag* é um *software* de análise de imagem que tem por base análise de fragmentos recorrendo a função *Swebrec*. A função *Swebrec* é uma função de distribuição de tamanhos de fragmentos que liga a fragmentação da rocha através do desmonte com recurso a explosivos e por esmagamento. Esta função oferece excelentes ajustes para centenas de conjuntos de dados de fragmentação peneirados com coeficientes de correlação de 0,997 ou melhores em várias faixas de tamanhos de fragmentos. Uma versão recente reproduz as curvas de fragmentação peneiradas até o alcance de $-100\ \mu\text{m}$ e também lida com os dados de moagem do moinho de bolas. Além disso, a função *Swebrec* apresenta algumas características como:

- Capacidade de ser usada no modelo *Kuz-Ram*, removendo duas das suas desvantagens - a má capacidade preditiva na faixa de finos e o limite superior de corte para bloquear tamanhos;
- Reduz a descrição de uma família de JKMRRC (Julius Kruttschnitt Mineral Research Center) das funções de quebra de triturador com base no conceito de t_{10} ;
- Estabelece uma nova família de funções de característica de rutura natural (NBC) com uma forma realista que conecta fragmentação de explosão e trituração mecânica e oferece uma nova visão sobre o funcionamento dos subcircuitos OCS (Sequencia ótima de fragmentação). Sugere-se que o modelo *Kuz-Ram* estendido, com a função *Swebrec* substitua a função *Rosin-Rammler* e seja denominado de modelo KCO.

O conceito t_{10} , é um conceito em que t_{10} define a parte de material de uma fração de tamanho de material sujeito a um teste de fragmentação, onde depois de fragmentado o seu tamanho é inferior a um décimo do tamanho do material disponível na alimentação.

4. Caso de estudo

Após uma introdução teórica do modelo da furação e de diversos parâmetros relativos a esta atividade ligada principalmente ao desmonte de rocha com recurso a explosivos a céu aberto, surgiu a necessidade e possibilidade de nos envolvermos em dois casos práticos de modo a analisar os possíveis correlações de desvios observados durante o processo de furação, com os respetivos resultados de fragmentação do maciço, bem como se possível a sua quantificação de modo a poder avaliar a capacidade de resposta da respetiva central de britagem aos erros observados. Esta análise permite determinar se o processo em estudo contém um erro elevado, se é possível aumentar a qualidade da fragmentação e reduzir a criação de blocos de grandes dimensões de forma a evitar a realização de tarefas complementares como a fragmentação (taqueio) de blocos de grandes dimensões que tem granulometrias não admissíveis na planta de britagem primária. Estas tarefas estão intrinsecamente ligadas a atividades secundárias capazes de causar atrasos nos ciclos de trabalho previstos e um consequente dispêndio financeiro associado.

Foram então analisados dois casos distintos, um desmonte real, com dados fornecidos pela empresa O-Pitblast, Lda, dados reais de uma exploração anónima, e uma segunda análise que tem como base os dados obtidos numa uma pedreira da empresa Secil Britas S.A.

4.1. Desmonte O-Pitblast, Lda.

Os dados apresentados neste capítulo são fornecidos pela empresa O-Pitblast, Lda, são dados reais de um desmonte realizado pelos técnicos da mesma empresa, os quais legitimamente solicitaram para assumirmos o compromisso de manter a confidencialidade da origem dos mesmos, facto compreensível e que assumimos na íntegra.

Como fase inicial de estudo surgiu então a necessidade de análise de dados com a possibilidade de produzir as respetivas curvas granulométricas, calibrar as curvas granulométricas reais com as respetivas curvas granulométricas teóricas e determinar o erro associado a perfuração. O desmonte do qual tivemos a possibilidade de ter dados, possui uma análise de perfuração com *boretrak* e a respetiva análise de classes granulométricas do material desmontado por análise fotográfica, o que permite correlacionar eventuais os erros de perfuração com os desvios entre as curvas teórica previsional e real.

Para análise da granulometria produzida no desmonte recorreu-se ao uso do *software* “*WipFrag*”, que recorre ao uso de fotografia digital de uma pilha de material de um desmonte à qual se sobrepõe um objeto para efeitos. Após o processamento de imagem, o utilitário determina a granulometria produzida no desmonte gerando a respetiva curva granulométrica. Após a obtenção dessa curva, e de calibrados os valores dos parâmetros

relativos ao desmonte que nos permitem, pelo método de KCO, obter a curva granulométrica teórica previsionar, procedeu-se à comparação das duas curvas.

Na figura 33 é possível verificar a pilha de desmonte obtida num dos flancos da exploração.



Figura 33 – Pilha de desmonte analisada no “WipFrag”.

Esta imagem é relativa ao flanco direito da pilha de desmonte. Este desmonte realizado com o recurso a explosivos fragmentou a rocha existente tendo sido obtida a respetiva curva granulométrica presente na Figura 34.

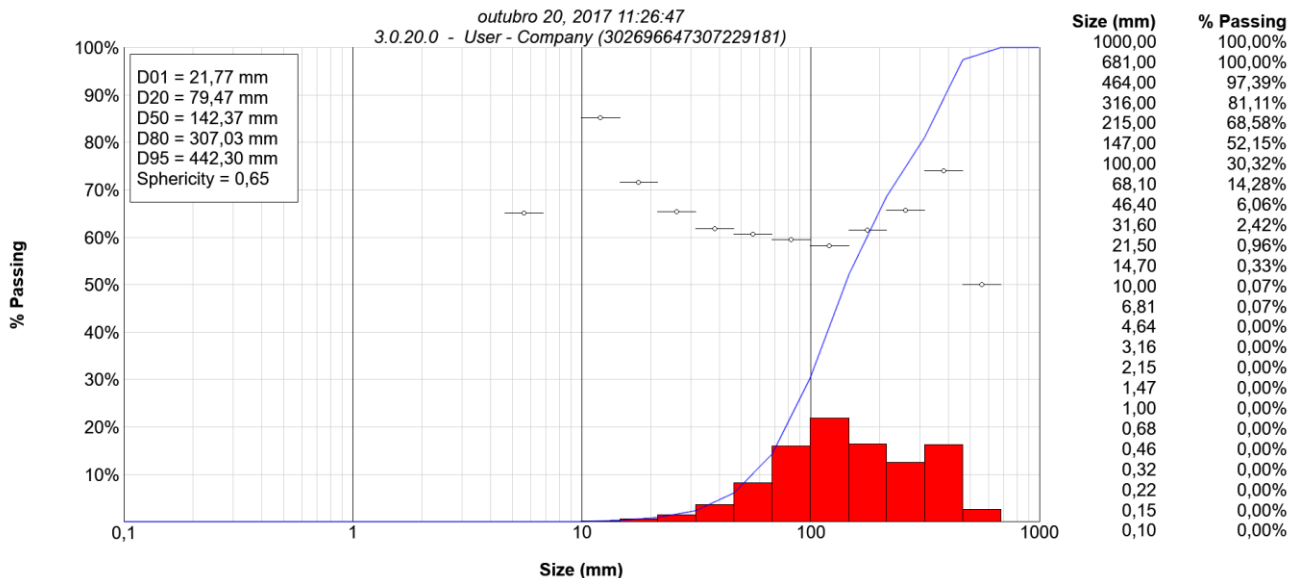


Figura 34 – Curva granulométrica com distribuição das classes no desmonte do flanco direito.

Após a determinação da curva granulométrica de desmonte realizado foram introduzidos os parâmetros de perfuração relativos ao desmonte no *software* de modo a ser obtida a curva granulométrica teórica. Esses parâmetros podem ser observados na figura 35.

mm in

Bench Height (m) ? 15,00

Burden (m) ? 3,00

Spacing (m) ? 3,00

Diameter (mm) ? 86,00

Rock Factor ? ☐ Auto 3,60

Drill Accuracy (Std Dev) ? 0,50

Relative Weight Strength ? 75,00

Density (g/cc) ? 0,82

KCO Blast Model

Figura 35 – Parâmetros relativos ao desmonte.

Os dados relativos ao desmante são observados na figura 35. É possível constatar de que se trata de um em bancada com quinze metros de altura, uma malha de perfuração quadrada de espaçamento e afastamento igual a três metros. O diâmetro da furação realizada é de oitenta e seis milímetros. Com a introdução destes parâmetros no *software* foi obtida uma curva granulométrica teórica (vermelho) como é possível observar na figura 36.

Obtidas as curvas real e teórica, procedeu-se ao processo de calibração, ajustando o mais possível as duas curvas de modo a serem o mais coincidente possíveis.

121

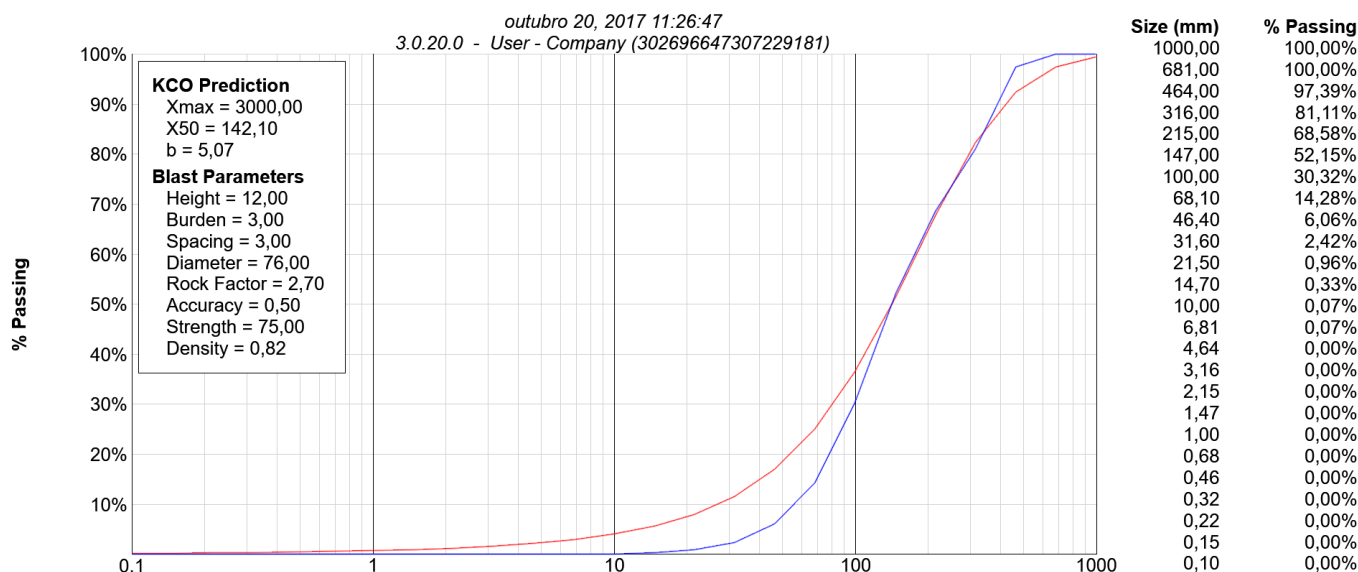


Figura 36 - Representação das curvas granulométricas real e teórica do flanco direito

Este processo ocorreu com o ajuste do parâmetro *Drill Accuracy (standard deviation)*. O desvio padrão nesta posição é designado como o desvio médio da perfuração no final dos furos. Na figura 35 é possível observar que para um ajuste mais rigoroso de ambas as curvas o desvio padrão obtido foi de 0,50. Este valor é definido como sendo o desvio médio observado no fundo dos furos. O conjunto de furos do desmante no flanco direito tem uma média de desvios do conjunto de furos analisados de 0,50 metros. Este valor é um valor médio para o conjunto de furos analisados, o que pode significar que alguns furos apresentam um desvio superior ao valor encontrado, no entanto como forma de minimizar o valor, outros apresentam um valor de desvio da perfuração no fundo do furo inferior a 0,50 metros.

Como forma de avaliar este procedimento, recorreu-se a uma análise pormenorizada do processo de furação de modo a classificar os furos efetuados. Esta classificação foi realizada recorrendo ao equipamento *Boretrak*. Os resultados desta análise estão representados nas figuras 37 e 38.

Boretrak Report

Results for Boretrak Hole # 5 (Laser Borehole # 5)

Customer:
Survey Location:
Face Name: F02
Operator:
Survey Date:

Measured Deviation: X: 0.16 m
Y: -0.58 m
Actual True Vertical Depth:
Actual Hole Depth:
Desired Hole Depth: 12.59 m
Actual Vert Angle: 12.7 °
Desired Drill Angle: 15.0 °
Final Azimuth: 2.8 °
Hole Collar Coordinates:
Northing: 984.79 m
Easting: 1059.37 m
Elevation: 113.06 m

Figura 37 - Parâmetros do furo analisado.

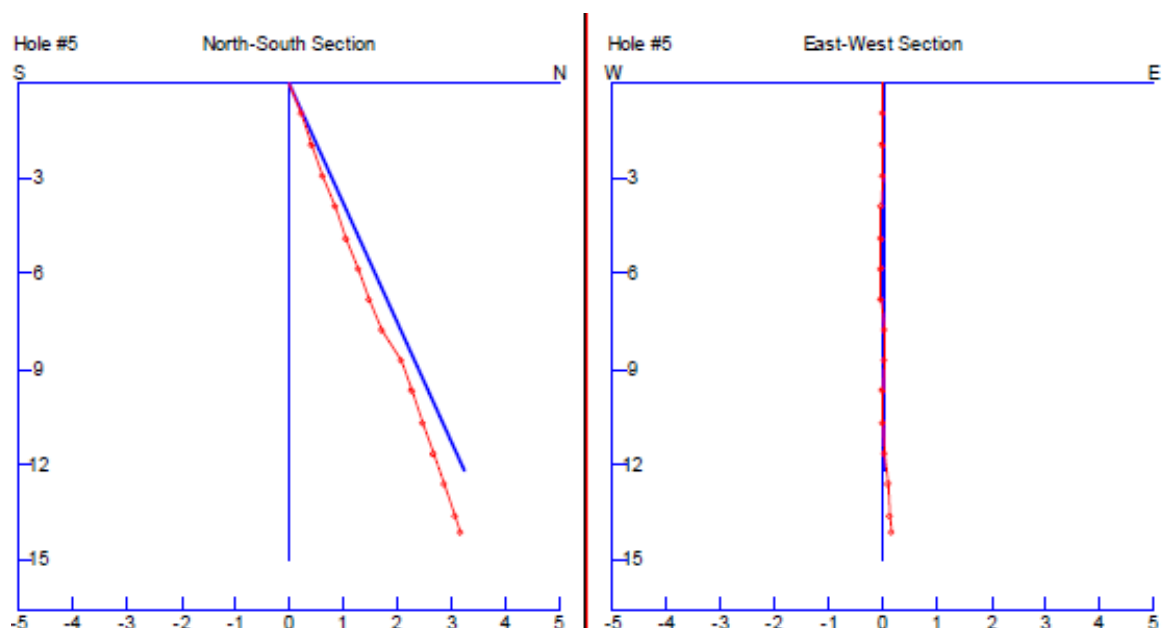


Figura 38 - Esquema virtual direções e inclinações do furo.

As figuras anteriores representam as características finais do furo analisadas através do *Boretrak*. Este furo é uma representação das inclinações médias dos furos do flanco direito, flanco do desmonte analisado anteriormente pela análise foto-granulométrica da pilha desmontada.

Analisando a figura 38, é possível verificar a posição final do furo (linha vermelha) comparativamente com a posição ideal, posição teórica do furo (linha azul). Na direção analisada da secção Norte-Sul, é observado um desvio do furo para norte. Este desvio observado desde a zona inicial da perfuração até ao fundo do furo é uma consequência de um provável mau posicionamento da coluna de perfuração, não tendo sido respeitada a inclinação desejada e ocorreu um erro na perfuração que tem influência no desmonte final na bancada e na consequente fragmentação da rocha.

Comparando valores apresentados nas figuras de análise com recurso a *Boretrak*, é visível que na secção Este-Oeste, o erro de perfuração é muito baixo, em doze metros de perfuração apenas se verifica um desvio de dezasseis centímetros não sendo então considerado aquele pequeno desvio no fundo do furo realizado comparativamente com a posição teórica pretendida. Na análise da secção de desmonte Norte-Sul, o erro observado é da ordem dos cinquenta e oito centímetros, valores muito próximos do valor de desvio médio do furo observado na calibração das curvas no *software* “*WipFrag*” quando o erro médio analisado no fundo dos furos era um valor muito próximo dos 0,50 metros de desvio de cada furo em comparação com a posição ideal esperada.

Realizada uma segunda análise ao flanco esquerdo de modo a poder aumentar a veracidade dos dados disponíveis, foi determinada a granulometria da pilha desmontada através da análise de uma fotografia digital da pilha no flanco esquerdo que será apresentada na figura 39.

