



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Estudo da influência da fragmentação no custo da
produção de agregados graníticos**

Rui Manuel Teixeira Teotónio



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Estudo da influência da fragmentação no custo da
produção de agregados graníticos**

Rui Manuel Teixeira Teotónio

Nº 1030969

Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Engº. António Vieira, Assistente do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e do Professor Doutor José Augusto Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

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

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

Engenheiro António Rodrigues Vieira
Equiparado a Assistente do 2º Triénio, Instituto Superior de Engenharia do Porto

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

Doutor José António Ganilho Lopes Velho
Professor Associado com Agregação, Universidade de Aveiro

Dedico esta tese aos meus Pais pelo apoio, pelo esforço e por acreditarem na minha graduação em Engenharia Geotécnica. Muito obrigado por tudo...

Agradecimentos

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

❖ O Engenheiro António Vieira (ISEP), orientador científico deste projecto, a quem expresseo o meu sincero reconhecimento pela forma dedicada e prestável como sempre me orientou cientificamente e me acompanhou, quer no terreno quer no gabinete, ao longo deste trabalho, o meu muito obrigado;

❖ Ao meu coorientador, o Professor Doutor José Augusto Fernandes, pelo precioso auxílio e orientação e pela sua enorme disponibilidade para me orientar, obrigado especial por toda a sua paciência.

❖ A todos os Docentes do ISEP que contribuíram para a minha formação e me fizeram capaz de chegar até aqui e me terem tornado no homem que sou hoje...;

❖ A todos os trabalhadores da Mota – Engil que laboram na pedreira de Cervães, em especial ao Sr. Francisco Brito, que por muitas vezes deixou de fazer o seu trabalho para me auxiliar em tudo o que fosse necessário, obrigado pela sua paciência e apoio em todos os momentos;

❖ Aos meus amigos e colegas geotécnicos e todos os outros, que me acompanharam e apoiaram ao longo da minha vida de estudante, principalmente ao Ângelo Silva pela ajuda e troca de ideias em algumas fases do trabalho;

❖ À minha namorada, pelo apoio incondicional que me deu nos momentos mais difíceis do trabalho, momentos em que pensei desistir, só ela sabe;

❖ Por fim aos meus pais, pelo apoio, pelo esforço e por acreditarem na minha graduação... o meu muito obrigado...

Palavras – chave

Custos, Rentabilidade, Maciço rochoso, Fragmentação

Resumo

Hoje em dia algumas das principais preocupações que se tem na exploração a céu aberto, são a diminuição de custos e a máxima rentabilidade dos equipamentos. São dois aspectos que estão interligados uma vez que a rentabilização dos equipamentos tem como resultado directo a diminuição dos custos de todas as operações inerentes à exploração a céu aberto e, conseqüentemente, a diminuição dos custos finais de produção. É por essa lógica de pensamento que se procurou perceber e compreender o funcionamento e a rentabilidade dos equipamentos em função dos diferentes estados de fracturação do maciço rochoso.

Este estudo foi realizado numa pedreira a norte de Portugal e complementa outros estudos já realizados, com o objectivo de definir características do diagrama de fogo que assegurem a maior rentabilidade da referida exploração. O estudo baseia-se em determinar os rendimentos da pá carregadora calculando os tempos de ciclo, isto é, o tempo que a pá demorou a carregar, a movimentar e a descarregar o material desmontado dos vários rebentamentos. Calculou-se o rendimento do martelo demolidor na fragmentação de grandes blocos, que não entrariam directamente no britador primário, o qual também foi alvo de estudo, nomeadamente, no que diz respeito aos tempos de encravamento e de britagem, onde se tentou correlacionar esses tempos com os vários desmontes e estimou-se o consumo de energia do britador primário utilizando a equação de Bond. Por fim, realizou-se um estudo comparativo do consumo energético entre as várias fases da exploração a céu aberto. Foram realizados levantamentos geológico-geotécnicos de superfícies de descontinuidades recorrendo à técnica de amostragem linear nas superfícies do maciço rochoso para perceber o tipo de fragmentação e orientação do mesmo.

Keywords

Costs, Profitability, Rock mass, Fragmentation

Abstract

Nowadays some of the main concerns that have been felt in the open pit mining are reducing the equipment costs while achieving their maximum profitability. These are two aspects that are interconnected because the profitability of the equipments has, as a direct result, the reduction of the cost of all operations involved in the open pit mining exploration and, consequently, the reduction of the final production costs. It is due to this logic of thought that it was sought to realize and understand the operation and profitability of the equipment for different states of fracturing of the rock mass.

This study was carried out in a quarry in the north of Portugal and complements previous studies with the aim of defining characteristics of the diagram of fire to ensure greater profitability of the above-mentioned exploration. The study is based in determining the profits of the shovel by calculating the loader cycle times, in other words, the time it took the shovel to load, unload and move the dismantled material from several blowouts. The yield of the hydraulic brake in the fragmentation of large blocks, which would not enter directly into the primary crusher was calculated. This was also a subject of study, particularly with regard to the time of interlocking and crushing, where it was attempted to correlate these times with several takedowns. The energy consumption of the primary crusher using Bond's equation was also estimated. Finally, a comparative study of energy consumption between the various phases of the open pit mining was carried out. Surveys of geological and geotechnical surfaces of discontinuities were also carried out, using the technique of sampling linear surfaces of the rock mass to understand the type and orientation of fractures.

Índice

Resumo.....	xi
Abstract	xiii
1. Introdução.....	3
1.1 Objectivo e Enquadramento	4
1.2 Geologia	5
1.2.1 Enquadramento Geomorfológico.....	5
1.2.2 Enquadramento Geológico.....	6
1.2.3 Enquadramento Hidrogeológico	7
2. Métodos e técnicas utilizadas	11
2.3 Caracterização estrutural e geomecânica do maciço rochoso	11
2.4 Software utilizado	13
2.5 Trabalho de campo	14
2.5.1 Martelo Demolidor - Fragmentação Secundária.....	14
2.5.2 Pá Carregadora	15
2.5.3 Fragmentador Primário	15
3. Métodos de exploração e operações típicas para desmonte de rocha	19
3.3 Métodos de desmonte a céu aberto.....	19
3.3.1 Desmonte de rochas duras.....	20
3.4 Operações típicas para desmonte de rocha	22
3.4.1 Desmonte/Fragmentação.....	22
3.4.2 Fragmentação secundária	26
3.4.2.1 Colocação de explosivos sobre o bloco	27
3.4.2.2 Execução de um furo para colocação de explosivo	27
3.4.2.2.1 Medidas de segurança na fragmentação secundária com uso de explosivos	28
3.4.3 Martelo demolidor	29
3.4.3.1 Posição da máquina	30
3.4.3.2 Utilização correcta do martelo demolidor.....	30
3.4.4 Pá Carregadora	31
3.4.4.1 Tipos de Pás Carregadoras.....	32
3.4.4.1.1 Características Gerais.....	32
3.4.4.2 Carga	33
3.4.4.2.1 Força de Penetração.....	33

3.4.4.2.2	Força de arranque	34
3.4.4.2.3	Força de elevação.....	34
3.4.4.3	Método de carregamento.....	34
3.4.5	Transporte	35
3.4.6	Fragmentação com britador primário	37
3.4.6.1	Objectivo	37
3.4.6.2	Etapas da fragmentação	37
3.4.6.3	Fragmentação <i>versus</i> consumo de energia	38
3.4.6.4	Factores que influenciam a operação de fragmentação	38
3.4.6.4.1	Tempo de residência	38
3.4.6.4.2	Relação de redução	39
3.4.7	Fragmentadores primários	40
3.4.7.1	Características gerais dos fragmentadores primários	41
3.4.7.2	Tipos de fragmentadores primários.....	42
3.4.7.2.1	Britador de maxilas	43
3.4.7.2.2	Britador tipo <i>Blake</i>	43
3.4.7.2.2.1	Vantagens e Desvantagens	44
3.4.7.2.3	Britador de maxilas sem biela tipo <i>Bulldog</i>	44
3.4.7.2.3.1	Vantagens e Desvantagens	45
3.4.7.2.4	Britador tipo <i>Dodge</i>	46
3.4.7.2.4.1	Desvantagens	46
3.4.7.2.5	Britadores giratórios.....	46
3.4.7.2.5.1	Vantagens e Desvantagens	48
4.	Caso de estudo	51
4.3	Situação de referência da pedreira de Cervães	51
4.4	Rebentamentos com explosivos	52
4.4.1	Primeiro rebentamento.....	52
4.4.2	Segundo rebentamento	53
4.4.3	Terceiro rebentamento	55
4.4.4	Quarto rebentamento	56
4.4.5	Quinto rebentamento	58
4.4.6	Sexto rebentamento.....	60
4.5	Operação de carga	61
4.6	Martelo Demolidor	66