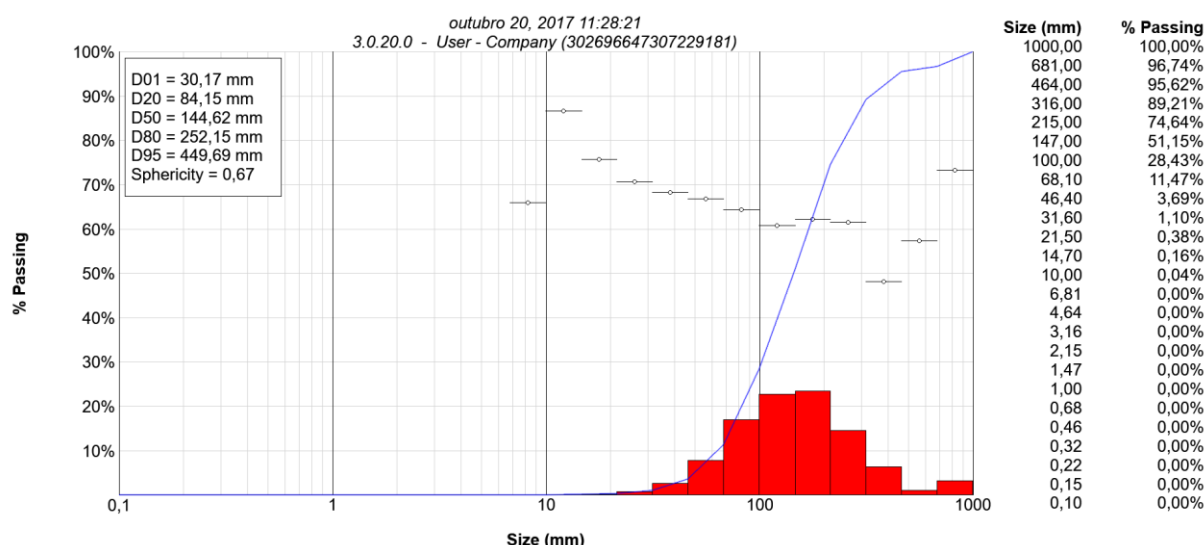


Figura 39 - Curva granulométrica com distribuição das classes no desmonte do flanco esquerdo.

Considerando os parâmetros de planeamento da pega de fogo espaçamento, afastamento e altura de bancada constantes para este desmonte, os valores empregados para a determinação da curva teórica estão apresentados na figura 40.

mm

in

Bench Height (m) ?

15,00

Burden (m) ?

3,00

Spacing (m) ?

3,00

Diameter (mm) ?

86,00

Rock Factor ? ☐ Auto

3,60

Drill Accuracy (Std Dev) ?

0,00

Relative Weight Strength ?

75,00

Density (g/cc) ?

0,82

KCO Blast Model

Figura 40 - Parâmetros relativos ao desmonte.

Recorrendo a introdução destes parâmetros no *software* de análise de imagem, é possível obter uma representação da curva granulométrica real representada na figura 41 para posteriormente se proceder a calibração de ambas as curvas apresentadas e determinar um erro de perfuração para o desmonte realizado.

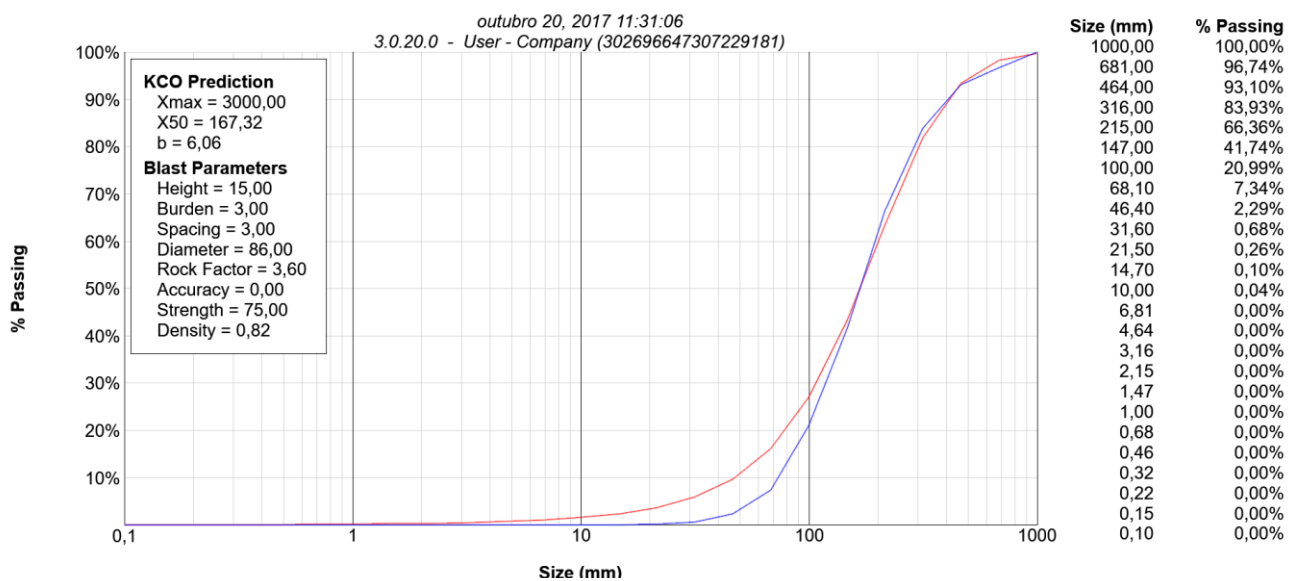


Figura 41 - Representação das curvas granulométricas real e teórica do flanco esquerdo.

Após se proceder a respetiva calibração, foi determinado um valor ajustado de desvio padrão médio relacionado com o desvio no fundo dos furos. Este valor como é possível verificar na figura 40 é de zero metros de desvio por furo, é um desvio nulo. Significa que este furo é uma representação do furo ideal, sem desvios associados ao processo de furação. Para justificar este valor foi realizada uma comparação com os resultados da leitura do *Boretrak* de modo a comprovar a posição final do furo.



Figura 42 - Parâmetros do furo analisado.

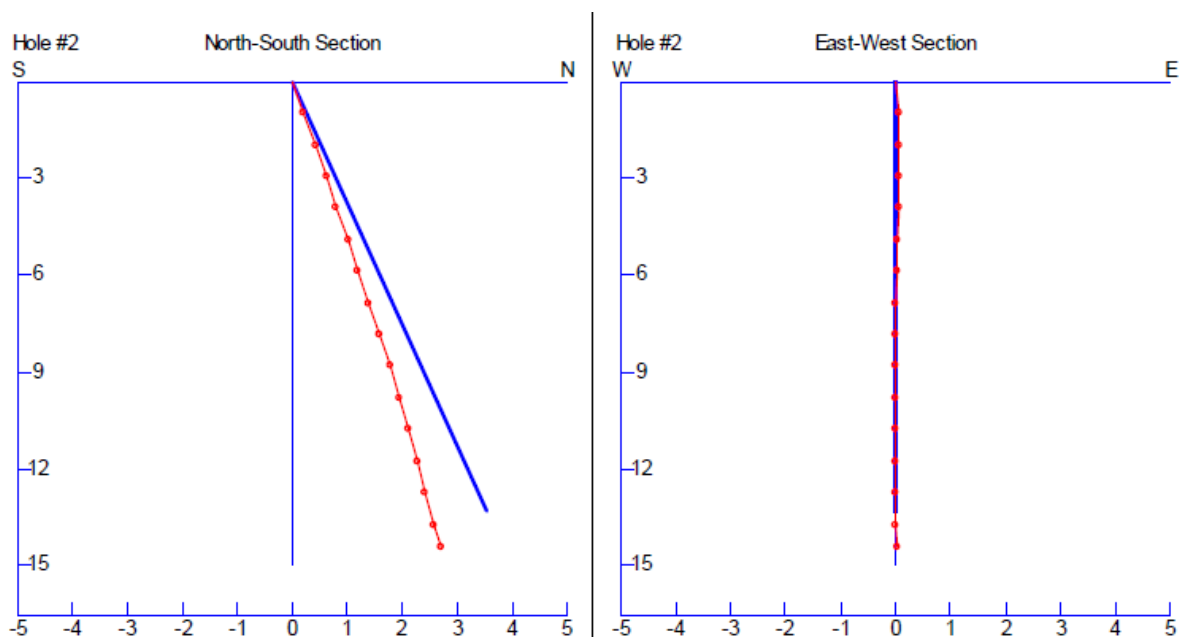


Figura 43 - Esquema virtual direções e inclinações do furo.

Analisando o resultado final da leitura do *Boretrak* nos furos realizados no flanco esquerdo do desmonte são obtidos resultados diferentes. As figuras 42 e 43 são retiradas do relatório disponibilizado pela ferramenta *Boretrak* após a análise dos furos. Confirmando a posição final do furo (linha vermelha da figura) com a posição teórica (linha azul) na figura 59 verifica-se que na secção Este-Oeste, o furo está muito próximo do ideal, sendo que apenas se verifica um desvio de dois centímetros entre a posição real e a posição pretendida, sendo desvalorizado este valor relativamente nulo na análise dos resultados.

Verificando a posição final do furo na secção Norte-Sul foi obtido um erro com uma dimensão superior. A posição final do furo nesta secção é de um metro e dez centímetros desfasado da posição pretendida pelo planeamento da pega de fogo.

Surgiu então a necessidade de colocar a dúvida de como seria possível obter um resultado nulo pelo desvio da perfuração em relação a posição final pretendida quando o resultado obtido na análise de fotografia com o recurso ao *WipFrag* é nulo?

Uma das ferramentas utilizadas no apoio a leitura e planeamento de desmontes é o *Laser profile* que lê e representa em suporte digital a frente livre da zona do desmonte a efetuar.

No Anexo a esta Dissertação, com o título "Modelos digitais de terreno no apoio ao planeamento de desmontes em pedreiras. Perfilómetros *laser*, *Boretrak* e a Plataforma O-Pitblast", desenvolvemos um pouco mais este tema da Perfilometria *Laser*.

Com a análise da frente livre no flanco esquerdo da bancada antes de ser realizado o desmonte, na posição do furo #2, furo analisado com o *Boretrak* anteriormente foram obtidas algumas conclusões.

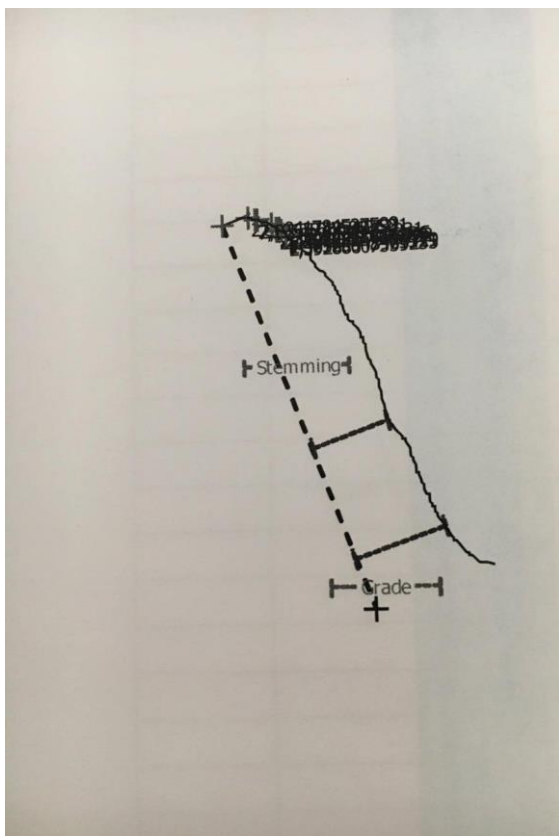


Figura 44 – Representação da frente livre esperada.

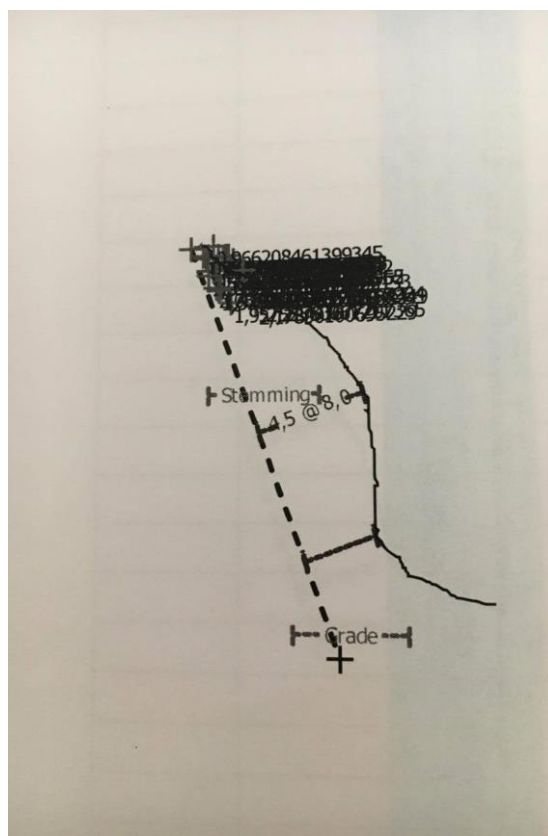


Figura 45 - Representação da frente livre real.

As figuras 44 e 45 representam dois resultados obtidos pela análise do *Laser profile* na frente livre realizado após o planeamento do desmonte e a operação de perfuração. O diagrama desenhado e realizado na frente de trabalho, neste exemplo estudado, inclui furos com geometrias iguais o que teoricamente pressupõe a existência de uma frente livre regular. Ora, após a análise realizada na zona do furo #2, é fácil verificar que a frente livre não é regular como se esperaria na figura 44, mas sim o resultado observado na figura 45. É de realçar uma pequena reentrância na bancada causada pela elevada fragmentação resultante provavelmente de um desmonte realizado anteriormente. Com a existência desta anomalia na superfície da frente livre da bancada, caso a furação fosse realizada na posição pretendida, ou a carga de explosivos necessitava de ser reduzida ou então existiria uma forte possibilidade de gerar projeção de blocos quando o desmonte fosse realizado.

Com a existência de desvios naquele furo, a carga de explosivo foi a prevista, e o afastamento do furo a frente foi considerado constante sendo que o programa de análise de imagem e determinação de parâmetros de perfuração não considera este desvio como erro, pois não influenciou a fragmentação com a produção de blocos de grandes dimensões comparado com a percentagem de blocos previstos, mas sim uma maior percentagem de blocos com uma fragmentação elevada, isto é, maior percentagem de finos, pois a distancia entre o furo #2 e o furo presente na segunda fila na mesma direção diminuiu, o que originou um consequente aumento da fragmentação.

4.2. Pedreira Secil Britas S.A.

Terminado o estudo de análise de pilhas de desmonte recorrendo a *software* de análise de imagem e posteriormente relacionar as curvas granulométricas obtidas pelo *software* e possíveis erros de perfuração de um caso teórico, dos dados fornecidos pela empresa O-Pitblast, Lda, surgiu a necessidade de uma análise de dados recolhidos pessoalmente, com recurso a análise de técnicas e procedimentos práticos no terreno, recorrendo a uma pedreira da empresa Secil Britas S.A..

O estudo foi realizado na pedreira da Secil Britas “Cabeça Santa”, entre março e maio do presente ano de 2017. Este estudo foi realizado tendo em conta as diversas condições de utilização do equipamento, e analisando as etapas de perfuração da rocha, carregamento e detonação do explosivo.

Começamos por um período de contacto para conhecimento das condições de atividade da pedreira, bem como por recolha de informação sobre as características geomorfológicas do maciço presente. A exploração já se encontra num estado avançado, pelo que foi analisado o estado de exploração da mesma no que respeita a frentes de escavação, regularidade das plataformas, condições de operação dos equipamentos, sendo que, pelo decorrer do nosso contacto com estas realidades, tivemos possibilidade de, posteriormente, formular alguns critérios de melhoria dessas condições existentes.

Neste centro de produção o sistema *laser profile* foi usado sistematicamente antes de cada carregamento de forma a controlar as frentes livres e determinar a carga de explosivos necessários em cada furo da primeira linha da pega de fogo, assim como pontualmente se verifica o uso do sistema de medição *boretrak* para aferição da direção, inclinação e profundidade dos furos realizados.

4.2.1. História

A Secil Britas S.A. é uma empresa que foi criada em 1988, e dedica-se à produção e comercialização de agregados naturais, nomeadamente areias, gravilhas, britas, toutvenants, balastros e enrocamentos, destinados à produção de materiais de construção (betão, argamassas e misturas betuminosas), à construção rodoviária e ferroviária e à execução de outros trabalhos de engenharia civil.

A Secil Britas S.A. é uma empresa do Grupo Secil cuja atividade principal é a exploração de pedreiras para fornecimento de materiais para a indústria da Construção Civil. O grupo é 100% Português, com atividade produtiva em Portugal, Angola, Brasil, Cabo Verde, Tunísia, Líbano e Moçambique.

A Secil Britas S.A. tem uma capacidade de produção de 6.650.000 toneladas, distribuída pelos doze centros localizados de norte a sul de Portugal Continental. Na sequência de uma reorganização estrutural, a Secil Britas S.A. passou a disponibilizar também serviços de furação e desmonte de pedreira, transporte de rocha e movimentação de materiais para a recuperação de pedreiras e arranjo de caminhos. A Secil Britas S.A. pauta-se por critérios de qualidade sendo certificada de acordo com a NP EN ISO 9001:2008. A empresa possui também certificação segundo as normas harmonizadas de agregados, no âmbito da respetiva marcação CE. ^[12]



Figura 46 – Apresentação da empresa. ^[12]

4.2.2. Localização

A exploração de Penafiel, designada como pedreira de “Cabeça Santa”, tens a sua localização na Travessa do Esporão nº 582, Freguesia de Cabeça Santa no concelho de Penafiel, a indicação a seguir será na EN106 virar á esquerda em direção a Rio de Moinhos.

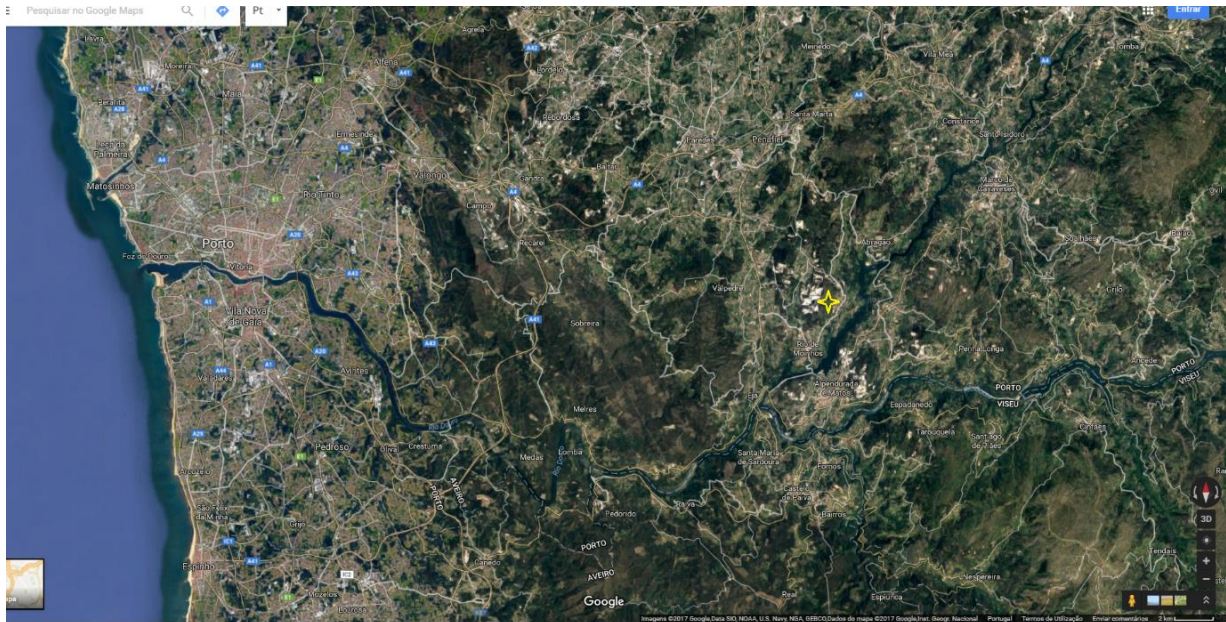


Figura 48 – Localização geográfica da pedreira.

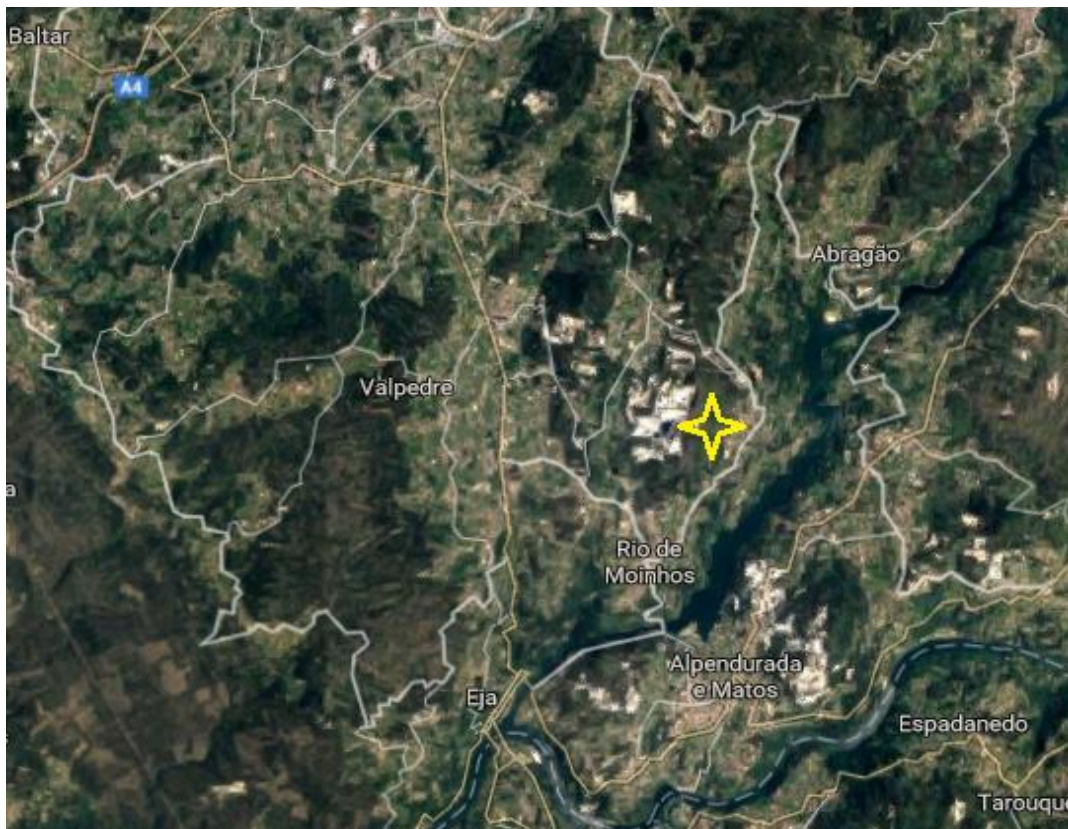


Figura 47 - Localização geográfica da pedreira.

4.2.3. Principais matérias-primas produzidas.

A matéria explorada na pedreira de Cabeça Santa são essencialmente areias e britas. Estes agregados proveem de uma rocha de natureza granítica, nomeadamente, um granito porfiroide, sendo a produção atual da ordem das 1 200 000 toneladas de rocha desmontada.



Figura 49 – Vista geral da pedreira.

Na tabela 8 estão identificados os principais componentes comercializados e certificado segundo as normas Europeias, que permitem uma maior abrangência na procura de mercado. Com uma leitura um pouco mais atenta a tabela é possível observar que os principais componentes comercializados são as areias e as britas de diversas classes granulométricas.

É então reconhecido que o material comercializado é de granulometria fina, o que significa que uma melhor fragmentação, com a chegada de blocos de menores dimensões a planta de britagem é uma vantagem uma vez que diminuirá os custos associados a um processo de britagem mais intensivo e rigoroso.

Tabela 8 – Principais produtos comercializados.

Norma Europeia			
EN 12620	EN 13043	EN 13242	
Areia Amarela (0/4)	ABGE Base (0/40)	ABGE Base (0/40)	
Areia Azul (0/4)	ABGE Sub-Base (0/40)	ABGE Leito do Pavimento (0/40)	
Areia Fina (0/2)	Brita 10/14 C.1	ABGE Sub-Base (0/40)	
Areia Grossa (0/6)	Brita 10/14 Drenante C.1	Areia Amarela (0/4)	
Areia Média (0/4)	Brita 14/20 C.1	Areia Azul (0/4)	
Brita 14/20 C.1	Brita 20/40 C.1	Areia Fina (0/2)	
Brita 20/40 C.1	Brita 4/10 Rugoso C.1	Areia Média (0/4)	
Brita 6/12 C.1	Brita 6/12 C.1	Brita 14/20 C.1	
Brita 6/14 C.1	Brita 6/12 Drenante C.1	Brita 14/20 C.2	
Gravilha 1/4 C.1	Brita 6/14 C.1	Brita 20/40 C.1	
Gravilha 4/10 C.1	Gravilha 1/4 C.1	Brita 20/40 C.2	
	Gravilha 4/10 C.1	Brita 31,5/56 C.1	
	Pó Mineral 0/4 C.1	Brita 40/63 C.2	
	Pó Mineral 0/6	Brita 6/14 C.2	
		Pó Mineral 0/4 C.1	
		Pó Mineral 0/4 C.2	
		Pó Mineral 0/6	

Norma Europeia			
EN13450	EN 13383-1	EN 13139	Produtos Especiais
Balastro 31,5/50	Rachão 90/180 C.2	Areia Amarela (0/4)	Areias
	Rachão 90/250 C.2	Areia Azul (0/4)	Balastro
		Areia Fina (0/2)	Britas drenantes
		Areia Média (0/4)	

4.2.4. Descrição do processo de exploração

De modo geral, uma pedreira possui um ciclo de desmonte e tem a seguinte sequência de trabalhos: desmatção, limpeza dos solos de cobertura, perfuração de rocha, carregamento de explosivos e detonação, seguido das atividades de carga e transporte até ao sector de britagem. Durante a realização deste ciclo é ainda fundamental a realização de atividades secundárias como a fragmentação de blocos de grandes dimensões (taqueio) que dificultam a entrada de material no britador primário, a remoção de água presente no patamar mais profundo da pedreira, bem como todas as outras operações auxiliares, das que destacamos as de observância rigorosa das condições de higiene, segurança no trabalho e a minimização dos impactes ambientais decorrentes desta atividade extrativa.

Esta pedreira já se encontra em laboração há diversos anos, pertencendo a este grupo desde 1988, pelo que a parte inicial de desmatção e limpeza dos solos já está quase toda concluída. A fase de exploração encontra-se já em zonas mais profundas relativamente ao ponto mais alto da pedreira, estando atualmente a realizar atividades de desmonte de rocha no piso 8. A atividade de perfuração tem atualmente lugar no piso 8, sendo que no piso inferior (piso 7), são realizadas as atividades de carga e consequente transporte, e também atividades secundárias como nivelamento dos pisos, colocação de barreiras de proteção e desmonte de blocos de grandes dimensões.

4.2.4.1. Estado geral das frentes de escavação

As frentes de desmonte observadas na pedreira atualmente encontram-se com um estado de desenvolvimento relativamente elevado e bem definidas.



Figura 50 – Estado das frentes de desmonte.

É possível observar na figura 50 o estado atual das frentes de desmonte. Verificam-se algumas irregularidades provenientes dos desmontes anteriores que são consequências da fracturação existente no maciço, ou alguns possíveis erros de carregamento de explosivo existindo pontos onde a energia libertada no desmonte foi extremamente elevada e fraturou a rocha existente tendo criado pequenas irregularidades na frente livre.

Uma maior regularidade das frentes livres do desmonte facilita o trabalho dos operadores, sendo muito mais fácil a operacionalização de todas as atividades do ciclo produtivo, em particular a de perfuração, bem como carregamento de explosivos. Este cenário exige forçosamente um menor esforço dos operadores e conduz a maior produtividade do equipamento de trabalho. Por outro lado, a dificuldade em visualizar as frentes de trabalho convenientemente dificulta a perfuração, aumentando os eventuais erros que a ela possam ser inerentes. No caso de serem encontradas distâncias à frente pequenas (afastamentos críticos) poderá levar à projeção de blocos durante o processo de detonação dos explosivos. Quando acontecem estas projeções indesejáveis, os responsáveis pela execução das pegas de fogo, por precaução, aumentam a distância à frente, o que levará obrigatoriamente a um aumento da percentagem de blocos de dimensão superior ao desejado nesses setores das bancadas e consequentemente, a um aumento dos custos de produção do produto final.

O observado são frentes livres com pequenas irregularidades e, necessariamente, com pouca necessidade de alterações nas malhas e geometrias gerais das pegas de fogo, o que ajuda no bom desempenho dos desmontes.

4.2.4.2. Irregularidades das plataformas

A regularidade das plataformas, os denominados patamares de bancada, é fundamental para um bom desempenho quer dos operadores quer dos equipamentos, nos processos de desmonte e consequentemente atividades de carga e transporte.

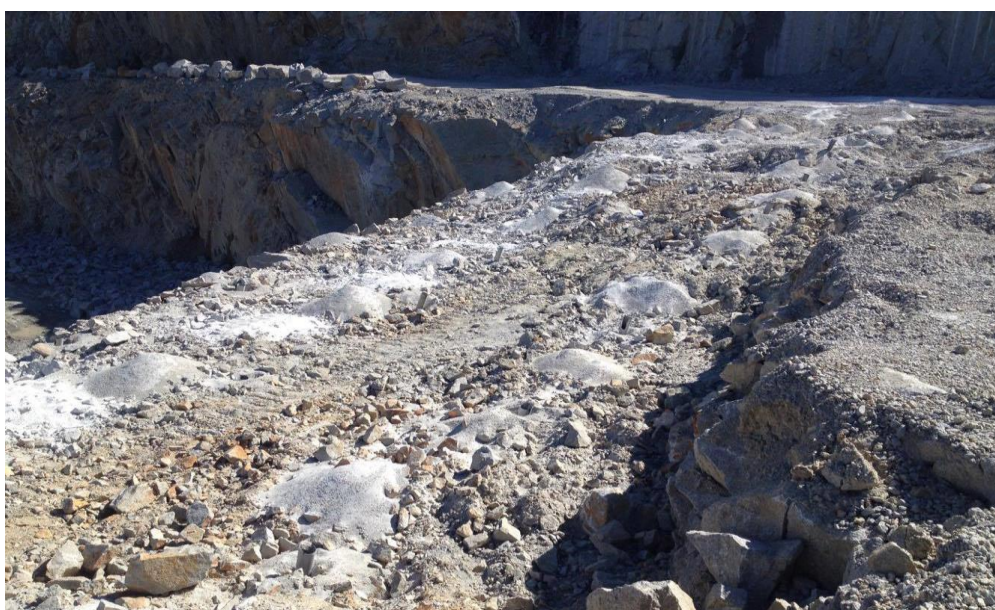


Figura 51 – Estado da plataforma no local da perfuração.

É visível na figura 51 o estado da plataforma no local da perfuração. A plataforma apresenta uma superfície horizontal, sem desníveis consideráveis, e com uma superfície boa para a circulação de máquinas e operadores o que facilitou a movimentação da perfuradora durante a etapa de perfuração.

No entanto a granulometria do material deixado durante o ultimo processo de carga existente naquele local foi extremamente baixa. Na superfície da rocha firme, da rocha por desmontar, foi deixado algum material fragmentado que não foi carregado na sua totalidade. Esta decisão facilita no processo de circulação de máquinas, nomeadamente funcionando como “almofada” de material fino minimizando danos de abrasividade da rocha sobre os pneus das viaturas de carga e transporte, mas apresenta um problema na etapa da perfuração. Com a presença desta camada de material solto, durante a fase de emboquilhamento do bit de perfuração o material tende a desviar-se e interferir no movimento do bit, cria danos no material de perfuração, origina desvios na posição de emboquilhamento e, que no final da realização do furo podem ter uma interferência muito considerável nos resultados finais de fragmentação procurados como desmonte.

4.2.5. Características do desmonte

O desmonte ocorrido nesta etapa de evolução da pedreira pertencente à empresa Secil Britas S.A. é realizado recorrendo a técnicos da própria empresa, e a maquinaria utilizada é também sua propriedade. A máquina usada para realização da furação é uma máquina da Atlas Copco, um ROC D9, e que realiza a perfuração não só nesta pedreira, mas também nas pedreiras propriedade da mesma empresa nas redondezas deste local.



Figura 52 – Perfuradora Atlas Copco ROC D9.

Esta perfuradora tem como função realizar todos os furos necessários para o carregamento de explosivos. Tem associado a si um martelo T51 e dela fazem parte todos os restantes elementos da coluna de aço de perfuração. Os furos são realizados recorrendo a bits com um diâmetro de 81 milímetros, as varas têm um comprimento de 3.60 metros. Nesta empresa com este tipo de desmonte, a durabilidade do aço está calculada através da contabilização dos consumos médios ao longo da realização dos desmontes. Um bit novo tem uma durabilidade média de 350 metros, enquanto, depois de afiados, poderá chegar a uma durabilidade média de 200 metros de furação. Esta forma de reutilizar os bits, recorrendo a uma forma especial de os afiar, pode ser realizada até duas vezes em cada bit, o que origina que cada um tenha uma duração estimada de cerca de 700 a 750 metros de furação.

Tabela 9 – Parâmetros do desmonte.

Parâmetros	Distância (m)
Altura da bancada	17.00
Cumprimento furo	17.50
Afastamento	3.00
Espaçamento	3.00
Inclinação	4°

Após a realização de todos os furos, o carregamento com explosivos é realizado com o auxílio de técnicos especializados da empresa *ORICA Mining Service*. Para manter todos os parâmetros do desmorte dentro da legalidade, incluindo o que diz respeito ao carregamento de explosivos, a lei nacional de rastreabilidade de explosivos obriga a certos requisitos onde para manter estes aspetos dentro dos parâmetros legais, a empresa requisita ao fornecedor de cargas explosivas a quantidade de explosivo necessário para o desmorte e, no dia indicado, este é transportado até às instalações da pedreira e neste caso carregados os furos pelos técnicos presentes da empresa fornecedora de explosivos, a *ORICA Mining Service*.



Figura 53 – Explosivos utilizados no desmorte.

Nos desmontes realizados nesta fase de exploração da pedreira, os explosivos utilizados e comprados à ORICA, são três possuindo cada um deles diferentes potências de detonação. O mais comum e mais utilizado é o explosivo ORICA PULSAR 65*500, que é o explosivo utilizado para a carga de fundo e parte da carga de coluna dos furos. O explosivo PULSAR 60*500 é posteriormente colocado sobre o anterior, na restante carga de coluna, uma vez que fica mais próximo da superfície, e o poder fragmentação necessário é um pouco inferior a zona de fundo. O explosivo MAGNAFRAC 60*500 é um terceiro explosivo, com uma potência inferior aos dois PULSAR, em que é normalmente utilizado para colocar no topo dos furos da frente, ou em furos auxiliares para facilitar o desmorte ou realizar desmorte secundário.