4.7	Fragmentador Primário.....	67
5.	Considerações de Carácter Económico/Eficiência Energética	73
5.3	Pá Carregadora.....	73
5.4	Martelo demolidor	74
5.5	Fragmentador Primário.....	76
5.6	Perfuração e carregamento de explosivo	76
5.6.1	Primeiro rebentamento.....	77
5.6.2	Segundo rebentamento	77
5.6.3	Terceiro rebentamento	78
5.6.4	Quarto rebentamento	78
5.6.5	Quinto rebentamento	79
5.6.6	Sexto rebentamento.....	80
5.7	Eficiência energética	80
6.	Conclusões	85
6.3	Perspectivas de Estudo e Desenvolvimento	87
7.	Bibliografia	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema do ciclo de exploração	3
Figura 2 - Localização da Pedreira Bouça do Menino (Mota – Engil, 2004).....	4
Figura 3 - Morfologia do norte e centro de Portugal (http://snirh.pt)	5
Figura 4 – Extracto do mapa geológico da folha 5-C Barcelos (adaptado: Medeiros C., Teixeira A., 1969)	6
Figura 5 - Frente de avanço da pedreira	12
Figura 6 - Quadro utilizado como escala para o software	13
Figura 7 - Desmonte em flanco de encosta.....	19
Figura 8 - Desmonte em corta (www.uk-rocks.net).....	19
Figura 9 - Inclinação do talude	20
Figura 10 - Novas formulações para leis de propagação de vibrações em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos. (adaptado; Correia, 2009).....	21
Figura 11 - Desvios de perfuração (adaptado: Vieira, 2008).....	25
Figura 12 - Inclinação da perfuração (Gomes, Galiza & Vieira, 2008).....	25
Figura 13 - Cilindro de comoção (adaptado: Gomes, Galiza & Vieira, 2006)	26
Figura 14 - Colocação de explosivo sobre o bloco (adaptado: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias).	27
Figura 15 - Material pronto para sofrer fragmentação secundária	28
Figura 16 - Fragmentação secundária através do martelo hidráulico	29
Figura 17 - Ângulos de posicionamento correcto (http://members.fortunecity.es)	30
Figura 18 - Posicionamento correcto do martelo hidráulico (http://members.fortunecity.es)	31
Figura 19 - Força de penetração	34
Figura 20 - Trajecto teórico da máquina no carregamento	35
Figura 21 - Transporte de material fragmentado.....	36
Figura 22 - Utilização de motoniveladora (Ribeiro, 2008)	36
Figura 23 - Etapas da fragmentação (adaptado: Fernandes, 2006).....	37
Figura 24 - Controle da alimentação de um fragmentador primário (Sampaio, 2006)	41
Figura 25 - Aspecto da alimentação de um primário	42
Figura 26 - Aspecto dos produtos saídos de um primário	42
Figura 27 - Tipos de fragmentadores primários (adaptado: Fernandes, 2006)	43
Figura 28 - Britador de maxilas tipo <i>Blake</i> (www.metsominerals.com)	44
Figura 29 - Britador de maxilas sem biela tipo <i>Bulldog</i> (www.sandvik.com).....	45
Figura 30 - Britador de maxilas tipo <i>Dodge</i> (www.google.com/imgres)	46
Figura 31 - Britador giratório (Sampaio, 2006)	47
Figura 32 - Imagem resultante do primeiro rebentamento.....	52

Figura 33 - Curva granulométrica do primeiro rebentamento	53
Figura 34 - Granulometria do material obtido no segundo rebentamento	54
Figura 35 - Curva granulométrica do segundo rebentamento.....	54
Figura 36 - Resultado do terceiro rebentamento	55
Figura 37 - Curva granulométrica do terceiro rebentamento.....	56
Figura 38 - Granulometria resultante do quarto rebentamento	57
Figura 39 - Curva granulométrica do quarto rebentamento	57
Figura 40 - Imagem resultante do quinto rebentamento	58
Figura 41 - Curva granulométrica do quinto rebentamento.....	59
Figura 42 - Imagem resultante do sexto rebentamento	60
Figura 43 - Curva granulométrica do sexto rebentamento.....	60
Figura 44 - Tempos de ciclo da pá carregadora nos diferentes rebentamentos	62
Figura 45 - Representação gráfica dos custos operacionais da pá carregadora	65
Figura 46 - Representação gráfica dos custos variáveis do martelo demolidor	67
Figura 47 - Representação gráfica dos tempos de trabalho, encravamento e de espera do fragmentador primário	68

Índice de Tabelas

Tabela 1- Síntese das características geológico-geotécnicas da pedra de Cervães.....	11
Tabela 2 – Tabela indicativa da força e tensão de rotura (adaptado: LGMC - CICCOPN)	12
Tabela 3 - Valores entre a dimensão do bloco e a carga de explosivo (adaptado: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias)	27
Tabela 4 - Valores entre a dimensão do bloco, tipo de furo e a carga do explosivo (adaptado: Gomes, Galiza & Vieira, 2006).....	28
Tabela 5 – Tipos de pás carregadoras (Adaptado: Lopez Jimeno, 1991)	32
Tabela 6 - Relações de redução dos vários equipamentos (adaptado: Fernandes, 2006)	40
Tabela 7 – Tipos e características de britadores de maxilas (adaptado: Fernandes, 2006)	43
Tabela 8 - Tipos e características de britadores giratórios (adaptado: Fernandes, 2006).....	47
Tabela 9 - Dados relativos aos rebentamentos estudados	52
Tabela 10 – Tempos de ciclo da pá carregadora	62
Tabela 11 – Comparação entre o tempo de ciclo da pá carregadora e a carga específica.....	63
Tabela 12 - Dados recolhidos em cada mês sobre peso, horas de trabalho e nº de <i>dumpers</i> carregados.....	64
Tabela 13 - Rendimento médio da pá carregadora e dos <i>dumpers</i>	64
Tabela 14 – Consumos e custos variáveis da pá carregadora	65
Tabela 15 - Dados do martelo demolidor referentes ao volume, trabalho e rendimento	66
Tabela 16 - Custos variáveis do martelo demolidor.....	67
Tabela 17 – Tempos relativos ao fragmentador primário	68
Tabela 18 - Energia consumida pelo fragmentador primário	69
Tabela 19 - Custo horário em diferentes meses para a pá carregadora	73
Tabela 20 - Custo total por hora da pá carregadora	73
Tabela 21 - Custo total de cada rebentamento em relação à pá carregadora	74
Tabela 22 – Custo por tonelada em relação à pá carregadora	74
Tabela 23 - Custo horário em diferentes meses para o martelo demolidor.....	75
Tabela 24 – Custo médio por hora do martelo demolidor	75
Tabela 25 - Custo total da fragmentação secundária em cada rebentamento	76
Tabela 26 - Custo da energia no fragmentador primário em cada rebentamento.....	76
Tabela 27 - Custo total de gasóleo e explosivos do primeiro rebentamento	77
Tabela 28 - Custo total de gasóleo e explosivos do segundo rebentamento	77
Tabela 29 - Custo total de gasóleo e explosivos do terceiro rebentamento	78
Tabela 30 - Custo total de gasóleo e explosivos do quarto rebentamento	79
Tabela 31 - Custo total de gasóleo e explosivos do quinto rebentamento	79

Tabela 32 - Custo total de gásóleo e explosivos do sexto rebentamento	80
Tabela 33 - Consumo energético de perfuração, de rebentamento, de fragmentação secundária e de britagem.	81
Tabela 34 – Valores comparativos entre o consumo de energia, carga específica e o custo total de cada rebentamento.....	81

Índice de Equações

Equação 1 – Equação de <i>Bond</i>	16
Equação 2 – Equação para calcular a carga específica.....	23
Equação 3 – Equação para calcular a perfuração específica.....	23

Lista de Abreviaturas

- b** – patamar da bancada
- b1** – perfuração específica
- D₈₀** – calibre de alimentação (80% passado) em microns
- d₈₀** – calibre resultante (80% passado) em microns
- E** – espaçamento entre furos
- h** – altura de bancada
- H** – comprimento do furo
- ISRM** – International Society for Rock Mechanics
- K** – altura de bancada
- n** – número de furos
- q** – consumo específico de explosivo
- Qt** – peso total da carga por furo
- V** – distância à frente
- W** – energia consumida
- Wi** – índice de Bond
- α** – ângulo de talude

1. Introdução

1. Introdução

A indústria extractiva representa um dos maiores crescimentos a nível económico em todo o mundo, criando empregos e ajudando ao desenvolvimento a nível tecnológico, uma vez que muitos dos minerais extraídos originam matérias-primas que são essenciais para a nossa sociedade.

A exploração a céu aberto é uma complexa actividade usada para explorar normalmente depósitos próximos da superfície, onde é possível a sua viabilidade económica. Necesita de um forte investimento inicial e nos dias de hoje, em que a procura escasseia e a oferta abunda, é imperativo rentabilizar ao máximo cada operação que constitui o ciclo de exploração.

A exploração de uma pedreira é um somatório de várias operações que assim constituem um ciclo (figura 1).



Figura 1 - Esquema do ciclo de exploração

Esse ciclo de exploração desde a perfuração, passando pela fragmentação do material e terminando na carga expedição, para se tornar num ciclo lucrativo, necessita de uma busca intensa e diária pela otimização de cada etapa (Pernia Llera, 1987).

Apesar da evolução da exploração mineira a céu aberto, dos avanços tecnológicos no desenho e na construção de máquinas de exploração mineira e do aumento da capacidade das mesmas, que fizeram aumentar os seus rendimentos, são os factores geomecânicos do maciço rochoso que mesmo assim desempenham um papel importantíssimo na escolha, não só, do método de desmonte, o qual pode ser mecânico ou com perfuração e utilização de explosivos, mas também nas escolhas mais adequadas dos equipamentos utilizados na exploração.