4.2.6. Desmonte Abril 2017

Após um desmonte realizado no passado dia dez do mês de abril, foram tiradas algumas fotografias à pilha de material desmontado como forma de análise granulométrica de modo a tentar perceber e quantificar se existiu desvios na furação.



Figura 54 – Fotografia da pilha após desmonte da bancada superior.



Figura 55 – Fotografia da pilha desmontada.

Após uma análise às imagens 54 e 55, é possível observar os blocos criados após o desmonte com o recurso a explosivos. Estes blocos vistos em diferentes perspetivas possuem diferentes granulometrias, sendo que após uma análise mais pormenorizada a umas fotografias é possível a determinação da granulometria da rocha desmontada através do recurso ao *software* “WipFrag”. Este *software* através de um modelo de análise próprio determina a granulometria das partículas presentes na fotografia.

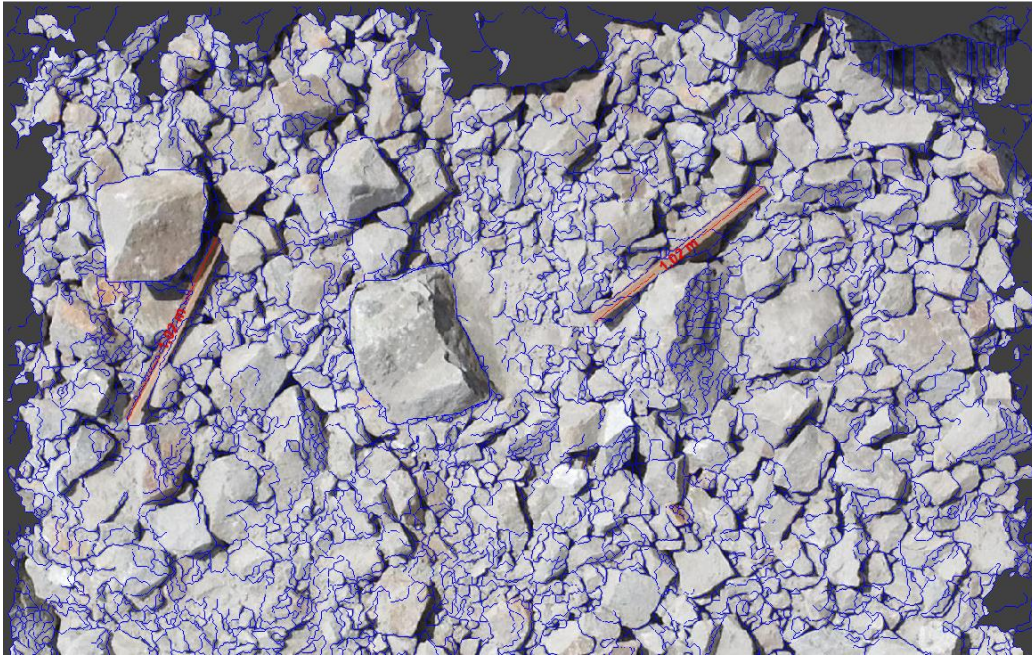


Figura 56 - Representação da análise foto-granulométrica do desmonte.

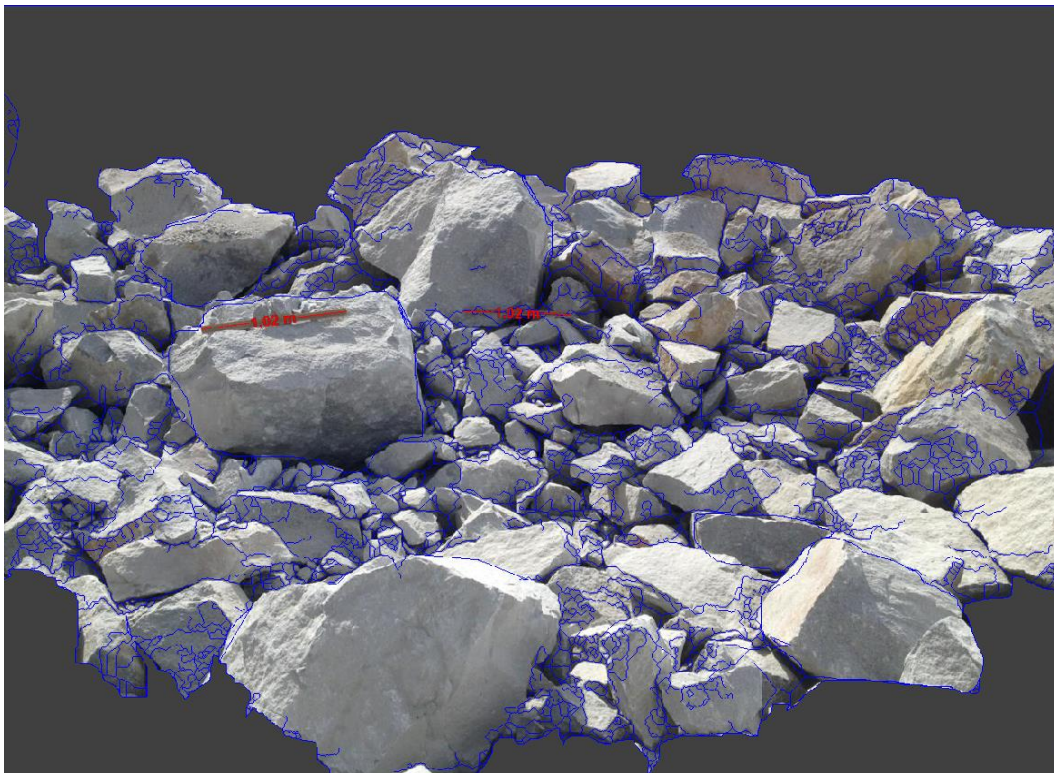


Figura 57 – Representação da análise foto-granulométrica do desmonte.

Nas figuras anteriores, através dos contornos desenhados com as linhas azuis, é possível identificar os blocos definidos pelo *software* que serão analisados e determinada a sua granulometria tendo em conta uma escala colocada na mesma fotografia. Essa escala foi implementada recorrendo a duas barras castanhas que foram colocadas sobre os blocos com uma medida precisa de 1,02 metros cada uma.

Após introdução e tratamento de imagem no *software* “*WipFrag*”, foram construídas as curvas granulométricas e determinados alguns parâmetros relativos ao desmonte.

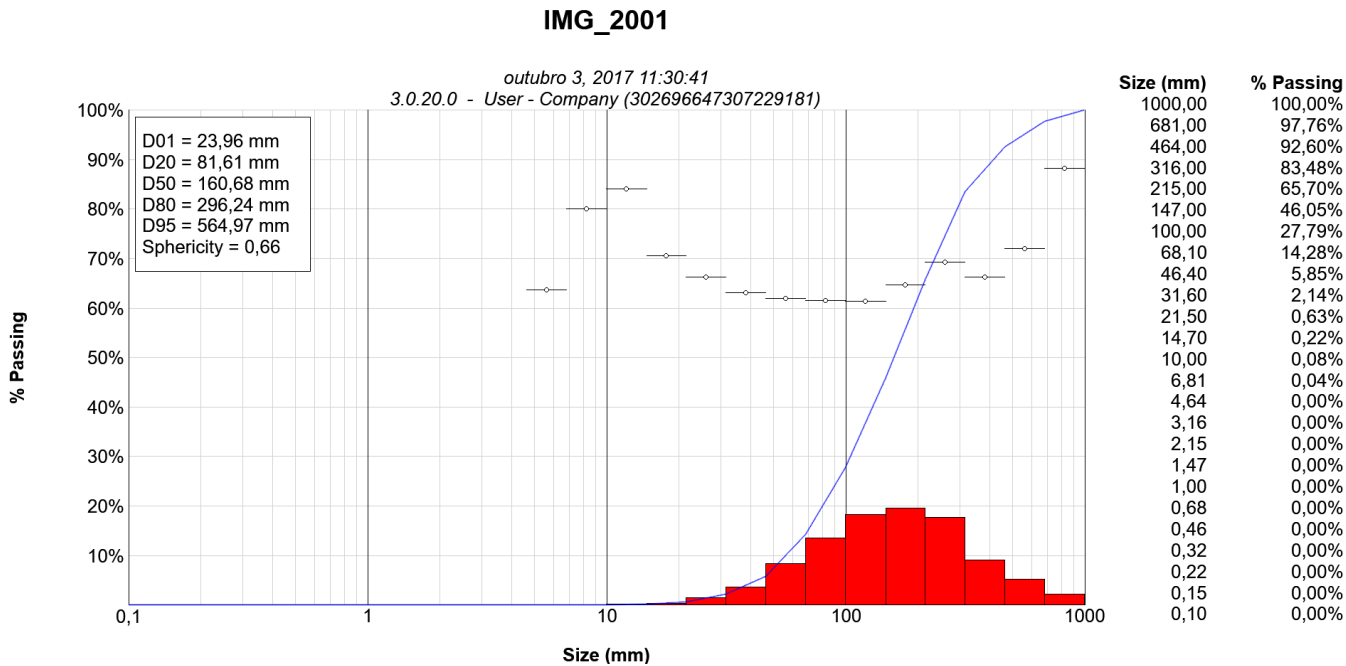


Figura 58 – Análise da curva granulométrica com distribuição das classes.

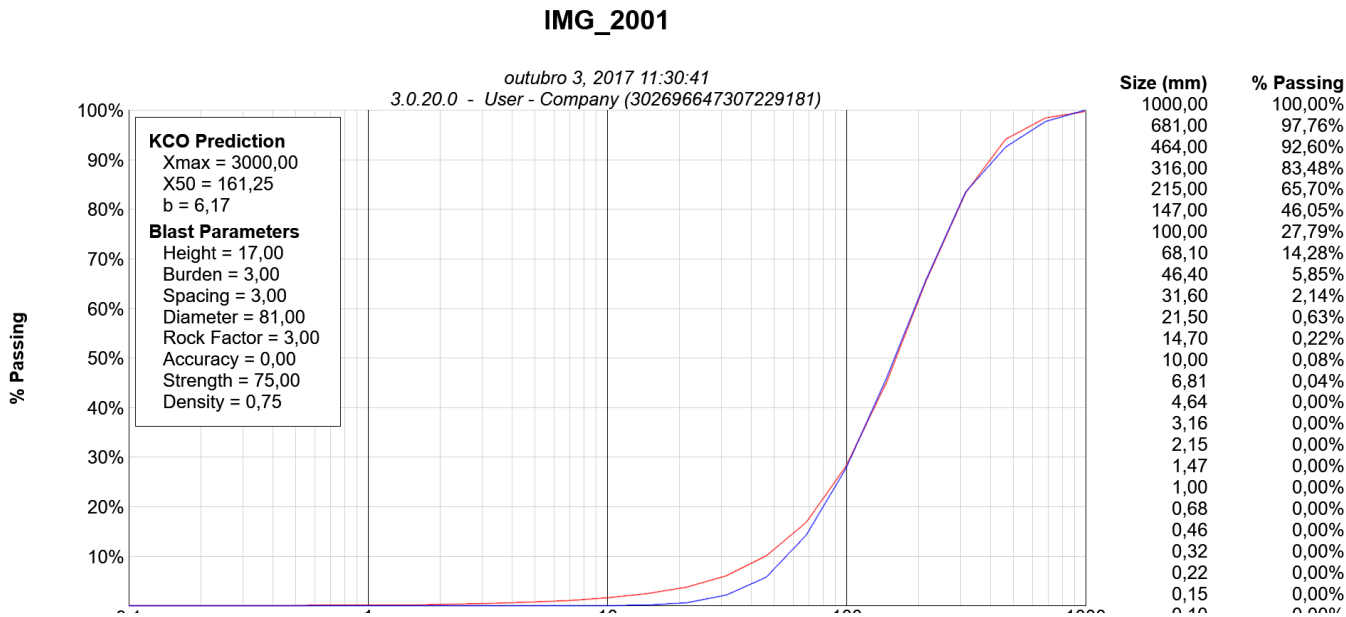


Figura 59 – Representação das curvas granulométricas real e teórica.

Na figura anterior é possível observar uma análise comparativa efetuada entre a curva granulométrica real, curva obtida após o desmonte, e a curva granulométrica teórica, a curva prevista pelo *software* como sendo as classes previstas tendo em conta um desmonte com as características introduzidas. Após a determinação das duas curvas o modelo teórico é ajustado ao real considerando que, com o ajuste do desvio padrão, podemos ajustar as curvas de modo a que as mesmas se encontrem o mais sobreponível possível.

mm
in

Bench Height (m) ?

?

17,00

Burden (m) ?

?

3,00

Spacing (m) ?

?

3,00

Diameter (mm) ?

?

81,00

Rock Factor ? ☒ Auto

?

3,00

Drill Accuracy (Std Dev) ?

?

0,00

Relative Weight Strength ?

?

75,00

Density (g/cc) ?

?

0,75

KCO Blast Model

Figura 60 - Parâmetros relativos ao desmonte.

76

Esta análise foi realizada para várias fotografias tendo em conta que no final será considerado um valor médio estatístico uma vez que dependendo da posição do operador da máquina fotográfica poderão ser analisados superfícies da pilha com diferentes características e blocos de diferentes dimensões. Surgiu então a necessidade de análise de um valor médio para o desmonte de modo a que as conclusões retiradas sejam as mais reais possíveis.

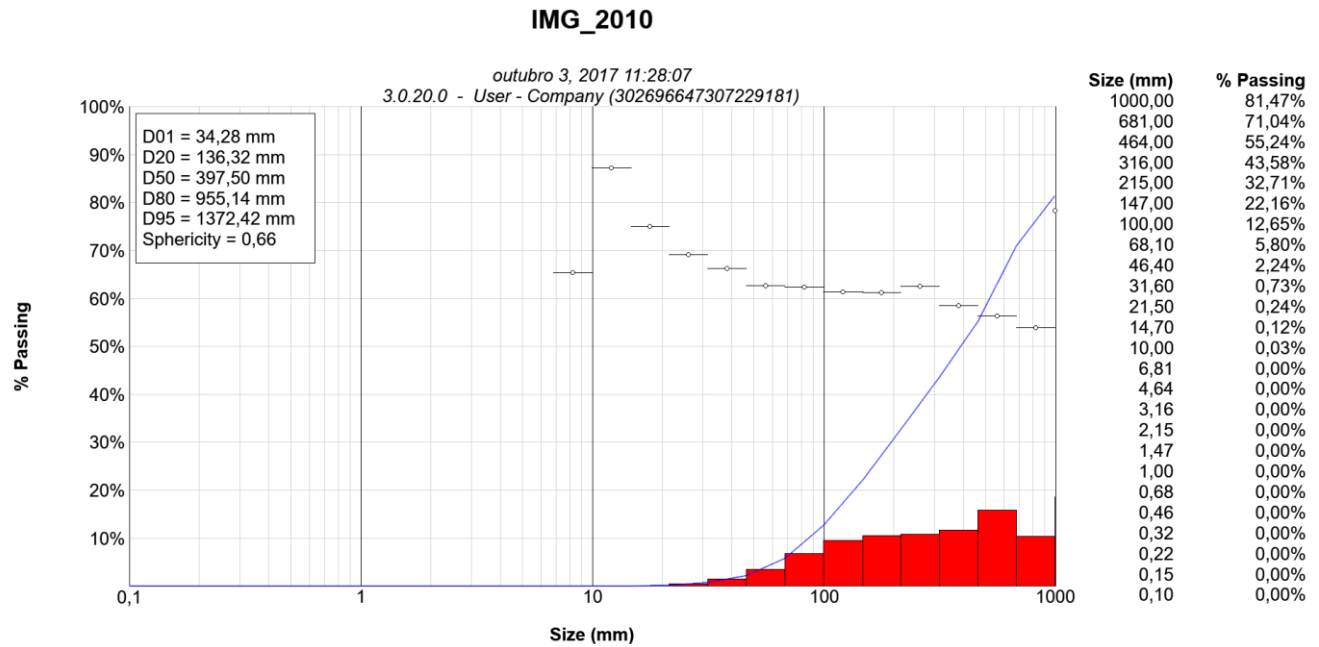


Figura 62 - Análise da curva granulométrica com distribuição das classes.



Figura 61 - Representação das curvas granulométricas real e teórica.

mm

in

Bench Height (m) ?

17,00

Burden (m) ?

3,00

Spacing (m) ?

3,00

Diameter (mm) ?

81,00

Rock Factor ? ☒ Auto

8,00

Drill Accuracy (Std Dev) ?

1,10

Relative Weight Strength ?

75,00

Density (g/cc) ?

0,75

KCO Blast Model

Figura 63 - Parâmetros relativos ao desmonte.

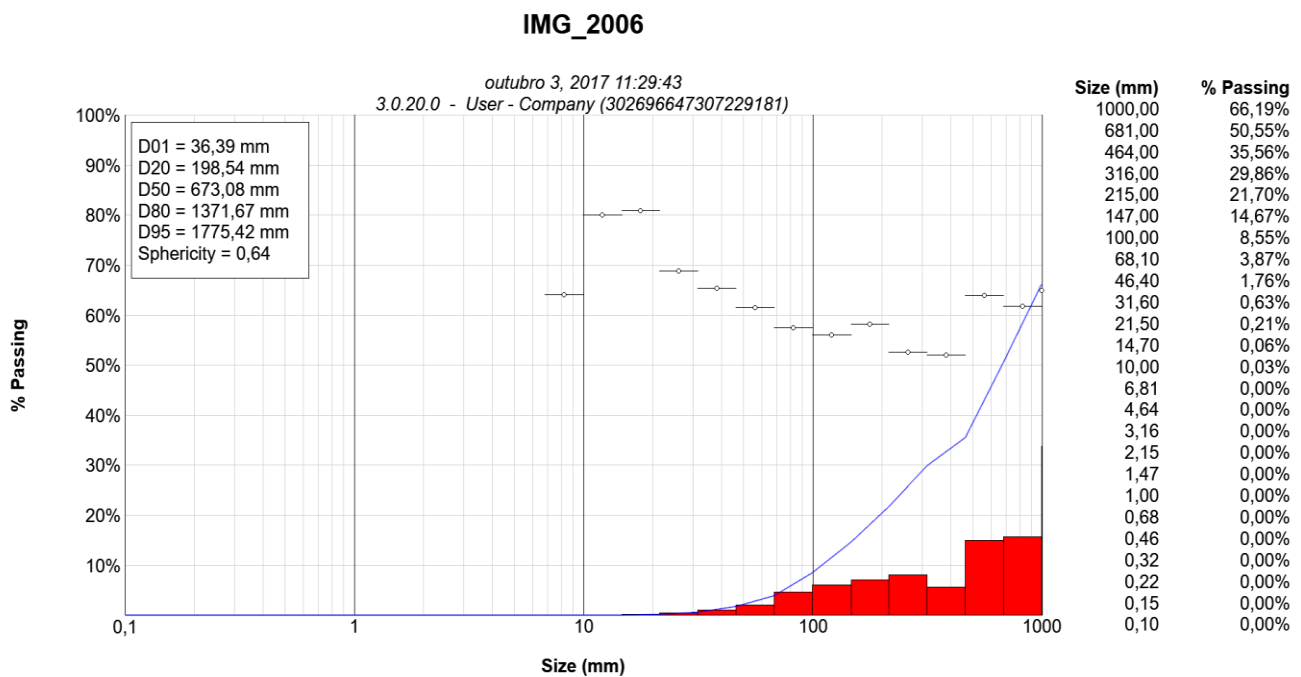


Figura 64 - Análise da curva granulométrica com distribuição das classes.

IMG_2006

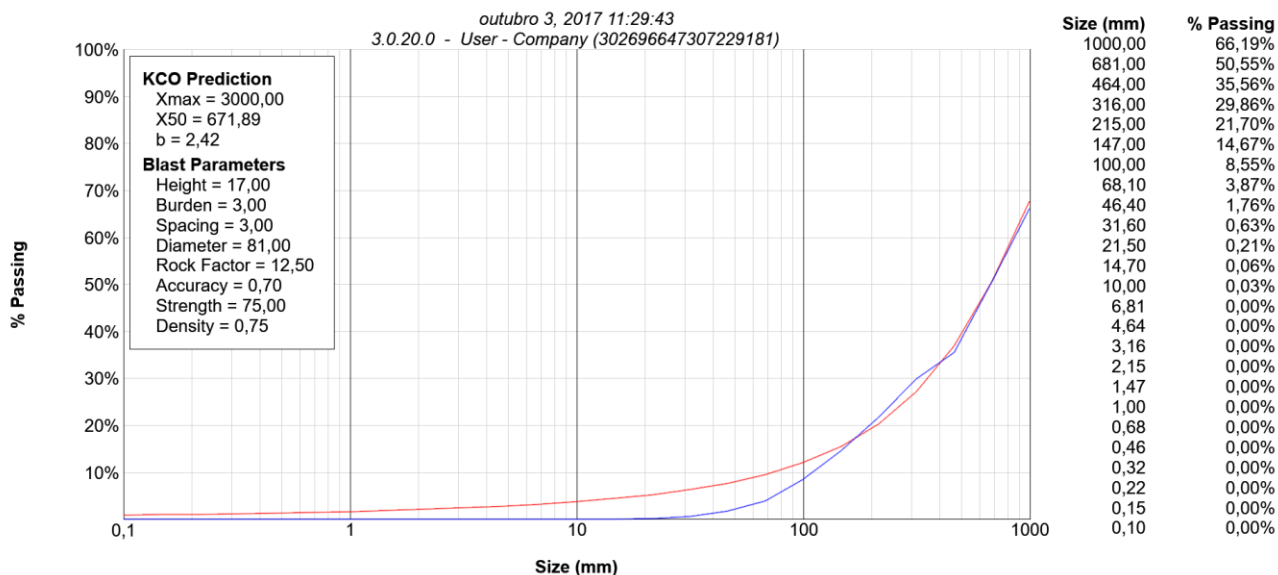


Figura 65 - Representação das curvas granulométricas real e teórica.

☒ mm ☐ in

Bench Height (m) ?

Burden (m) ?

Spacing (m) ?

Diameter (mm) ?

Rock Factor ? ☒ Auto

Drill Accuracy (Std Dev) ?

Relative Weight Strength ?

Density (g/cc) ?

KCO Blast Model

Figura 66 - Parâmetros relativos ao desmonte.

As figuras seguintes, Figuras 67 e 68, são a determinação dos valores e das curvas granulométricas médias, isto é, as curvas do desmonte geral após a análise em comum de diversas fotografias independentes de diversas partes do desmonte.

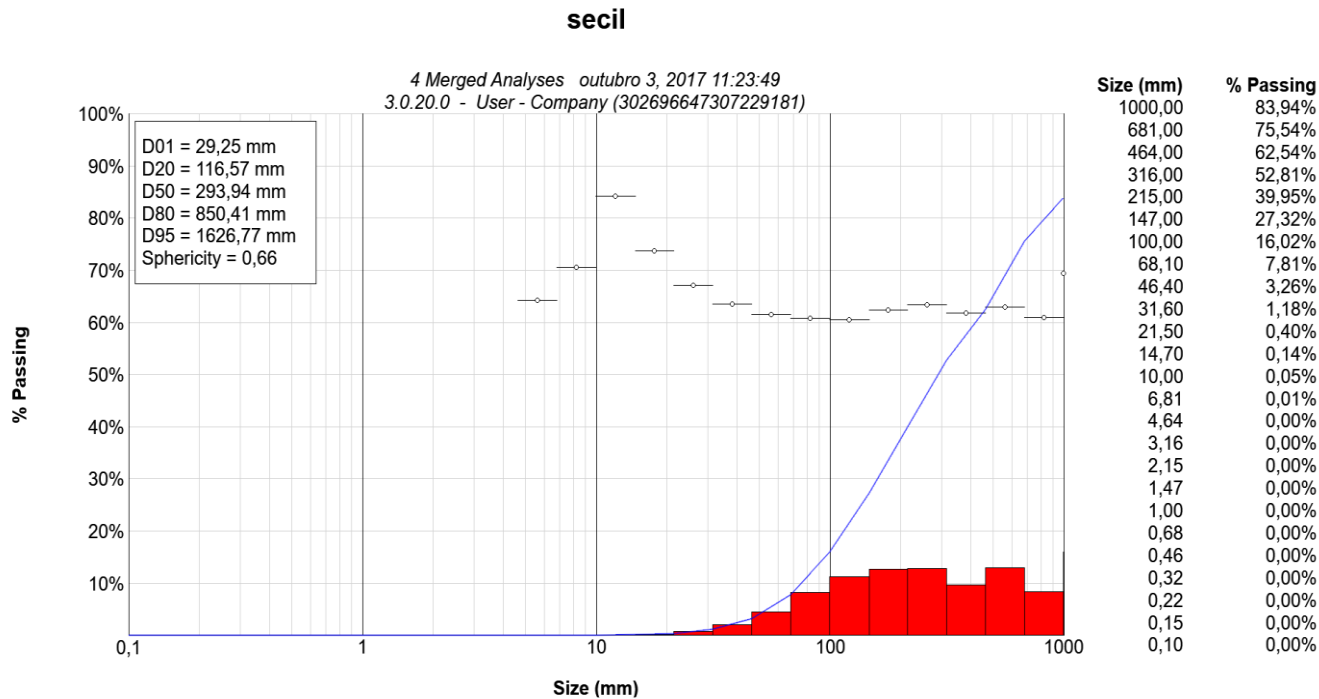


Figura 67 - Análise média da curva granulométrica com distribuição das classes.

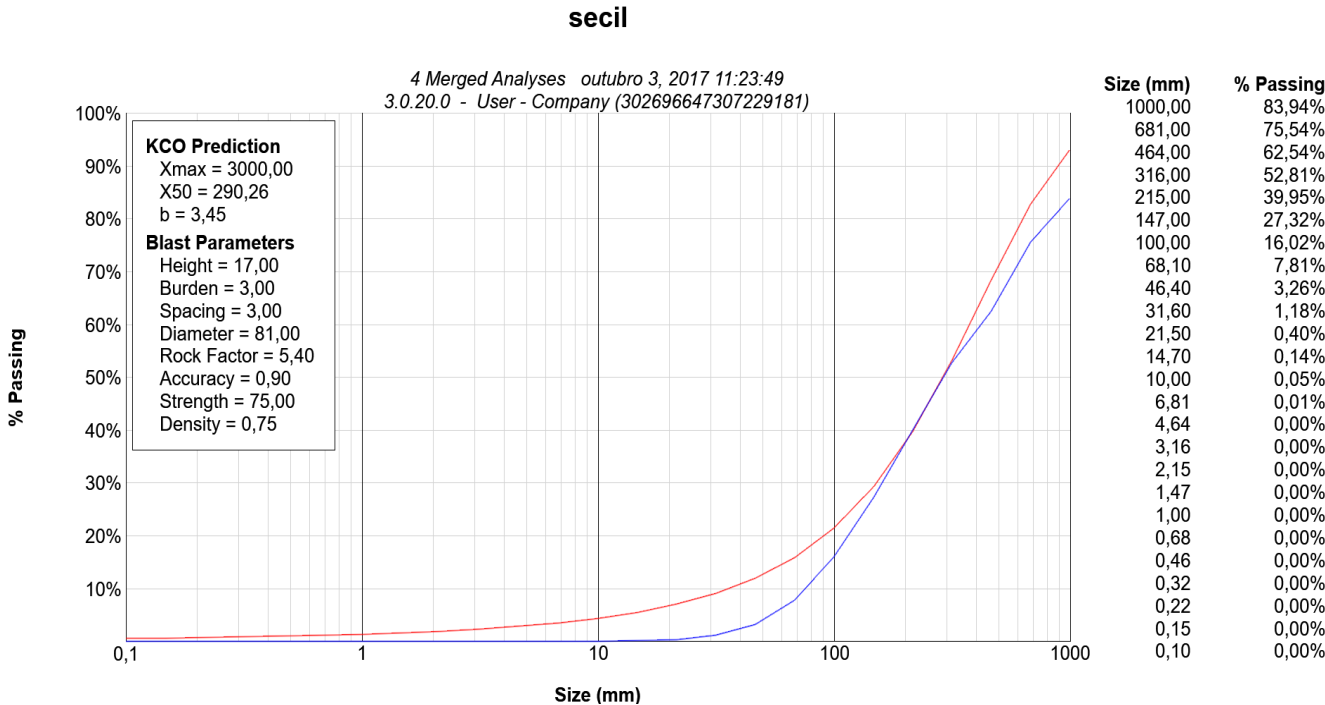


Figura 68 – Representação das curvas granulométricas da média real e teórica.

mm in

Bench Height (m) ? 17,00

Burden (m) ? 3,00

Spacing (m) ? 3,00

Diameter (mm) ? 81,00

Rock Factor ? ☒ Auto 5,40

Drill Accuracy (Std Dev) ? 0,90

Relative Weight Strength ? 75,00

Density (g/cc) ? 0,75

KCO Blast Model

Figura 69 - Parâmetros relativos ao desmonte.

Com uma análise aos valores médios da granulometria, foi calibrado o valor da curva teórica (a vermelho no gráfico) de modo a ser o mais sobreponível com a curva real (Azul) possível. Esta análise realizada como um conjunto dos valores de diversas fotografias, é obtida com recurso a uma propriedade do próprio *software* que permite uma análise conjunta com a determinação de valores mais ajustados à realidade. É nestes gráficos que serão analisadas as curvas e que serão retiradas todas as conclusões de modo a obter resposta a todos os objetivos propostos.

Esta calibração verificou-se após o ajuste das curvas, sendo possível verificar um Fator Rocha determinado automaticamente pelo *software* com o valor de 5.40 e um Desvio *Standard* de 0.9. Este valor é interpretado como um desvio médio no final do desmonte. Com um valor de desvio padrão da precisão de perfuração de 0.9 metros, chegamos à conclusão que em média, no fundo de cada furo deste desmonte, foi obtido um valor de desvio do furo de 0.9 metros entre o local previsto para a sua realização e o local onde realmente foi realizado o furo.

É possível também observar alguns aspetos como a diferença na zona inicial da curva e na zona final. Na figura 68 foi obtida uma curva granulométrica real que apenas começa a considerar partículas a partir da classe dos 31.60 milímetros, e que na classe analisada com calibre inferior a 31.60 milímetros, apenas está presente 1.18% do material. Este valor é possível justificar pela dificuldade de análise granulométrica as partículas finas. Uma fotografia apenas contempla as partículas presentes na superfície da pilha de desmonte e, após a realização deste e fruto da dinâmica da trajetória mais ou menos

balística de cada partícula ao ser destacada do maciço rochoso, as partículas finas têm tendência a ficar aglomeradas no meio dos blocos grandes, ou em espaços livres que se tornam impercetíveis na fotografia.

No que respeita a parte final da curva real, o setor que representa os calibres maiores, verifica-se que apenas 83.94% das partículas se encontra num calibre inferior a 1000 milímetros. Este é um valor um pouco baixo quando comparado com os valores obtidos na curva teórica (Vermelha). Segundo a previsão SWEBRECK cerca de 94.00 % das partículas teria um valor igual ou inferior a 1000 milímetros. Este valor não se verifica pois com a existência de erros no desmonte, principalmente alguns desvios na furação sem ter em conta posteriormente a mudança da quantidade de explosivo utilizado, origina a espaços maiores para fragmentação e posteriormente, como resultado, uma pilha de material onde existe um maior número de blocos de grandes dimensões indesejados em qualquer exploração mineira. Este facto é possível de ser observado na figura 57, onde estão presentes dois blocos com uma dimensão um pouco superior ao objeto colocado para comparação de escala com uma dimensão de 1.02 metros.

Na figura seguinte Figura 70 é possível observar que ao longo dos desmontes realizados anteriormente é comum a produção deste tipo de blocos. Estes blocos são usados para colocação nas bermas com a finalidade de servir como uma proteção, barreira, de modo a qua a sua aproximação as frentes de desmonte seja limitada aumentando a segurança de quem circula e trabalha no local identificado. É de supor que esta prática seja justificada pelos elevados custo da operação de taqueio que eles obrigariam a realizar.



Figura 70 – Colocação de blocos de grande dimensão.

4.2.7. Resultados obtidos e propostas de melhoria.

Recorrendo aos resultados obtidos através na observação das curvas granulométricas resultantes da análise dos dados relativos ao desmonte de rocha no *software*, é possível verificar que existem algumas diferenças entre as granulometrias de material desmontado previsto pelo modelo teórico, e a curva correspondente aos resultados reais obtidos após o desmonte.

Esta diferença resulta essencialmente na elevada produção de blocos de grandes dimensões. Estes blocos acabam por resultar em atrasos para o ciclo de trabalho da pedreira pois é necessário a realização de taqueio. Esta atividade envolve trabalhos secundários como a chegada à frente de uma máquina com martelo pneumático para o desmonte, máquina responsável pela realização de outras atividades dentro da mesma pedreira. Sem se ignorar que este facto obrigará a parar todo um ciclo de trabalhos para a devida deslocação do equipamento até ao local do desmonte e realizar o taqueio dos blocos de grandes dimensões, uma vez que a sua granulometria não permite um eficaz carregamento e posterior transporte, bem como o britador primário não suporta blocos com dimensões tão elevadas.

Estes resultados observados foram um caso de estudo e de determinação de algumas eventuais melhorias para realizar tendo em conta algumas limitações da empresa de modo a corrigir estes erros e melhorar os resultados obtidos.

Verifica-se que existem erros na fragmentação, e considerando que alguns parâmetros importantes no desmonte de rocha são considerados corretos, como o carregamento de explosivos, a carga utilizada, as características geológicas do maciço são constantes ao longo da bancada, esses erros poderão estar associados a desvios na perfuração.

Estes desvios podem ser acautelados ou mesmo evitados. Como forma inicial de diminuir os desvios no processo de furação é um controlo e uma vigilância dos operadores. Os operadores na maioria das empresas são funcionários com muita experiencia, com alguns anos de trabalho na empresa e que podem começar a criar vícios e menos atenção às operações (por maior confiança em si mesmos) que muitas vezes podem comprometer o bom funcionamento do plano de trabalho da pedreira. Surge então como primeira melhoria a acrescentar na pedreira analisada, a introdução de uma pessoa qualificada, capaz de controlar inicialmente os aspetos relacionados com todo o processo e a atividade da perfuradora, tendo em vista diminuir tempos mortos, diminuir o ciclo de perfuração de cada furo e aumentar o grau de rigor associado a perfuração, mas também a instrução, a formação de todos os operadores quanto a métodos novos de operacionalização das operações elementares de todo o ciclo e essencialmente com as questões ligas a segurança no trabalho.