Dentro do ciclo básico de exploração - desmonte, carga e transporte - a primeira operação tem como objectivo principal a fragmentação da rocha no intuito de alcançar o tamanho certo para otimizar a produtividade de todo o ciclo e, por conseguinte, reduzir os custos de exploração. As

operações de carga e transporte estão intimamente ligadas entre si. São operações que exigem um redimensionamento constante ao longo da vida da pedreira, isto porque, em cada momento estas duas operações têm que ser adequadas às condições de crescimento da exploração, tendo em conta o aumento do comprimento das pistas de circulação e a produtividade desejada (Lopez Jimeno *et al.*, 1991).

1.1 Objectivo e Enquadramento

O objectivo deste estudo é tentar perceber em que medida a fragmentação resultante do desmonte com explosivo de um maciço rochoso granítico tem influência nas operações que fazem parte da actividade de produção de agregados, nomeadamente na fragmentação secundária, carga, transporte, e fragmentação no britador primário.

O estudo foi realizado na pedreira Bouça do Menino, pertencente à empresa Mota-Engil, SA. localizada na freguesia de Cervães, concelho de Vila Verde e distrito de Braga (figura 2).

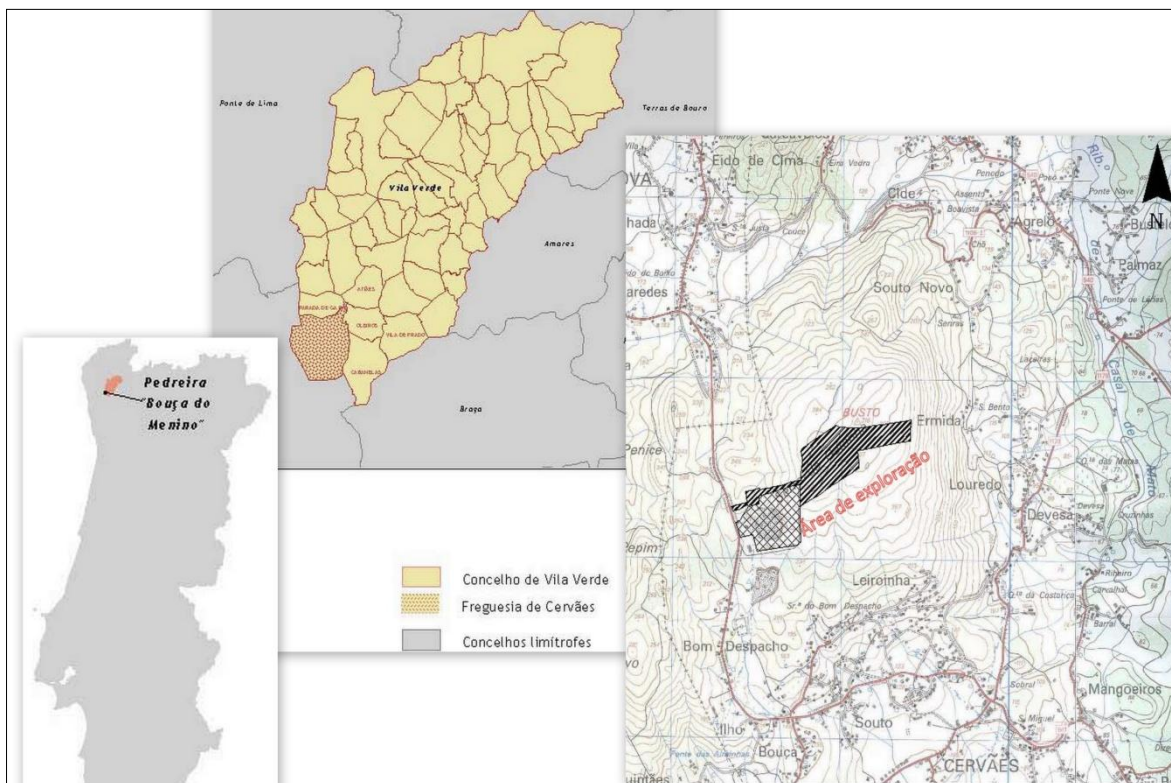


Figura 2 - Localização da Pedreira Bouça do Menino (Mota – Engil, 2004)

Iniciou-se o estudo pela análise do maciço rochoso granítico recorrendo à técnica de amostragem linear para o reconhecimento do maciço. Ultrapassada esta fase, iniciou-se a observação, recolha e análise de dados dos diferentes tipos de equipamentos. Recolheram-se valores do tempo de

ciclo da pá carregadora, calcularam-se os rendimentos do martelo demolidor na fragmentação secundária, recolheram-se as horas de trabalho, de espera de pedra e encravamento do fragmentador primário, assim como a energia consumida pelo mesmo. Recolheram-se e analisaram-se simultaneamente dados referentes às diferentes curvas granulométricas resultantes dos diferentes rebentamentos realizados. Todos estes dados foram recolhidos com o intuito de encontrar aquele que mais nos satisfaz, isto é, o que no final apresentar, não só, valores mais baixos no somatório dos custos de todas as operações, mas também o que se revelar mais satisfatório em termos de produção e qualidade da curva granulométrica do material fragmentado.

1.2 Geologia

Neste sub-capítulo far-se-á uma descrição geológica do maciço da região de Cervães, com exposição do enquadramento geológico, geomorfológico e hidrogeológico.

1.2.1 Enquadramento Geomorfológico

Em termos geomorfológicos o norte de Portugal, principalmente o nordeste apresenta grandes sistemas montanhosos com os maciços graníticos a aflorarem.

Este estudo foi realizado na pedreira Bouça do Menino, cuja área de implantação da pedreira situa-se na serra da Gatanha ou de Busto e apresenta um modelado suave marcado pelo percurso do rio Cávado em vale aberto e pelas elevações que o acompanham, formando relevos a média altitude, sendo o granito a rocha predominante. A área da pedreira situa-se na encosta sul de uma das elevações situadas a norte do vale do Cávado, onde aflora o maciço granítico monzonítico, predominantemente biotítico, não porfiróide de grão médio, ideal para a exploração. A figura 3 apresenta a morfologia do norte e centro de Portugal.

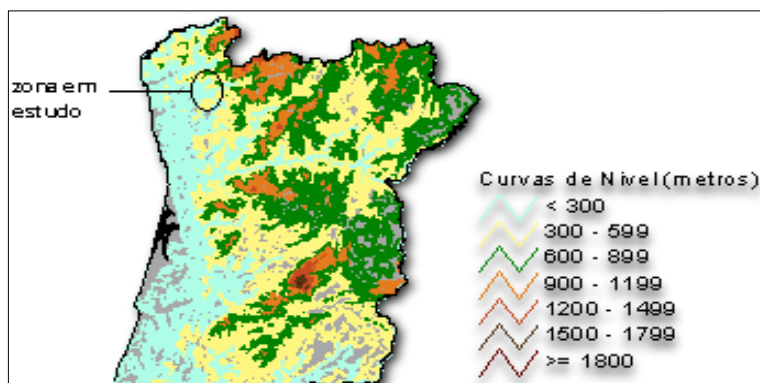


Figura 3 - Morfologia do norte e centro de Portugal (<http://snirh.pt>)

1.2.2 Enquadramento Geológico

A zona da pedra de Cervães encontra-se inserida no mapa geológico de Barcelos, cobre a área representada pela folha 5-C (Barcelos) da Carta Corográfica de Portugal, editada pelo Instituto Geográfico e Cadastral.

O mapa de Barcelos compreende várias unidades geológicas, entre as quais rochas eruptivas, onde se destaca o granito calco – alcalino, de duas micas com biotite, explorado pela pedra.

Segundo o extracto do mapa geológico, a pedra insere-se numa zona onde abunda o granito não porfiróide, de grão grosseiro a médio, possuindo uma tonalidade azul clara ou amarelada, quando se encontra, respectivamente, sã ou alterada.

A figura 4 mostra o extracto da folha 5-C do mapa geológico de Barcelos.

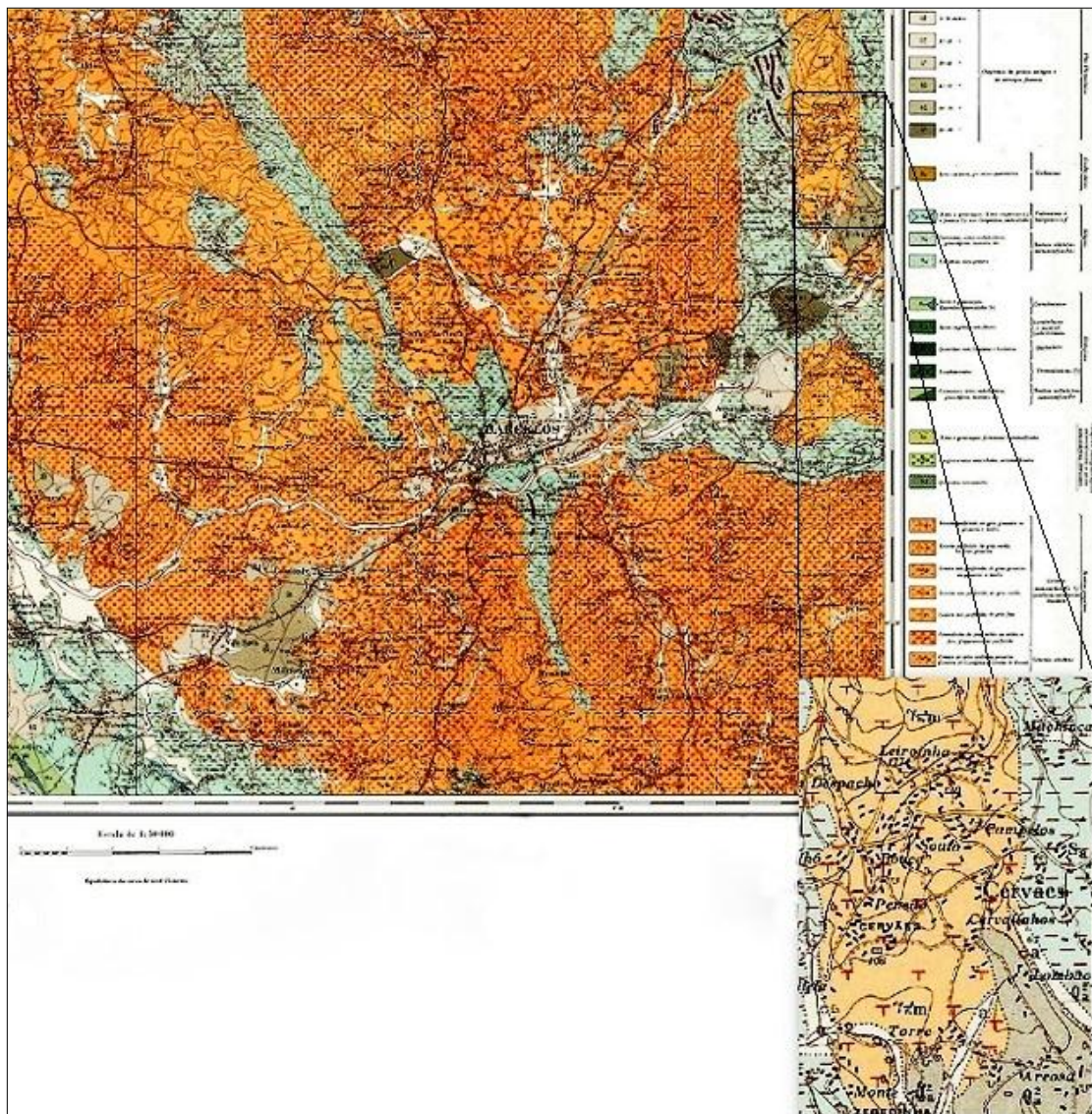


Figura 4 – Extracto do mapa geológico da folha 5-C Barcelos (adaptado: Medeiros C., Teixeira A., 1969)

1.2.3 Enquadramento Hidrogeológico

Em termos hidrogeológicos a pedreira de Cervães é atravessada por uma linha de água de primeiro escoamento de águas pluviais e insere-se na bacia hidrográfica do rio Cávado, cujo curso corre a sul do local segundo o azimute nordeste – sudoeste (GEOMEGA, 2006).

O rio Cávado possui uma bacia hidrográfica de 1699 km², apresentando uma rede de drenagem com elevada densidade de linhas de água de primeiro escoamento de águas que por seu turno, alimentam cursos de água de escoamento temporário.

Este rio assume um papel importante na cidade de Braga, uma vez que representa a fonte de abastecimento de água para as populações e indústria, ou até como meio receptor de descargas de águas residuais.

O escoamento subterrâneo depende da compartimentação do maciço rochoso, ou seja, depende da permeabilidade que a formação granítica possa apresentar. Neste caso em concreto, e por se tratar de uma rocha pouco alterada, o maciço granítico permite apenas a permeabilidade por meio fissural, sendo assim considerada de moderada a baixa (C.P.A., 2007).

2. Métodos e Técnicas Utilizadas

2. Métodos e técnicas utilizadas

2.3 Caracterização estrutural e geomecânica do maciço rochoso

Com o objectivo de caracterizar estruturalmente e mecanicamente o maciço, procedeu-se em primeiro lugar a uma recolha intensiva de informação “*in situ*”. Para tal, aplicou-se a técnica de amostragem linear que consiste na simples colocação de uma fita graduada em faces expostas do maciço sendo cartografadas todas as descontinuidades que intersectavam essa linha de amostragem. Em cada descontinuidade intersectada, foram registados certos parâmetros, tais como, a distância à origem da fita, a atitude geológica da descontinuidade, a rugosidade, o grau de alteração, o preenchimento das descontinuidades e a presença de água.

A não valorização das descontinuidades sub-horizontais e a inevitável curvatura da fita métrica representam as principais desvantagens da técnica de amostragem linear (Martins et al., 2006).

Depois de efectuado o referido levantamento geotécnico, procedeu-se à compilação e síntese dos dados recolhidos e à classificação geomecânica com base nas características previamente determinadas. A caracterização estrutural e geomecânica do maciço rochoso foram realizadas segundo os critérios de classificação da ISRM (1981).

Assim, conclui-se que o granito se encontra medianamente alterado à superfície, melhorando em profundidade. A pedra apresenta cinco bancadas (figura 5), sendo que a primeira bancada da exploração contém granito moderadamente alterado (W3). A segunda e terceira bancadas possuem granito ligeiramente alterado (W2), sendo que a última bancada contém um granito (W1-2), situando-se entre são e ligeiramente alterado.

O maciço apresenta um grau de fracturação (F1-2), onde se verifica um afastamento médio de 60 a 380 cm entre as fracturas.

A tabela 1 apresenta as características geológico-geotécnicas da pedra de Cervães.

Tabela 1- Síntese das características geológico-geotécnicas da pedra de Cervães

Orientação média das fracturas	Espaçamento médio (cm)	Comprimento do perfil (m)	Número de descontinuidades	“Factor de fracturação”
N70°-86°E	60 - 380 (F1-2)	73,95	39	0,53

O conhecimento da orientação das fracturas é um factor muito importante, uma vez que influencia muito o resultado final do rebentamento. O estudo foi realizado tendo em conta a orientação da frente de avanço (figura 5), que se realizou sempre de Oeste para Este. Esta

orientação é sem dúvida a melhor possível, dada a orientação das fracturas, pois permite obter resultados muito satisfatórios em relação à fragmentação. Para além de se obter paredes verticais regulares, os explosivos irão ter a maior influência nos calibres do material desmontado, ao contrário de outras orientações onde se poderia obter calibres maiores ou menores consoante a orientação presente no maciço, pois a reacção do maciço aos explosivos seria menor.

Quando se dá o rebentamento as discontinuidades irão actuar como faces livres parciais das quais uma quantidade significativa de ondas de reflexão surgirá, dando origem a tensões de tracção. Essas tensões, juntamente com os gases dos explosivos, vão separar e movimentar o maciço rochoso.

A figura 5 ilustra a orientação da frente de avanço da pedreira.



Figura 5 - Frente de avanço da pedreira

Em relação à qualidade do granito presente na pedreira, pode-se ver na tabela 2, os resultados dos ensaios de tensão de rotura realizados pelo Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN (LGMC - CICCOPN).

Tabela 2 – Tabela indicativa da força e tensão de rotura (adaptado: LGMC - CICCOPN)

Provete cilíndrico					
Referência do provete	Dimensões dos diâmetros		Área (mm ²)	Força de rotura (KN)	Tensão de rotura (MPa)
	d1 (mm)	d2 (mm)			
A0837/03	103,5	103,6	8421,5	1049,6	124,6
	102,4	102,4	8235,5	811,7	98,6
	103,1	103,1	8348,5	984,0	117,9
	103,4	103,4	8397,2	332,1	39,5

Conclui-se, pela análise dos resultados dos ensaios, que estamos perante três tipos de granitos diferentes, no que diz respeito à qualidade do material. Sendo assim, os provetes de granito que possuem uma força de rotura de 1049,6 e 984,0 KN e cuja tensão de rotura é de 124,6 e 117,9 MPa, correspondem a um granito são, muito resistente que se situa entre as bancadas 4 e 5. O granito que obteve uma força de rotura de 811.7 KN e uma tensão de rotura de 98.6 MPa é um granito medianamente alterado, resistente, situando-se entre as bancadas 2 e 3. O granito com uma força de rotura de 332,1 KN e uma tensão de rotura de 39,5 MPa, corresponde a um granito de resistência média e já com algum grau de alteração, correspondendo assim a um granito da primeira bancada.

2.4 Software utilizado

Para avaliação da curva de fragmentação resultante do rebentamento da rocha com explosivos, utilizou-se o *software WipFrag* que é um programa de computador bastante simples de usar e que fornece informação relativamente à dimensão do material após rebentamento.

O seu modo de funcionamento é simples e rápido na obtenção de resultados, não sendo necessária a interrupção da produção. Consiste em fotografar o material solto, utilizando uma escala que permita obter a dimensão dos fragmentos. A sua identificação é realizada em duas fases. A primeira fase detecta as sombras entre os blocos adjacentes, por isso os resultados obtidos serão melhores quanto mais claras e focadas forem as imagens. A segunda fase executa uma reconstrução da imagem para delinear ainda mais blocos que são apenas parcialmente descritos na primeira fase (Maerz et al., 1996). Neste caso, a escala utilizada foi uma moldura de 1m×1m (figura 6), em que o *WipFrag* a partir das imagens obtidas gera algoritmos de deteção automaticamente.

O programa apresenta depois os resultados da leitura, sob a forma de histograma e apresenta também uma curva granulométrica do material fragmentado.



Figura 6 - Quadro utilizado como escala para o software

Segundo Maerz et al., (1996) como principais desvantagens ou erros do programa pode-se destacar:

- Erro de amostragem, uma vez que as fotografias podem captar zonas de maiores calibres ou zonas de menores calibres;
- O não delineamento da rocha, que resulta de fotografias mal focadas ou com iluminação inadequada provocando demasiadas sombras entre as rochas;
- A não captura de finos, por serem fragmentos pequenos, dificulta a sua identificação não permitindo o delineamento correcto.