Uma segunda hipótese verificada durante a análise geral por nós realizada durante a estadia na pedreira é a relativa às características gerais do Plano de Lavra em vigor. A pedreira apresenta um Plano de Lavra aprovado e com características próprias como é o caso de as bancadas de desmonte possuírem cerca de dezassete metros de altura. Este valor é demasiado elevado e, com a realização de furos de baixo diâmetro, a probabilidade

de ocorrerem desvios na furação é elevada. Segundo SUSHIL BHANDARI, no livro publicado pelo próprio intitulado “*ENGINEERING ROCK BLASTING OPERATIONS*”, na página 206, o diâmetro dos furos deve variar entre um valor mínimo que resulta da divisão da altura da bancada por 120, e no máximo um valor que resulta da divisão da altura da bancada por 60.

Tabela 10 – Diâmetro teórico dos furos

Diâmetro mínimo	Diâmetro máximo
17,00 (m) / 120 = 142 (mm)	17,00 (m) / 60 = 283 (mm)

Na tabela 10 verificamos que para uma altura de dezassete metros de uma bancada o valor mínimo do diâmetro dos furos para os desvios serem facilmente evitados seria de cento e quarenta e dois milímetros, valor muito elevado comparado com o diâmetro utilizado atualmente na pedreira de setenta e seis milímetros.

O aumento do diâmetro dos furos é uma solução para diminuir os desvios, mas por sua vez implica um maior consumo de energia para realizar a perfuração, aquisição de novas perfuradoras respetivas colunas de aço de perfuração e posteriormente um maior consumo de explosivo para preencher os espaços existentes no furo o que implica um aumento de custos para o desmonte de rocha, o que pode ser pouco benéfico para a boa gestão económica e comercial da pedreira.

Uma solução mais viável de ser implementada é a redução da altura de bancada, o que diminui substancialmente o diâmetro do furo a realizar. Para um furo com setenta e seis milímetros de diâmetro a altura máxima de bancada seria de um valor de nove metros e doze centímetros, o que significa aproximadamente metade da altura utilizada atualmente. Esta medida pode ser adotada caso seja realizado um estudo pormenorizado, uma vez que é necessário verificar se, com esta nova configuração geométrica dos desmontes, os volumes desmontados (seguramente menores que os anteriores) e os custos associados para manter o funcionamento da instalação de fragmentação e classificação se conseguirá garantir a produção desejada e necessária para manutenção, e eventual crescimento, do mercado de procura dos produtos finais que a empresa produz.

Antes da realização do desmonte que acompanhamos em abril de 2017, foi analisada a bancada onde seria colocada a pilha de material após o desmonte e foi encontrada a existência de inúmeros fenómenos de “repés” no respetivo piso do patamar em causa. Esta é uma situação que ocorre através da existência de erros na realização do desmonte anterior naquele local. Uma das justificações para o facto apresentado é a existência de erros no processo de furação. Existência de desvios, erros de subfuração ou sobrefuração e algumas vezes de carregamento de explosivos, podem originar um mau resultado da realização do desmonte na bancada com uma posterior criação destas estruturas

indesejáveis pelos seus efeitos negativos a diversos níveis no processo cíclico das diferentes atividades produtivas (Figura 71).

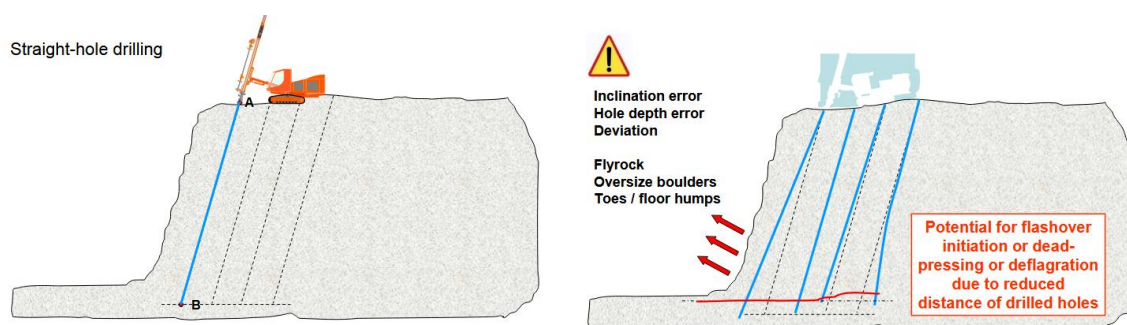


Figura 71 - Efeitos no processo de furação da existência de “repés” no piso de uma bancada. [24]

Esta é uma situação que acarreta uma série de tarefas secundárias não previstas no normal ciclo de desmonte de uma pedreira. A formação destas irregularidades no chão é responsável por grande parte dos danos provocados nos equipamentos. As máquinas carregadoras e os camiões de transporte, com especial atenção para os equipamentos que possuem pneus, estão sempre expostos a presença destas irregularidades no piso provocando por vezes danos significativos e, geralmente de custo avultados, quando estes se movimentam.

Para a eliminação destas irregularidades é comum recorrer-se a métodos de desmonte secundário. Este desmonte requiere trabalho por vezes demorado, que passa por deslocar a perfuradora até ao local das irregularidades e realizar pequenos furos de modo a serem carregados posteriormente e realizado um desmonte secundário. Esta atividade acaba por ser responsável por um dispêndio financeiro e temporal excecional que pode ser prevenido.

Durante o planeamento e realização do desmonte secundário é necessária uma especial atenção pois a perigosidade de desmonte secundário é extremamente elevada. Ocorre muitas vezes episódios de falta de distribuição de energia na fragmentação o que provoca muitas vezes projeções inadequadas e com um risco de insegurança elevado para pessoas, para os equipamentos e para as infraestruturas.

Uma outra forma de diminuir os erros associados ao processo de perfuração será o uso do novo equipamento Robit.

O Robit é uma nova tecnologia testada e em lançamento recentemente no mercado Internacional. É uma tecnologia de perfuração desenvolvida que permite um controlo rigoroso durante o processo de furação. O método de furação é idêntico ao convencional, com o recurso a uma perfuradora com movimentos de roto-precursão responsáveis pela realização do furo. A principal vantagem quando se recorre a utilização do Robit é que

este equipamento possui acoplado a si pequenos inclinômetros responsáveis pela monitorização constante do processo de furação. Esta tecnologia permite uma constante monitorização do processo de modo que caso sejam detetados desvios muito significativos durante o processo, quer por condições geológicas incoerentes ou por má utilização do operador, o processo pode ser parado e corrigidas algumas irregularidades antes de retomar a furação.



Figura 72 – Interior de uma perfuradora com sistema Robit instalado.

Na figura anterior, figura 72, é possível verificar o interior da cabine de uma perfuradora com o sistema Robit instalado. Esta perfuradora possui um pequeno dispositivo que permite acompanhar a posição do furo real em comparação com o furo planeado de modo a poder acompanhar constantemente a sua posição e corrigir eventuais desvios que possam ser significativos para o bom desempenho da perfuração.

5. Alguns problemas inerentes ao processo de determinação de curvas granulométricas por análise de imagem. Eventuais trabalhos para futuro.

Ao longo da realização desta dissertação, fomos sendo confrontados com alguns problemas inerentes ao processo de construção de curvas granulométricas a partir do tratamento digital de fotografias, obtidas sobre pilhas de material desmontado em unidades industriais recorrendo ao uso de explosivos.

Um dos principais problemas diz respeito à dificuldade de validação dessas curvas granulométricas, uma vez que as classes granulométricas em causa são de dimensões, de alguma forma, impraticáveis para serem obtidas através de processos de crivagem em baterias de crivos, metodologia vulgarmente usada em laboratório para materiais de classes granulométricas bem menores. Os crivos de maior dimensão que é possível encontrar nas unidades industriais são os denominados de *Scalping* e destinam-se unicamente evitarem a entrada em britadores primários de blocos com dimensões superiores à da entrada desses mesmos britadores primários. A dimensão da boca de entrada desses britadores será a dimensão da malha de crivagem dos crivos de *Scalping*. Ainda neste capítulo, proporemos um pequeno contributo para uma eventual busca de soluções para este problema.

5.1. Comparação de resultados resultantes de diversos softwares de análise de imagem

Para além do problema da dificuldade de proceder a uma classificação por lotes do material resultante de uma pega de fogo, surge um outro, não testado nesta dissertação, mas que se deixa em aberto para eventuais trabalhos futuros, que diz respeito à comparação de resultados da análise de imagem quando esta é realizada recorrendo a diversos *softwares* existentes no mercado para a construção de curvas granulométricas de material desmontado. Uma tentativa de comparação desses resultados permitiria uma validação mútua que, apesar de se manter o problema primário da comparação com os resultados reais oriundos uma hipotética crivagem recorrendo a crivos reais, não deixaria de ser interessante uma vez que a comparação de curvas granulométricas obtidas nos

diferentes *softwares*, no caso de serem semelhantes e resultantes de metodologias de processamento de imagem diferentes, poderia indicar alguma coerência dos mesmos e eventual boa correlação com o real.

5.1.1. A questão da representatividade

Quando se pretende obter uma curva granulométrica a partir da análise de imagem de uma única fotografia tirada sobre uma pilha de material, prática comum nas unidades industriais que recorrem a esta metodologia, é legítimo questionar sobre a representatividade dessa única imagem relativamente ao todo do material desmontado e que faz parte dessa mesma pilha. Naturalmente que, quanto maior for os espaços por onde está dispersa a pilha, será legítimo que se pondere a realização de mais do que uma fotografia nessa área de dispersão para que aumente a possibilidade de representatividade dos calibres dos materiais contidos. Necessariamente o processo de construção da curva granulométrica passará pela análise comparativa das várias curvas obtidas e construção de uma final estatisticamente válida.

Já quanto à dispersão do material que se encontra abaixo da superfície da pilha, será difícil obter informação visual, passível de ser registada em fotografia, pois todo esse material se encontra oculto. Adiante, quando nos referirmos a protocolos de amostragem, adiantaremos uma proposta de eventual resolução deste problema.

5.1.2. A questão forma das partículas

Talvez o principal problema da análise de imagem esteja relacionado com o facto de numa fotografia de material desmontado, estarmos a obter informação real planar, apresentando-se cada partícula definida por limites da superfície visível planar correspondente ao plano observado do conjunto da pilha de material, ignorando-se por completo a terceira dimensão de cada partícula.

Se num processo de crivagem o tamanho médio de partículas de cada classe pode ser assumido em virtude de ser dado tempo para eventual a passagem da partícula através do crivo em que se encontra para o de dimensão inferior, o que equivale a não considerar o efeito de forma destas, o mesmo já não pode ser dito quando estamos perante uma análise granulométrica sobre uma fotografia, necessariamente, de representação a duas dimensões.

Ilustrando este problema levado ao limite, podemos considerar uma partícula prismática que, dependendo da posição em que se encontra na pilha de material desmontado, exibirá para a fotografia obtida, uma área muito significativamente diferente (Figura 73). As características dimensionais dessa área serão as que vão ser consideradas para efeitos da

determinação da dimensão média da partícula e consequente incorporação da mesma numa classe granulometria.



Figura 73 - Efeito da posição da partícula relativamente ao plano de observação e sua implicação na análise dimensional da mesma.

Este tipo de problema referido aponta de imediato para a importância da tentativa de validação, seja por que meio for, da maior ou menor aproximação das curvas granulométricas obtidas à composição granulometria real.

Numa postura de honestidade científica, afirmamos que não nos ocorre para já solução para este problema. No entanto, não deixamos de propor que, por exemplo, numa tentativa de validação dos resultados de curvas granulométricas obtidas com um determinado *software* dedicado a este propósito, se experimente validá-lo com a construção de curvas granulométricas obtidas por análise de imagem sobre fotografias tiradas em pilhas de material em ambiente laboratorial. Sendo este material de calibres compatíveis como uso de baterias de crivos também eles de escala laboratorial, tornaria possível a construção de curvas granulométricas reais que, juntamente com as obtidas como *software*, passariam por processo de comparação. Naturalmente que sabemos que surgirão sempre problemas associados a fenomenologias de escala, mas achamos que tal tentativa de comparação poderá ser um passo na análise deste problema.

5.2. Estabelecimento de protocolos amostrais

Reveste-se de importante interesse o estabelecimento de protocolos amostrais para a obtenção de informação estatisticamente relevante relativa à realidade de calibres presentes nas pilhas de material desmontado.

E somos de opinião que esses protocolos são igualmente importantes quer se trate de usar métodos que recorrem à análise sobre fotografias de pilhas de material quer recorra, eventualmente, a processos físicos de análise baseada em metodologias de separação.

Porque, em tempo útil, não houve possibilidade de implementação de algumas ideias neste âmbito entretanto surgidas, deixamo-las como propostas para eventuais trabalhos futuros.

5.2.1. Promoção de movimentos da pilha de material desmontado

Um procedimento que poderá revestir-se de interesse é, sempre que possível operacionaliza-lo, pelo menos até se aumentar o grau de confiança nos processos de construção de curvas granulométricas em curso, obter sucessivas fotografias sobre a pilha a analisar promovendo, entre a obtenção de cada fotografia, movimentos dessa pilha recorrendo ao auxílio de pás carregadoras (Fotografia 74).



Figura 74 – Movimento de material desmontado em pilha, homogeneizando o seu conteúdo e oferecendo superfícies sucessivas da pilha com probabilidade de melhor representatividade dos calibres dos materiais que a constituem. ^[21]

Tal procedimento resultaria na obtenção de diversos resultados finais de curvas granulométricas que seriam introduzidas num processo de comparação e eventualmente, em função dos desfasamentos obtidos, tratadas estatisticamente na tentativa de obtenção de curvas finais médias.

5.2.2. Separação de matérias da pilha por calibres *in situ*.

Um outro processo que nos parece viável ser praticado, embora envolva muito tempo, recursos humanos e de maquinaria, e elevado grau de trabalho no terreno e espaço em área para implementação, será o de promover, depois de obtidas fotografias sobre uma pilha de material, espalhar essa pilha numa das praças da pedreira e, recorrendo a pás carregadoras e/ou retroescavadoras, separar todo o material por diversos lotes de calibres diferentes. Esta separação deverá ser acompanhada ao pormenor, nomeadamente para o estabelecimento de critérios, o mais uniformes possíveis, para de tomada de decisão sobre a posição que cada bloco/fragmento deverá ocupar nos lotes de calibres definidos. Talvez seja um processo moroso, mas, ainda assim, considerado possível tendo em vista o processo de validação que se procura. Além do mais, este processo poderá colocar em evidência o problema ainda não abordado, da eventual segregação de calibres que possa estar estabelecido na pilha de material, fundamentalmente resultante do processo de detonação e subsequente trajetória balística de cada uma das partículas libertadas do maciço rochoso.

Esta temática é analisada com algum cuidado na dissertação de Mestrado de Christiane Ribeiro da Silva, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil, como Título “Determinação de Granulometria de ROM e Britagem por Análise de Imagem” – 2014 (Fotografia 75)



Figura 75 – Segregação dos blocos maiores. ^[22]

Nesta proposta de estabelecimento de protocolo de amostragem, é possível implementar *in situ*, nomeadamente para calibres de dimensão menor que sempre ocorrem nos processos de desmonte com explosivos, procedimentos de crivagem recorrendo a baterias de crivos apropriados a esses calibres (Fotografia 76).



Figura 76 – Sequência de formação das fileiras de material passante em 25 mm. [22]

6. Conclusões

Com a realização desta dissertação é possível associar a problemática dos erros associados ao desmonte de rocha (com recurso a explosivos) com o desenvolvimento da tecnologia e com a criação de *softwares* de apoio as atividades de desmonte. Os desvios associados a perfuração são uma problemática que afeta todo o processo de tratamento de rocha em especial a britagem primária. O controlo desta fase do ciclo de perfuração apenas é realizado tendo em conta o recurso ao sistema *boretrak*. Com a presente dissertação abriu-se um campo para a possível análise de dados, possível obtenção de erros através do estudo e da análise de Curvas Granulométricas de material desmontado na deteção indireta de anomalias de operações de perfuração.

Com o estudo dos dois casos reais, o desmonte da O-Pitblast, Lda foi analisado como forma de ensaiar o *software* utilizado e testar os parâmetros de ajuste com as respetivas curvas granulométricas, tendo sido comparados os resultados obtidos do desvio dos furos analisados no *WipFrag* com a informação *boretrak* existente e obtidos resultados muito favoráveis. Quando analisado o segundo caso prático, o desmonte na pedreira da Secil Britas S.A. em Penafiel, foram assinalados todos os parâmetros relativos ao desmonte. O trabalho de campo permitiu registar o atual estado da escavação, as frentes livres e os patamares da pedreira, bem como assinalar, analisar e perceber todas as fases do ciclo de atividades relativo ao desmonte de rocha numa bancada. Registada toda a informação necessária e analisadas as curvas granulométricas resultantes da análise de fotografia digital pelo *software WipFrag*, foi possível confirmar algumas diferenças entre as curvas granulométricas real e teórica, posteriormente calibradas. Estes erros são associados a desvios ocorridos na fase de perfuração tendo sido obtido um valor de desvio médio de noventa centímetros no final de um furo com dezassete metros de profundidade. Este valor é um pouco elevado, mas com uma ordem de grandeza possível uma vez que no final são obtidos alguns blocos de grandes dimensões, observados nas figuras, não esperados na fase de planeamento. Estes blocos indesejados na realização de qualquer desmonte uma vez que significa a execução de atividades secundárias, nomeadamente taqueio, que se traduz em despesas adicionais associadas a produção da rocha industrial tornando inviável a realização de qualquer projeto tendo sido enunciadas algumas melhorias de modo a aumentar a eficiência do projeto.