Existem ainda mais dois factores que podem constituir erros menos significativos que correspondem ao erro de perspectiva fotográfica e a captura de fotografias por parte de diferentes operadores.

2.5 Trabalho de campo

Neste sub-capítulo vai-se explicar o estudo realizado para cada tipo de equipamento com o objectivo de avaliar os respectivos rendimentos.

Os equipamentos contemplados no estudo são: o Martelo Demolidor, a Pá Carregadora e o Fragmentador Primário.

2.5.1 Martelo Demolidor - Fragmentação Secundária

O rendimento da fragmentação secundária (taqueio) foi determinado pelo tempo que o equipamento demorou a fragmentar um determinado volume de rocha até à dimensão desejada. Para tal, contabilizou-se o volume de blocos a fragmentar por medição física de cada *espécimen*, processo não muito difícil, uma vez que o operador da pedreira separa e coloca de forma organizada todo o material para submeter a fragmentação secundária.

Medido o volume, registou-se o tempo que o operador necessitou para a respectiva fragmentação, obtendo-se deste modo o rendimento da operação.

Salienta-se o facto de que todo o material separado para fragmentação secundária ser da responsabilidade do operador do equipamento de carga que avalia de forma instintiva e com base na experiência, quais os blocos que devem ser separados e submetidos a nova operação de fragmentação. Por outro lado, o operador do equipamento de fragmentação secundária também actua com mais ou menos intensidade sobre a dimensão máxima resultante, de acordo com a sua

experiência. Este facto faz com que este tipo de operação, quando realizada por diferentes operadores, tenha rendimentos necessariamente diferentes.

Recorda-se que o tamanho máximo suportado pelo fragmentador primário é cerca de 800mm e o operador do equipamento foi sempre o mesmo, pelo que consideramos os rendimentos obtidos como fiáveis para as análises em estudo.

2.5.2 Pá Carregadora

O rendimento da pá carregadora foi obtido pela contabilização dos tempos de ciclo que o equipamento realizava para carregar os *dumpers*. O rendimento da pá carregadora à partida será maior quanto maior for o grau de fragmentação da rocha obtido no desmonte, pois vai diminuir o tempo necessário para carregar o *dumper* e aumentar o volume de material carregado, uma vez que consegue encher mais facilmente o balde (Hustrulid, 1999).

Os tempos de ciclo foram registados para cada tipo de material resultante do rebentamento. Os tempos foram registados tendo em conta a sequência das diferentes fases: carregamento, manobra, descarregamento e manobra. O tempo perdido pelo operador para recolher o material que se vai afastando do escombros, foi contabilizado no tempo de manobra. A pá carregadora analisada foi sempre a mesma, a *Komatsu WA 500* e manobrada sempre pelo mesmo operador. Não foram considerados os ciclos de trabalho da pá carregadora na movimentação dos blocos para a fragmentação secundária.

2.5.3 Fragmentador Primário

O fragmentador primário utilizado na pedreira é do tipo britador de maxilas, modelo C125 *Nordberg*. O número de série corresponde à abertura máxima da boca do britador em mm. Como regra geral da pedreira, o tamanho máximo do material a entrar na boca do britador, não deve ultrapassar os 800mm.

Para calcular o rendimento do fragmentador primário, foi necessário contabilizar os respectivos tempos de inactividade, ou seja, o tempo em que o equipamento esteve parado à espera de uma nova descarga de material, o tempo em que esteve parado devido a encravamentos e o tempo em que realizou trabalho efectivo.

Estes tempos foram compilados para os diferentes rebentamentos e nas cargas em que se efectuaram registos da pá carregadora.

Para estimar a energia consumida pelo fragmentador primário e na falta de um contador aplicado para este equipamento, foi utilizada a equação de *Bond*. Esta equação associa a redução do material a fragmentar com o tamanho do material que entra e sai do fragmentador em microns e ainda um factor de propriedade da rocha. *Bond*, para chegar a esta equação, fez várias experiências com várias rochas até encontrar o W_i , o factor de propriedade de rocha (Eloranta, 1997). No caso em estudo, e segundo Sampaio (2006), o factor de propriedade do granito é de 14,39.

$$W = 10W_i \times \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right)$$

Equação 1 – Equação de *Bond*

Onde:

- W_i - índice de Bond;
- d_{80} - calibre resultante (80% passados) em microns;
- D_{80} - calibre de alimentação (80% passados) em microns.

3. Métodos de exploração e operações típicas para desmonte de rocha

3. Métodos de exploração e operações típicas para desmonte de rocha

Em termos gerais podemos dizer que existem dois métodos de exploração de pedreiras e que a respectiva escolha depende do tipo e valor comercial da rocha:

- Desmonte a céu aberto – aplicado a jazigos próximos da superfície;
- Desmonte subterrâneo – aplicado a jazigos a grande profundidade.

3.3 Métodos de desmonte a céu aberto

O desmonte a céu aberto pode ser realizado em flanco de encosta ou em corta. A posição da rocha e a viabilidade económica do seu aproveitamento ditará, qual dos dois métodos se deve adoptar. As figuras 7 e 8 ilustram operações de desmonte realizadas em flanco de encosta e em corta, respectivamente.



Figura 7 - Desmonte em flanco de encosta

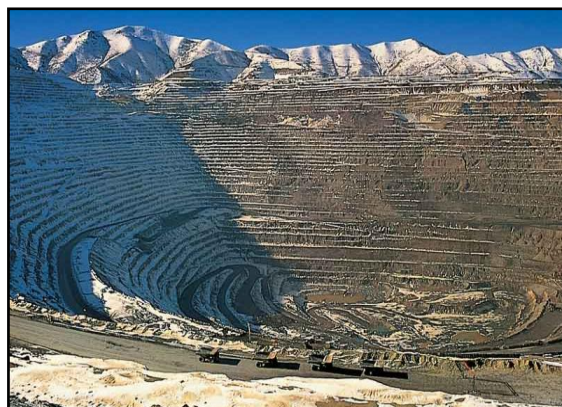


Figura 8 - Desmonte em corta (www.uk-rocks.net)

Os taludes de escavação tanto no desmonte em corta como em flanco de encosta terão uma inclinação no final da exploração (figura 9) que irá depender das características geomecânicas do

maciço, essa inclinação é função da relação entre altura da bancada e a largura do patamar. Assim, são habituais os seguintes ângulos médios de talude (Fernandes, 2006):

- 60° a 70° em rochas duras;
- 40° em rochas detríticas coerentes;
- 30° em rochas detríticas incoerentes.

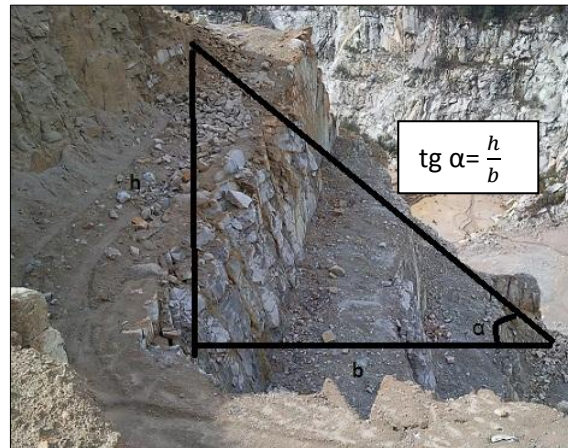


Figura 9 - Inclinação do talude

3.3.1 Desmonte de rochas duras

Quando estamos na presença de rochas duras, são realizados na frente de desmonte rebentamentos com explosivos com a finalidade de se proceder ao arranque da rocha. A realização destes rebentamentos, para ser bem sucedidos e eficazes, têm de respeitar certas condições e procedimentos.

Antes de se iniciar o rebentamento propriamente dito, deve-se criar um diagrama de fogo tendo sempre em atenção certos factores importantes, entre os quais se destaca:

- Produção por pega de fogo;
- Diâmetro do furo;
- Comprimento do furo;
- Subfuração;
- Inclinação do furo;
- Distância (afastamento) à face livre;
- Nº de furos;
- Espaçamento entre furos;
- Carga específica.

Em relação aos explosivos, o diâmetro destes deve ser o mais próximo possível do diâmetro dos furos, determinado no diagrama de fogo. Nos explosivos encartuchados, se o diâmetro dos cartuchos for demasiado pequeno, a concentração de carga vai ser menor podendo impedir o desenvolvimento da detonação. Caso contrário, se o diâmetro for demasiado grande, vai-se obter concentrações de carga demasiado elevada dando origem a maiores vibrações ou maior sobrefracturação da rocha remanescente (<http://e-Geo.ineti.pt/geociencias>).

A presença de compartimentação geológica no maciço rochoso, deverá estar presente no desenho do diagrama de fogo e na previsão da fragmentação, uma vez que essa compartimentação pode absorver ou dispersar as ondas de gases provenientes da detonação através das fendas pré-existentes na vizinhança dos furos originando o desmonte de rocha condicionado pela dimensão dos blocos definidos pela fracturação. Os factores secundários, como as projecções de rocha, vibrações transmitidas aos terrenos adjacentes e o ruído, apesar de inevitáveis, poderão ser controlados e reduzidos se for realizado um bom diagrama de fogo. No entanto, de um modo geral não existe preocupação em relação às fracturas e diaclases, uma vez que com maior ou menor dificuldade a detonação do explosivo produz desmonte. Porém, poderá verificar-se não um desmonte homogéneo como se pretende, mas sim um desmonte heterogéneo com blocos grandes e material demasiado fino e um aumento dos factores secundários.

Destacam-se, na figura 10, os parâmetros importantes num diagrama de fogo para desmonte em bancada a céu aberto.

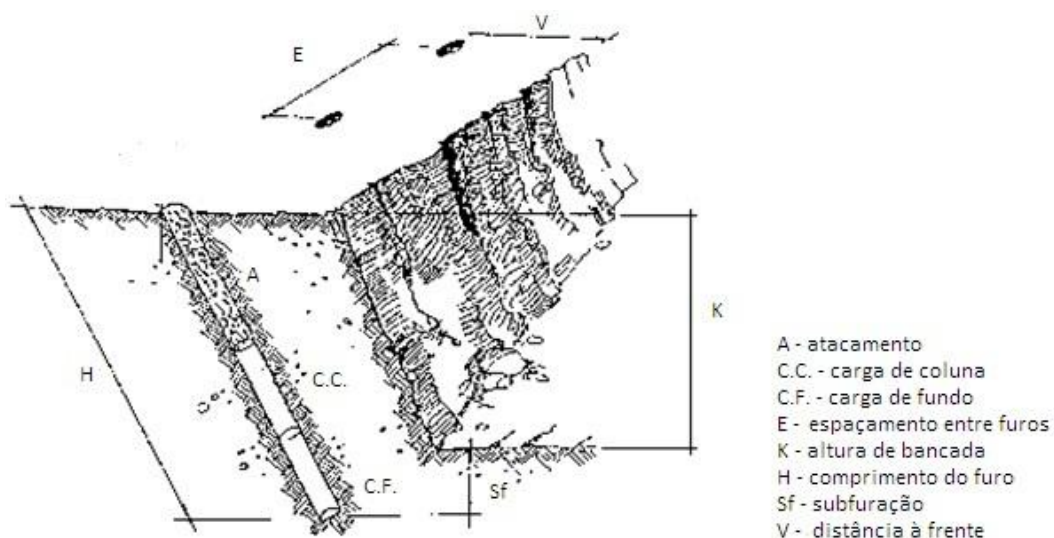


Figura 10 - Novas formulações para leis de propagação de vibrações em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos. (adaptado; Correia, 2009)

O estudo do posicionamento dos furos em relação às fracturas e diaclases do maciço rochoso poderá ser muito conveniente para melhorar a fragmentação da rocha em resultado do rebentamento com explosivos.

O diâmetro do furo depende das propriedades da rocha a ser desmontada, do grau de fragmentação pretendido, da altura da bancada, do tipo de explosivo e está normalmente condicionado ao tipo de equipamento disponível, seja o utilizado na carga, seja o de fragmentação primária (Gomes *et al.*, 2006)

3.4 Operações típicas para desmonte de rocha

3.4.1 Desmonte/Fragmentação

A operação de arranque é a primeira e muito importante operação de escavação a céu aberto, pois uma deficiente operação de fragmentação da rocha irá influenciar muito os rendimentos das restantes operações.

A fragmentação da rocha pode realizar-se fundamentalmente por dois métodos:

- Directo – por acção mecânica de uma ferramenta;
- Indirecto – realizado a partir da libertação de energia de um explosivo situado no interior do maciço rochoso.

Para se obter fragmentação pelo método indirecto, é preciso que os valores das tensões de tracção instaladas no maciço pela acção dos explosivos sejam superiores às tensões de rotura à tracção da rocha (Vaz, 2008). As tensões de tracção surgem após a energia libertada após a explosão. A onda de choque produzida e a pressão dos gases libertados vão expandir as paredes dos furos produzindo assim as fracturas na rocha envolvente (Mohanty, 1996).

A onda de compressão libertada vai propagar-se em todas as direcções e quando atingir uma superfície livre é reflectida, originando ondas de tracção no interior do maciço, igualmente responsáveis pela fracturação (Vaz, 2008).

Segundo Gomes, Galiza & Vieira (2006), a fragmentação pelo método indirecto é utilizada no desmonte em bancada e é afectada pelos seguintes factores:

- **Estado de fracturação natural do maciço** – é o único factor incontrolável. Tem a ver com a atitude, a continuidade, o espaçamento das fracturas, a plasticidade, a presença de água, a fracturação e as falhas. Apesar de incontrolável, o técnico responsável pelo rebentamento com explosivos deve ser capaz de avaliar as circunstâncias em que se realiza cada

rebetamento e ajustar os parâmetros do diagrama de fogo de modo a contrariar o efeito negativo das características geológicas locais;

- **Características físico-mecânicas do maciço rochoso** – são as características de resistência de rotura à compressão e tracção, densidade, velocidade sísmica, dureza e fragilidade do maciço rochoso. São características importantes para se identificar o tipo de maciço rochoso, uma vez que, quanto maior for a resistência de rotura à tracção, maior será a energia necessária para o desmontar. O mesmo acontece em relação à perfuração que iremos ter mais ou menos dificuldade em perfurar a rocha consoante o seu grau de dureza;
- **Carga específica** – é a quantidade de explosivo (kg) utilizado para desmontar um metro cúbico de rocha (m³). Quanto maior a carga específica mais fragmentada irá ficar a rocha, mas maior será a probabilidade de projecções. A carga específica pode ser calculada da seguinte forma:

$$q = \frac{n \times Qt}{n \times E \times V \times K}$$

Equação 2 – Equação para calcular a carga específica

Onde:

- **q** – consumo específico de explosivo;
 - **n** – número de furos;
 - **Qt** – peso total da carga por furo;
 - **E** – espaçamento entre furos;
 - **V** – distância à frente;
 - **K** – altura de bancada;
- **Perfuração específica** – é a quantidade de metros de furo (m) realizados por metro cúbico de rocha (m³). Quanto maior o diâmetro de perfuração, menor será a perfuração específica, já que possibilita o aumento de concentração de carga. No entanto o risco de maiores projecções e vibrações aumenta. Pode-se calcular a perfuração específica segundo a seguinte equação:

$$b1 = \frac{n \times H}{n \times E \times V \times K}$$

Equação 3 – Equação para calcular a perfuração específica

Em que b1 representa a perfuração específica e H representa o comprimento do furo;

- **Tipos de diagrama de fogo** – distinguem-se os diferentes diagramas de fogo pela modificação da relação espaçamento/distância à frente. Para uma fragmentação de menores calibres a relação entre os dois factores deve ser próxima de 8. Caso contrário, para obter uma fragmentação de maiores calibres então a relação terá de baixar para 0,5. Uma boa relação rondará os 1,25;
- **Sequência de iniciação** – é a sequência com que se dão as detonações de cada um dos furos do rebentamento. É um factor importante, uma vez que, uma temporização inadequada, para além de prejudicar a fragmentação, também pode originar projecções verticais ou projecções da primeira fiada de furos consoante o intervalo de tempo utilizado;
- **Número de unidades detonadas no mesmo rebentamento** – quanto mais fiadas de furos tiver um rebentamento, menor será a percentagem de fragmentos de grande calibre, porque para além da colisão entre as partículas originar ainda mais fragmentação, o rebentamento de outras fiadas vai dar origem a mais frentes livres, que por sua vez originará mais ondas de reflexão, provocando mais tensões de tracção no maciço. No entanto, o comprimento do rebentamento não deverá ultrapassar 50% da largura da frente;
- **Qualidade da furação** – é um factor muito importante para o resultado final do rebentamento. Uma furação bem realizada, controlando e minimizando os desvios, é condição essencial para o bom desempenho resultante do rebentamento do explosivo, já que as cargas ficarão convenientemente distribuídas no maciço a fragmentar. Caso contrário, pode originar distâncias à frente irregulares (figura 11) provocando projecções, um aumento das vibrações, a instabilidade dos taludes, a sobre fracturação na parte superior da bancada prejudicando a próxima perfuração, a alteração da movimentação da rocha, a produção de blocos de grande diâmetro com conseqüente aumento dos custos de todas as operações. A deficiente selecção do equipamento e dos acessórios de perfuração, o erro humano e as propriedades estruturais do maciço rochoso, a textura, a elasticidade, a plasticidade, a densidade, a abrasividade e a resistência à compressão constituem as principais causas dos desvios. Para diminuir ou evitar os desvios, o operador deverá posicionar o equipamento e executar um correcto emboquilhamento do furo;

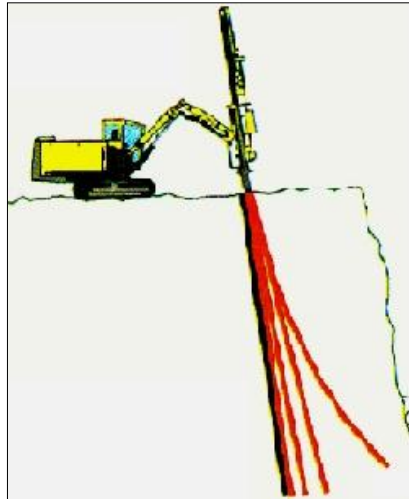


Figura 11 - Desvios de perfuração (adaptado: Vieira, 2008)

- **Inclinação da furação** – uma inclinação próxima dos 18 graus reduz, a quebra à retaguarda e o aparecimento de blocos de grandes dimensões provenientes da parte de cima da bancada (figura 12), o aparecimento de repés, a possibilidade de interrupção do sistema de iniciação e ainda facilita o emboquilhamento da perfuração da pega seguinte;

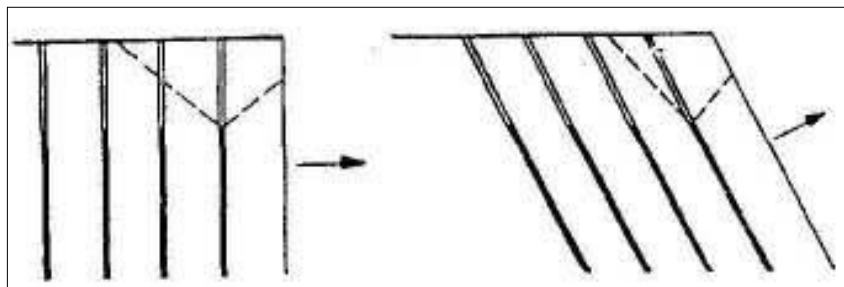


Figura 12 - Inclinação da perfuração (Gomes, Galiza & Vieira, 2008)

Para que se verifique movimento de rocha há que ter em conta a distância à frente livre, a qual, deverá estar de acordo com a carga explosiva do furo que por sua vez se relaciona com o tipo e diâmetro do explosivo utilizado (Vaz, 2008).