O recurso ao *software* utilizado para a construção dos modelos possui limitações como a análise da fórmula das partículas, a agregação do material durante o desmonte, a falta de representação dos finos, são uma limitação ao desenvolvimento do modelo, contudo mostrou-se uma ferramenta viável na determinação da granulometria dos desmontes analisados conseguindo uma deteção indireta de anomalias de operações de perfuração.

7. Referencias

- [1] - <https://mineexcellence.com/Blasting-software-case-study/readcasestudy.php?casestudy=improving-mine-productivity-by-better-analysis-of-blasting-data> (Consultado em Outubro 2017).
- [2] - <http://ap3e.pt/modulos/tinymce/uploaded/GALIZA2011-Artigo%20Ingeniun.pdf> (Consultado em Outubro 2017).
- [3] - http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/boa_pratica/indice.htm (Consultado em Setembro 2017).
- [4] - http://www.engex.com.br/docs/produtos/catalogo_web.pdf (Consultado em Setembro 2017).
- [5] - <http://www.kapeks.com.tr> (Consultado em Outubro 2017).
- [6] - www.orica.com (Consultado em Outubro 2017).
- [7] – BERNAOLA ALONSO, J.; CASTILLA GÓMEZ, J.; HERRERA HERBERT, J. (2013). Perforacion Y Voladura de Rocas en Minería. Universidade Politécnica de Madrid. MADRID
- [8] - www.atlascopco.com (Consultado em Outubro 2017).
- [9] - <http://www.austinservice.cz> (Consultado em Outubro 2017).
- [10] – Silva, A. (2014). Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis. FEUP. Porto
- [11] – Reis, P. (2016). Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmontes a Céu Aberto. FEUP. Porto
- [12] - <http://www.secil-britas.pt/>
- [13] - Bhandari, S. (1997). *Engineering rock blasting operations*. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- [14] - Holmberg, R *et al.* (2005). The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. *European Federation of Explosives Engineers*.
- [15] - Hustrulid, W. (1999). *Blasting principles for open pit mining*. Rotterdam: Balkema.
- [16] - López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). *Manual De Perforación Y Voladura De Rocas*. Madrid.

- [17] - Sánchez, O., Silverio, G., Pinedo, A. 2007. *Incremento de la rentabilidad de operaciones mineras a cielo abierto por eliminación de la sobreperforación*.
- [18] – Barros, A.; Caseiro, A.; Pereira, A.; Vieira, C. (2011). Como se desenrola o ciclo de perfuração de rochas para desmontes em bancadas? FEUP. Porto
- [19] – Guimarães, B. (2012). Erosão Costeira e Produção de Blocos para Obras de Proteção com Enrocamento. Feup. Porto
- [20] – Sanchidrián, J., Muñiz, E. 2000. Curso de Tecnología de Explosivos. Fundación Gomez Pardo. Madrid.
- [21] - https://www.cat.com/pt_BR/news/machine-press-releases/cat-performance-seriesbucketsincreaseproductivityfueleconomyando.html (Consultado em setembro 2017).
- [22] - Ribeiro da Silva, C. (2014). “Determinação de Granulometria de ROM e Britagem por Análise de Imagem”. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-446720140004000008&script=sci_abstract&tlng=pt
- [23] – Correia, C. (2011). Desmonte de Rocha com Explosivos: Importância da Optimização. ISEP. Porto
- [24] - <http://nff.no/wp-content/uploads/2016/03/02-Rock-drilling-methods-and-machinery.pdf> (Consultado em Outubro 2017).
- [25] - López Jimeno, C., López Jimeno, E., García Bermúdez, P. (2017). *Manual De Perforación, Explosivos Y Voladura*. Madrid.
- [26] - <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3118/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Otimiza%C3%A7%C3%A3oPerfura%C3%A7%C3%A3oSeguran%C3%A7a.pdf> (Consultado em Outubro 2017).
- [27] – Gomes, J. (2016). Metodologia para Análise de Vibrações Provocadas por Desmontes com Recurso a Explosivos. FEUP. Porto

8. Anexo I

Modelos digitais de terreno no apoio ao planeamento de desmontes em pedreiras.

Perfilómetros *Laser*, *Boretrak* e a Plataforma O-Pitblast.

São cada vez mais comuns os recursos disponíveis para a construção de modelos digitais de terreno tendo em vista o auxílio ao planeamento de desmontes de rocha em pedreiras. Este tipo de recursos, cada vez mais próximos de utilização *on-line* e em tempo quase real, apresentam-se como ferramentas extremamente úteis para as tomadas de decisão que têm sempre lugar entre as diversas operações elementares que os desmontes de maciços comportam.

Ter a possibilidade de “manipular” a bancada em ambiente digital, usufruindo de vistas 3D do volume de rocha a desmontar, e recorrendo ao uso de plataformas dedicadas ao dimensionamento de pegas de fogo, apresentam-se como metodologias passíveis de permitir uma maior flexibilidade no processo de dimensionamento e otimização dos imensos parâmetros presentes no desmonte.

A construção de modelos digitais de superfície é conseguida, por exemplo, através de processos de restituição fotogramétrica sobre mosaicos de fotografia obtidas com voos de VANT (*drone*) ou vulgar máquina fotográfica digital. Trata-se da construção de malhas de pontos triangulados, georreferenciados que, importadas para *softwares* especializados, permitem a visualização 3D das superfícies de terreno. Na Figura 77 apresenta-se um exemplo de modelo digital de terreno da pedreira da Madalena, situada em Canidelo- Vila ova de Gaia e propriedade da empresa SOLUSEL, S.A. onde o Departamento de Engenharia de Minas da FEUP instalou um Campo Experimental em Lavra de Minas (CELaMi) em 2017. Esta representação é implementada na Plataforma O-Pitblast, criada pela empresa O-Pitblast, Lda, que nos apoiou na realização de parte desta Dissertação.

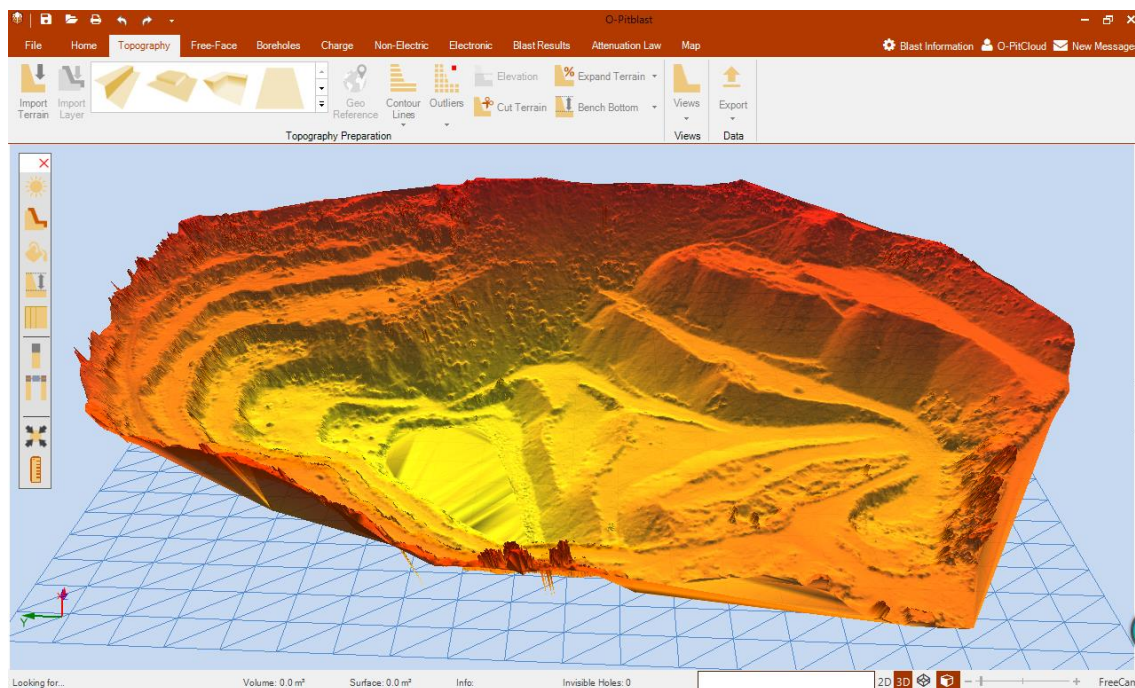


Figura 77 - Modelo digital de terreno da pedreira da Madalena, situada em Canidelo-Vila Nova de Gaia.

Mas também é possível construir modelos digitais de terreno através de levantamentos por varrimento laser de todos os objetos e formas da morfologia do terreno presente na superfície da zona de desmorte. Esta é uma prática vulgar e muito semelhante, embora mais simples de implementação, às atividades de levantamento topográfico.

Um exemplo desta metodologia, capaz de obtenção de dados para a construção de modelos digitais de frentes livres em bancadas de pedreiras, é a que recorre a perfilómetros laser como os disponibilizados, por exemplo, pela marca Renishaw. Na Figura 78 é possível ver a utilização de um perfilómetro laser desta marca em Aula CELaMi.



Figura 78 – Equipamento leitura *laser*.

O procedimento de levantamento laser costuma incidir sobre uma frente livre, posicionando-se o perfilômetro no piso inferior da bancada a desmontar. A programação do levantamento envolve a introdução de várias informações, como por exemplo, para além de referências ao local, bancada e data, os pontos de vértice limites da área da frente livre (Figura 79 – pontos 1, 2, 3, 4), o passo de amostragem de informação em varrimentos horizontais e verticais (em cm), o tipo/formato de ficheiro que se pretende obter, bem como as posições do primeiro e último furo a implementar na primeira fiada de furos da pega de fogo em projeto (Figura 78 Marco A e Marco B). O rigor do passo de amostragem deste tipo de aparelho pode chegar aos 5 cm.

É recomendado ainda que se registem dados de visadas manuais sobre vários pontos da crista e da base do talude da face livre.

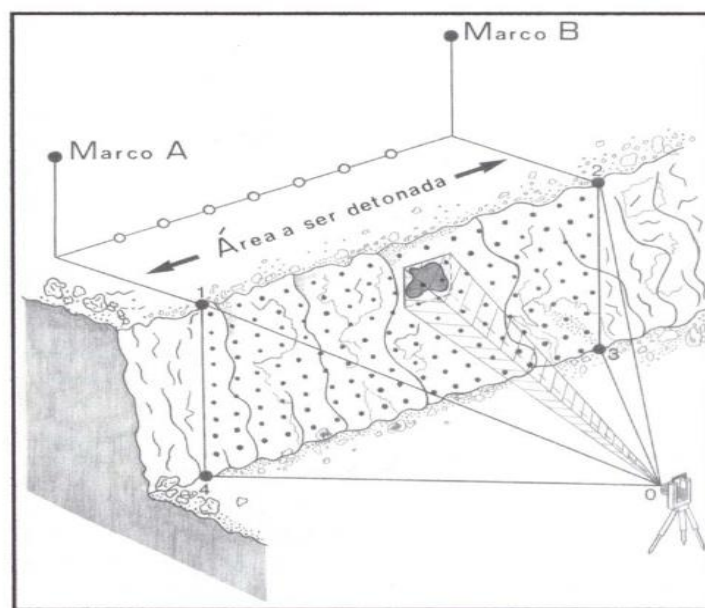


Figura 79 - Esquema de operação de levantamento com perfilômetro laser sobre frente livre de bancada de pedra. [26]

Introduzidas as informações necessárias, o aparelho de leitura laser inicia o levantamento através da realização de visadas de forma automática recorrendo a um motor de varredura, realizando sucessivas leituras com a frequência predeterminada que, no final, constituição uma grelha de valores de coordenadas (X, Y e Z) de cada ponto observado. Dependendo do rigor requerido para o levantamento, a operação de leitura completas sobre uma frente livre vulgar, demorará minutos sem qualquer intervenção do operador, minimizando erros de posicionamento e de leitura.

Os valores lidos são resultado da análise do distanciômetro a laser e de um codificador de ângulos horizontais e verticais obtidos em cada uma das visadas realizadas sobre a superfície da face livre em estudo.

Esta grelha será posteriormente exportada em formato de ficheiro numérico, pronto para ser lido por utilitários de desenho e cálculo tendo em vista a construção do modelo digital da respetiva frente livre levantada. Será sobre modelos digitais deste tipo que se poderá, mediante o uso de utilitários dedicados, efetuar o planeamento de pegadas de fogo.

O título meramente de exemplo, reproduzem-se vários outputs da plataforma O-Pitblast, num processo de planeamento de pegadas de fogo em bancada a céu-aberto.

Na Figura 80, apresentamos o ambiente de trabalho da plataforma O-Pitblast onde se pode observar o tipo de ficheiro de dados importado com valores, entre outros, das coordenadas X, Y e Z de pontos da grelha visada.

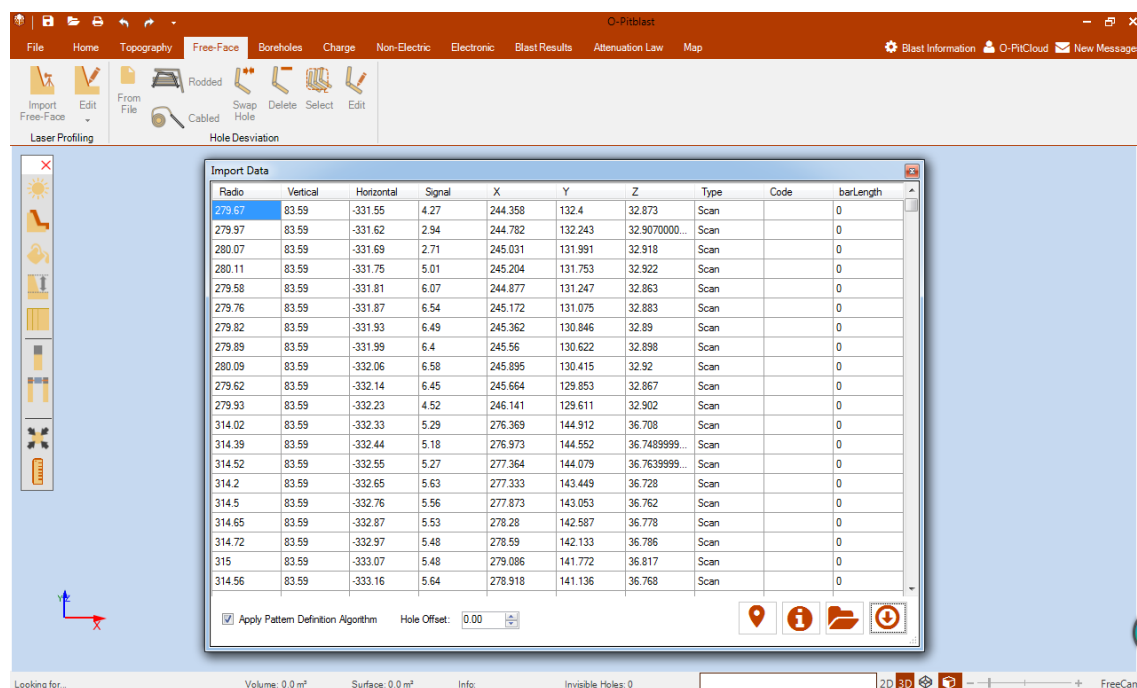


Figura 80 - Ficheiro de dados importados com valores de coordenadas X, Y e Z relativos a levantamento sobre terreno de pedra (Plataforma O-Pitblast).

Estes dados permitem a construção do modelo digital de terreno com diversos parâmetros de visualização do espaço objeto de levantamento (ver Figura 81).

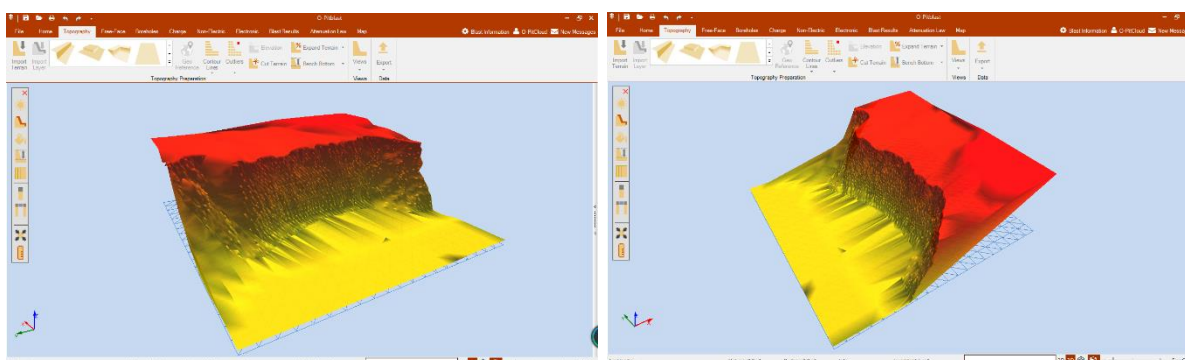


Figura 81 - Modelo digital de terreno de uma frente livre em bancada de pedra a céu-aberto.

Sobre este tipo de modelos de terrenos, é possível projetar pegas fogo com as geometrias desejadas, que garanta a obtenção de volumes de rocha desmontada tendo em vista os objetivos de produção esperada, e construídas respeitando as mais diversas formulações teóricas estabelecidas.

A título de exemplo, na Figura 82 apresenta-se uma pega de fogo devidamente projetada para o desmonte de um certo volume de rocha sobre a bancada e frente livre digitalmente modelada.

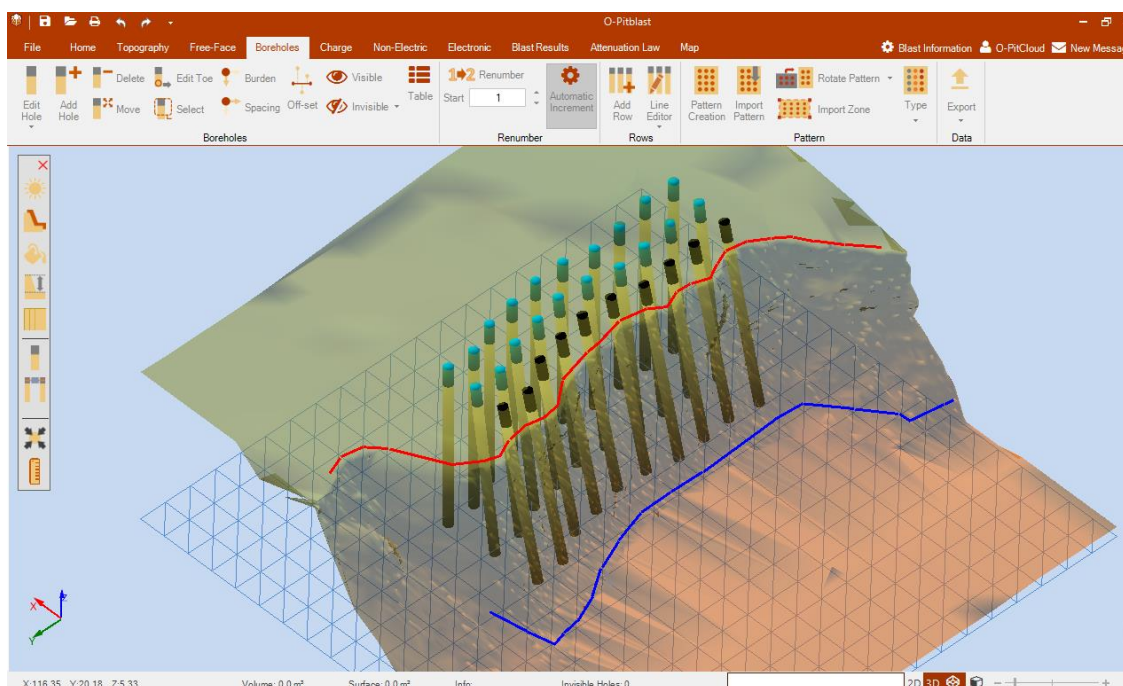


Figura 82 - Pega de fogo projetada para o desmonte de um certo volume de rocha.

É possível constatar que se trata de uma pega de fogo com um total de 30 furos, implementados em três fiadas de furos, as quais possuem um alinhamento de projeto que contempla um atenuamento sucessivo das irregularidades da frente livre. Este tipo de geometria de atenuamento, associado a um correto planeamento das inclinações dos furos, poderá apontar para a garantia de obtenção de uma nova frente livre, pós desmonte, muito mais regular.

Há ainda a possibilidade de importação de dados relativos a levantamentos de frentes livres com pefilómetro laser em conjunto com informações relativas às geometrias previstas e realmente implementadas dos furos para implementação de um de um desmonte. Esta última informação pode ser obtida com metodologias como a vulgarmente conhecida por Boretrak. Este método faz aquisição de direções e inclinações de furos ao longo dos seus comprimentos em passos de amostragem predefinidos. Existem fundamentalmente dois tipos de métodos de aquisição de dados pelo sistema Boretrak – por cabo ou barras (Figura 84). A plataforma O-Pitblast está preparada para receber dados através de cada um destes métodos (Figura 83).

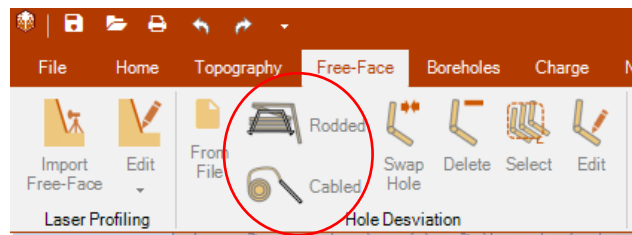


Figura 83 - Ícones de aquisição de dados de Boretrak na Plataforma O-Pitblast

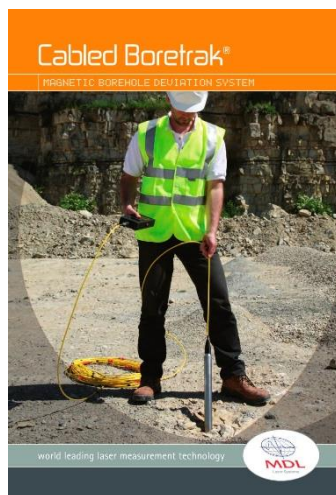


Figura 84 - Sistema Boretrak – Por cabo e por barras – Capas de catálogos da Boretrak

Apresentamos um exemplo, na Figura 85, da conjugação de informações de geometrias de furos projetados e realmente implementados.

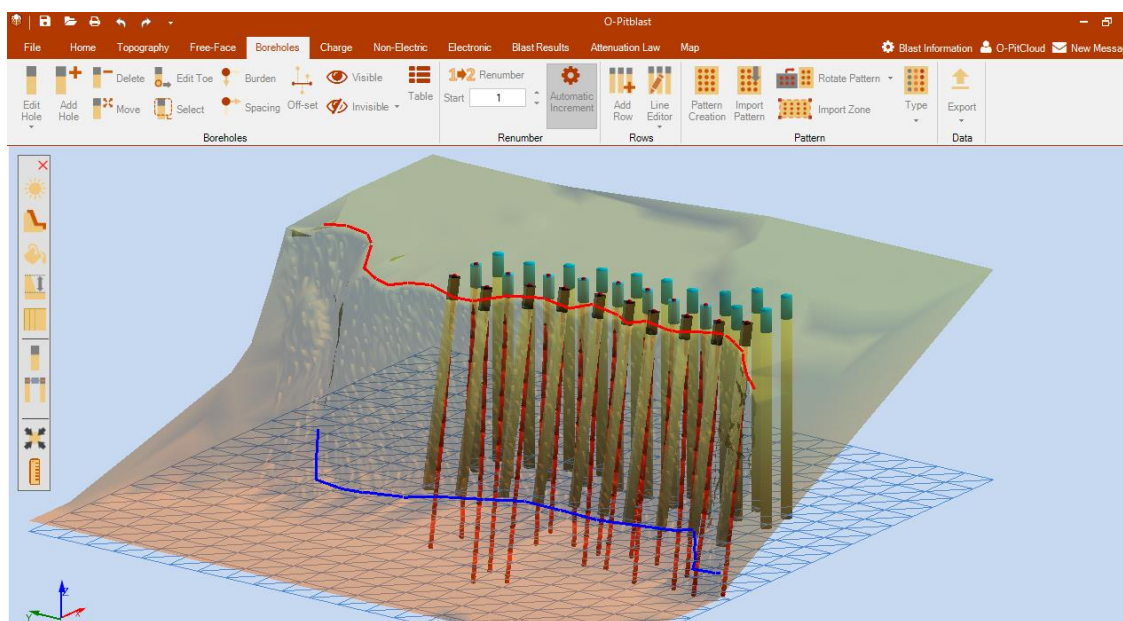


Figura 85 - Imagem de geometrias e furos projetados e realmente implementados.

Na Figura 84 é notório o desvio final de muitos dos furos relativamente ao projeto inicial de perfil linear bem como uma clara sobrefuração.

Na Figura 86 apresentam-se várias vistas de um dos furos da pega de fogo com pormenores do desvio e respetiva sobrefuração.

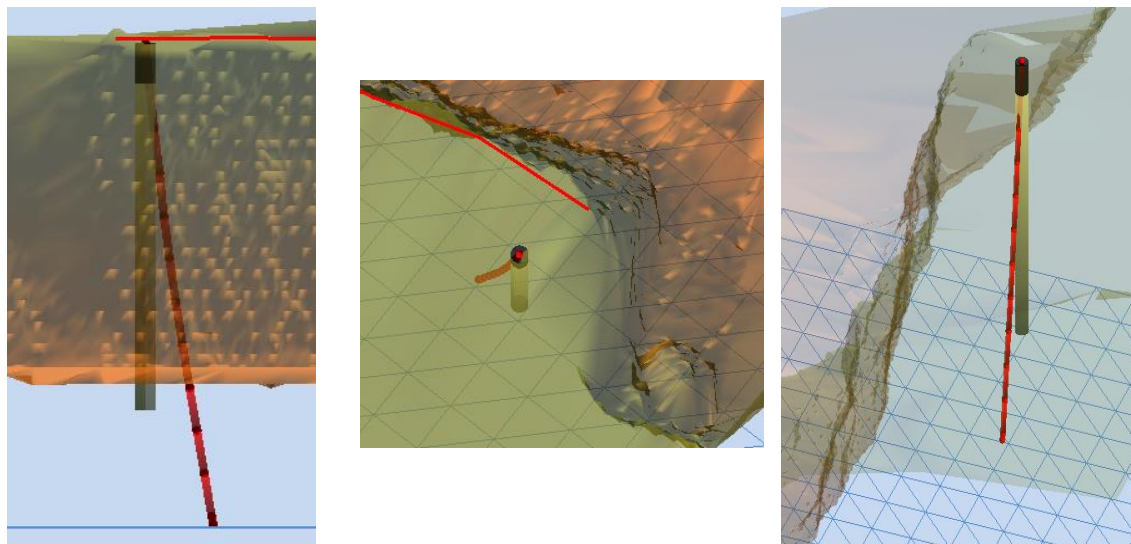


Figura 86 - Vistas de um dos furos da pega de fogo.

Com este tipo de informação, é possível a construção de perfis entre furos e as respetivas linhas de frente livre a eles associados. Tal informação realçará afastamentos críticos ao longo de cada furo o que permitirá um dimensionamento das cargas de explosivos e retardos a implementar que minimizem efeitos nefastos de vária ordem associados ao desmonte com explosivos. Na Figura 87 apresentamos um perfil de afastamento entre um furo realmente executado e a frente livre que lhes está próxima, contemplando dados do afastamento a várias profundidades.

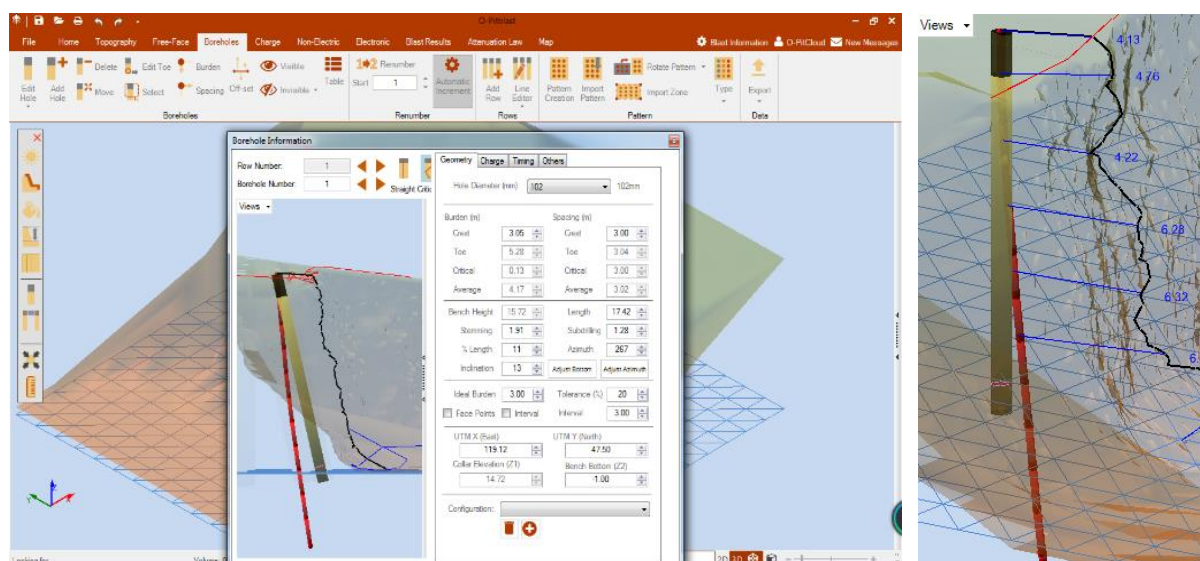


Figura 87 - Perfis de afastamentos entre furos e a frente livre que lhes está próxima.

Este tipo de possibilidades de aquisição e manipulação de dados, altera completamente a filosofia da atividade de implementação de diagramas de fogo em desmonte de pedreiras. Passamos da vulgar situação de um planeamento em que todos os furos são projetados, e supostamente executados, de forma igual, e neles introduzidos artefactos e quantidades/tipos de explosivos também todos do mesmo tipo.

Passamos a poder projetar a carga explosiva a usar, furo a furo. As mais-valias deste tipo de operacionalização do desmonte serão largamente refletidas em todos os parâmetros resultantes da detonação, podendo-se maximizar os que forem para se maximizar e minimizar os que forem para se minimizar.

Esta nova filosofia de abordagem do planeamento de desmontes faz surgir uma nova Fase no fluxograma da autoria de José Pedro Gomes (Figura 88) de otimização de desmontes, nomeadamente, entre as Fases de Projeto e de Execução, a qual poderá ser designada como Fase de Replaneamento. Ela contemplará atividades de levantamento de dados e criação de modelo digital de terreno, acompanhamento da atividade de perfuração, aquisição de dados de direção e inclinação, a diferentes profundidades, de furos executados e planeamento de cargas de explosivos e de retardos a usar associados a cada furo.

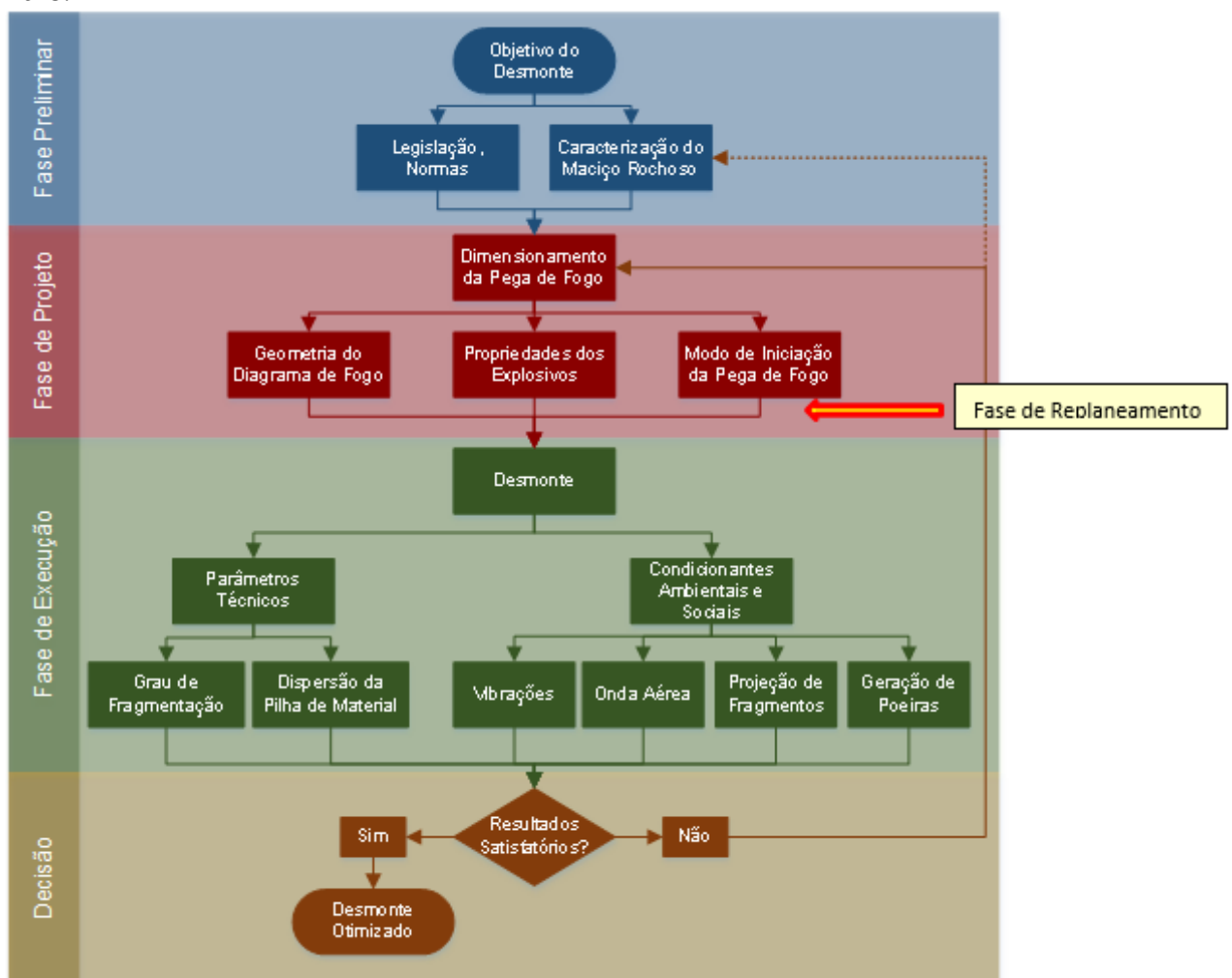


Figura 88 - Fluxograma da Execução de um Desmonte com Recurso a Explosivos. ^[27]