Qualquer carga explosiva detonada no interior de um furo irá originar uma superfície cilíndrica teórica (figura 13). Essa superfície cilíndrica, conhecido por cilindro de comoção, vai ter uma geratriz igual ao comprimento do furo e o raio originado vai depender da quantidade e características do explosivo e das características mecânicas do maciço rochoso (Gomes, Galiza & Vieira, 2006).



Figura 13 - Cilindro de comoção (adaptado: Gomes, Galiza & Vieira, 2006)

Ainda em relação ao cilindro de comoção, são pertinentes as seguintes considerações:

- Não haverá desmonte, se o raio do cilindro for menor que a distância à frente livre, formar-se-ão apenas fracturas radiais;
- Vai provocar fracturação na frente livre sem no entanto haver desmonte, se o raio do cilindro for igual à distância à frente livre;
- Haverá desmonte com maior ou menor projecção, se o raio do cilindro for maior que a distância à frente livre.

O volume arrancado por um tiro será teoricamente definido por um prisma triangular, mas na prática, como ocorre rebentamento quase simultâneo de vários tiros o volume arrancado terá dimensões de uma secção rectangular cujas dimensões correspondem à distância à frente e o espaçamento entre furos (Vaz, 2008).

3.4.2 Fragmentação secundária

A fragmentação secundária é uma operação que consiste em reduzir a dimensão dos blocos resultantes de um rebentamento e que têm dimensões superiores à capacidade da máquina de carregamento ou do equipamento de britagem a que se destinam.

Podem ser utilizados três métodos para realizar fragmentação secundária, os quais consistem em:

- Colocar um explosivo sobre o bloco;
- Executar um furo na rocha para colocar um explosivo;
- Utilizar o martelo demolidor.

3.4.2.1 Colocação de explosivos sobre o bloco

A colocação do explosivo sobre o bloco, ilustrado na figura 14, deve obedecer a alguns parâmetros entre os quais:

- Deve-se utilizar um explosivo fracturante;
- O explosivo colocado sobre o bloco deve ser coberto com argila;
- Deve ser usada uma carga específica na ordem de $1,0 \text{ kg/m}^3$.

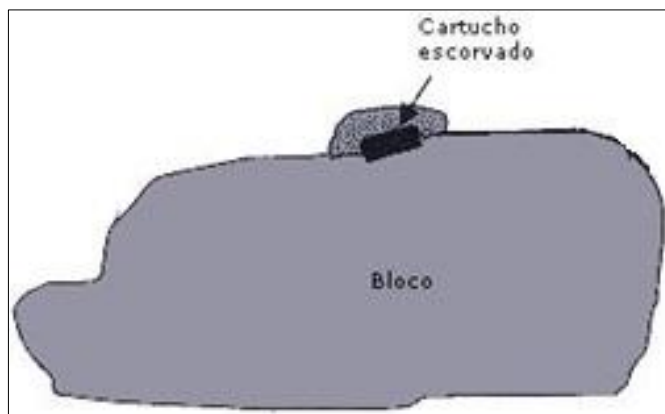


Figura 14 - Colocação de explosivo sobre o bloco (adaptado: <http://e-Geo.ineti.pt/geociencias>)

A tabela 3 indica a carga de explosivo que se deve utilizar em relação à dimensão do bloco a fragmentar.

Tabela 3 - Valores entre a dimensão do bloco e a carga de explosivo (adaptado: <http://e-Geo.ineti.pt/geociencias>)

Dimensão do bloco (m^3)	Carga (kg)
0,6	0,3
1,0	0,5
1,6	0,8
2,0	1,0

Devido ao factor ambiental, a utilização de cargas sobre blocos não é utilizável em zonas de proximidade urbana pelo ruído por elas produzido.

3.4.2.2 Execução de um furo para colocação de explosivo

A execução de um furo para colocação do explosivo deve obedecer às seguintes condições:

- O furo deve ser executado de modo a atingir o centro geométrico do bloco;
- A carga colocada no furo deve ser suficiente para partir o bloco, normalmente com um valor de 0,060 kg/m³;
- Deve ser executado um tamponamento eficaz.

A tabela 4 representa a relação entre a dimensão do bloco, tipo de furo e a carga d explosivo.

Tabela 4 - Valores entre a dimensão do bloco, tipo de furo e a carga do explosivo (adaptado: Gomes, Galiza & Vieira, 2006)

Dimensão do bloco (m ³)	Espessura (m)	Profundidade do furo (m)	Número de furos	Carga (kg/furo)
0,5	0,8	0,44	1	0,03
1	1	0,55	1	0,06
2	1	0,55	2	0,06
3	1,5	0,83	2	0,09

A figura 15 mostra os blocos seleccionados pela pá carregadora na frente da escavação, distribuídos na plataforma para fragmentação secundária pelo martelo demolidor.



Figura 15 - Material pronto para sofrer fragmentação secundária

3.4.2.2.1 Medidas de segurança na fragmentação secundária com uso de explosivos

Existem normas e regulamentações para que os trabalhos de fragmentação secundária de rocha se realizem com segurança, tais como:

- Observar se a superfície do bloco possui fracturas;
- Utilizar uma barreira de protecção, por exemplo, junto a um talude ou no pé de uma bancada, para executar a fragmentação;

- Utilizar preferencialmente cargas colocadas em furos em vez de cargas de contacto, pois estas provocam maior ruído e onda de choque aérea;
- Usar-se o mesmo tempo de detonador, quando se rebentam vários furos no mesmo bloco;
- O uso de cordão detonante produz muito ruído e onda de choque aérea, deve ser por isso evitado.

3.4.3 Martelo demolidor

No desmonte de rocha pelo uso de explosivos, o material fragmentado não se encontra totalmente com diâmetro abaixo da dimensão desejada. Por essa razão uma fracção do material segue directamente para o britador primário, ao passo que a outra fracção do material, devido às suas elevadas dimensões, é separado para sofrer fragmentação secundária.

Dos três métodos possíveis para realizar a fragmentação secundária, a tendência actual recai no uso do martelo demolidor.

O martelo demolidor é uma ferramenta acoplada a uma retroescavadora devendo ser usado em material duro, abrasivo e quebradiço. As principais razões para uso do martelo hidráulico em detrimento dos outros dois métodos, baseiam-se nas seguintes questões:

- Eliminação de projecções, que por vezes são difíceis de controlar;
- Apesar de provocar algum ruído de forma contínua, é muito menor do que o ruído provocado pelo rebentamento de um explosivo rápido e normalmente pouco confinado;
- Economicamente mais barato, por ser mais mecanizado e com menos utilização de mão-de-obra;
- Método muito mais seguro.

A figura 16 mostra a escavadora com o martelo hidráulico acoplado, a executar fragmentação secundária.



Figura 16 - Fragmentação secundária através do martelo hidráulico

3.4.3.1 Posição da máquina

Quando se efectua a fragmentação secundária com o martelo demolidor deve-se ter cuidado com a posição da máquina. Esta deve trabalhar sempre em posição frontal e nunca trabalhar com o equipamento na lateral. Quando posicionada lateralmente, impõe cargas de torção no eixo oposto ao que está a trabalhar, podendo provocar grandes danos à estrutura da máquina (<http://members.fortunecity.es>).

Na figura seguinte pode-se identificar os ângulos em que o martelo demolidor deve actuar para obter o máximo de rendimento.

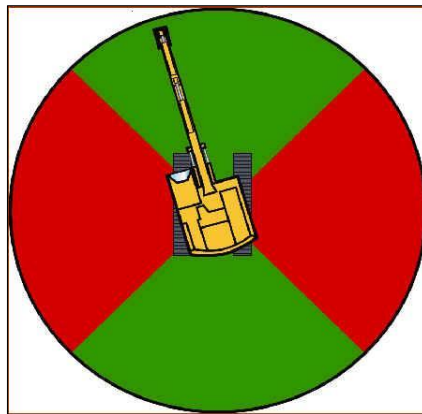


Figura 17 - Ângulos de posicionamento correcto (<http://members.fortunecity.es>)

O “braço” e o “antebraço” da máquina não devem estar totalmente esticados ou recolhidos, devem trabalhar numa posição intermédia.

3.4.3.2 Utilização correcta do martelo demolidor

O martelo demolidor foi concebido para partir blocos de grandes dimensões, devendo contudo ser seguida algumas regras práticas para que a operação seja eficiente e não ocorram desgastes e avarias prematuras. O martelo demolidor não deve ser utilizado para movimentar os blocos com a ponta do guilho.

A pressão utilizada sobre o bloco não deve ser muito excessiva e a ponta do guilho também não deve ficar muito tempo no mesmo sítio, caso contrário, irá produzir uma bolsa de pó que funcionará como amortecimento no impacto, reduzindo a eficiência e provocando assim aquecimento e conseqüente desgaste das peças. Para que este cenário não aconteça, a colocação da ponta do martelo no mesmo ponto não deve exceder 15 segundos. Caso não haja

fragmentação ao fim dos 15 segundos, a ponta do guilho deve ser colocada noutra ponto de impacto (<http://members.fortunecity.es>).

A ponta do martelo hidráulico deve ser colocada numa zona plana devendo fazer um ângulo de 90° com a rocha a fragmentar (figura 18). Ao fragmentar os blocos com outro ângulo que não seja de 90°, irá provocar certas tensões prejudiciais ao martelo demolidor que apesar de ser muito duro, é também muito frágil, sendo que qualquer pequeno esforço no sentido impróprio poderá levar à sua rotura (<http://members.fortunecity.es>).

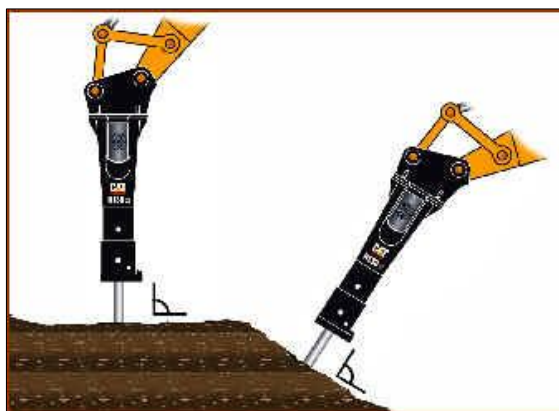


Figura 18 - Posicionamento correcto do martelo hidráulico (<http://members.fortunecity.es>)

A produção estimada depende bastante da habilidade do operador e das características da rocha a fragmentar, devendo oscilar entre os 40 e os 50 m³ por hora de trabalho.

3.4.4 Pá Carregadora

A pá carregadora possui uma grande importância no que diz respeito a trabalhos mineiros a céu aberto, por possuírem uma grande versatilidade, elevada mobilidade e por serem facilmente manobráveis (Pernia Llera, 1987). É através deste equipamento que se consegue retirar o material fragmentado da pilha e carrega-lo no *dumper*, que por sua vez fará o transporte, directamente para as tolvas. É um equipamento bastante versátil, uma vez que pode efectuar diversas operações, designadamente limpezas, a preparação de rampas e o deslocamento de blocos maiores para fragmentação secundária, etc.

São equipamentos com uma grande estabilidade e com boa tracção, contribuindo para isso o facto do motor se encontrar na sua traseira. A pá do equipamento está ligada a dois braços que funcionam hidraulicamente (Lopez Jimeno *et al.*, 1991).

3.4.4.1 Tipos de Pás Carregadoras

Em relação ao sistema de locomoção podemos distinguir as máquinas sobre lagartas e as máquinas sobre rodas (Lopez Jimeno *et al.*, 1991).

As máquinas sobre lagartas trabalham normalmente como auxiliares de limpeza. Possuem uma menor capacidade de carregamento, carregando até 4 m³.

As máquinas sobre rodas possuem maior capacidade de carga, podendo-se distinguir duas categorias. A 1ª categoria com capacidade de carga na ordem dos 4 e 8m³, carregam *dumpers* com capacidades entre as 35 e 50 toneladas. A 2ª categoria diz respeito a pás carregadoras com capacidade de carga superior a 8m³ e que podem chegar a 25m³, as quais estão preparadas para a carga de *dumpers* com capacidade superior a 50 toneladas (Lopez Jimeno *et al.*, 1991).

A tabela seguinte indica as diferentes categorias de pás carregadoras existentes no mercado.

Tabela 5 – Tipos de pás carregadoras (Adaptado: Lopez Jimeno, 1991)

Categoria	Capacidade (m³)	Dumpers (t)
Pequena	<4	<35
Média	4-8	35-50
Grande	>8	>85

3.4.4.1.1 Características Gerais

As pás carregadoras apresentam algumas vantagens e desvantagens (Lopez Jimeno *et al.*, 1991) entre elas:

- Alcançam velocidades de 45 km/h, podendo realizar o transporte rentável a curtas distâncias;
- A altura que a pá do equipamento atinge encontra-se entre 3 a 6 m;
- Permite trabalhar em pisos inclinados;
- A articulação central, faz com que possua uma grande manobrabilidade e raios de curvatura pequenos;
- Grande abertura do balde, permitindo deslocar grandes blocos;
- Permitem manter o piso limpo e regular;
- Custo de investimento relativamente baixo;
- Menor perigo de envelhecimento devido à sua menor vida útil;

- Não necessita de mão-de-obra muito especializada.

Existem no entanto alguns inconvenientes, tais como:

- Menor produtividade que as escavadoras, com iguais capacidades de balde;
- Precisam de maior espaço que as escavadoras para se manobram e executarem a carga;
- Menores rendimentos em pisos lamacentos;
- Problemas com os pneus perante o aparecimento de repés em rochas duras e abrasivas;
- Menor vida útil, levando a maiores custos de investimento;
- Menor disponibilidade mecânica que as escavadoras.

3.4.4.2 Carga

Esta operação define-se como sendo a transferência de qualquer tipo de material, feito normalmente por pás carregadoras, a partir do solo para um qualquer meio de transporte, que neste caso são *dumpers*. Segundo Lopez Jimeno (1991), para que haja rentabilidade neste processo, existe uma série de parâmetros aos quais se deve dar atenção.

- A força de penetração da pá carregadora;
- A força de arranque;
- A força de elevação da pá do equipamento;
- A distância de manobra;
- A capacidade do balde.

3.4.4.2.1 Força de Penetração

Força de penetração (figura 19), é um parâmetro que resulta da inércia e do esforço de tracção que a máquina possui. A energia cinética que leva a pá a abordar o material depende da velocidade de deslocamento. Esta é controlada pelo operador que deverá evitar que as rodas derrapem podendo provocar danos estruturais à máquina. A força de penetração depende muito das condições do terreno e pode variar segundo:

- A relação força/potência do motor do equipamento;
- O diâmetro dos pneus;
- O estado em que se encontra o terreno;
- O peso da máquina e a sua distribuição pelos eixos;
- As engrenagens da transmissão.



Figura 19 - Força de penetração

3.4.4.2.2 Força de arranque

A força de arranque é a força máxima e contínua em sentido vertical ascendente aplicado a 100 mm da ponta da pá, conseguida pela capacidade de elevar e recolher a pá a partir de um ponto específico.

3.4.4.2.3 Força de elevação

A força de elevação é aquela que se exerce para elevar o balde a uma altura específica. Esta depende da capacidade do sistema hidráulico e também do peso da própria máquina, uma vez que se esta for demasiado leve, poderá levantar a parte traseira da pá carregadora quando o balde carregado atingir uma determinada altura.

3.4.4.3 Método de carregamento

Existem certos procedimentos no método de carregamento que poderão aumentar bastante o rendimento da máquina, que é no fundo o que se deseja. A máquina deve penetrar o balde no material desmontado ao nível do solo, horizontal e com a engrenagem mais baixa, para aplicar mais força. Conforme se vai avançando pelo escombros deve-se recolher e elevar o balde à medida que este vai enchendo. Depois de cheio, retira-se a máquina e coloca-se em posição de depositar a carga. Enquanto se faz essa operação, de marcha atrás e marcha a frente, eleva-se os braços do balde para que se perca o menor tempo possível em tempos mortos. A trajectória da máquina deve descrever um “V” (figura 20). A distância percorrida deve ser a menor possível, levando a um maior rendimento.

O tempo necessário para realizar esta operação depende do tamanho do equipamento, do tipo de material a carregar, do estado do piso e da habilidade do operador.



Figura 20 - Trajecto teórico da máquina no carregamento

3.4.5 Transporte

O transporte é a actividade mais dinâmica no processo produtivo de uma exploração de uma pedreira, exigindo sempre um redimensionamento ao longo da respectiva vida, para se adequar ao constante crescimento da mesma (Ribeiro, 2008).

Nas explorações a céu aberto, o transporte do material pode ser feito por *dumpers*, por telas transportadoras ou, mais raramente, transporte sobre carris.

O transporte por *dumpers* tem como principais vantagens, a maior manobrabilidade e maiores rendimentos que os outros meios e se por algum motivo o *dumper* avariar, não implica a paralisação de toda exploração. No entanto, devido ao alto custo do transporte por *dumpers*, a sua utilização só se torna vantajosa para distâncias entre 1 a 5 km (Spínola, 1999).

A dependência das condições climáticas para certo tipo de *dumpers* e sistema de tracção e os elevados gastos na conservação e reparação constituem as principais desvantagens.

Com o objectivo de se obter uma maior rentabilidade, isto é, maior produção ao menor custo, devemos ter em conta os seguintes factores:

- Produção da instalação;
- Percurso a realizar desde a frente de desmonte à tolva de alimentação do britador primário;
- Características do percurso, nomeadamente quanto às inclinações, raios de curvatura e condições de manutenção da pista;
- Dimensão máxima (D_{max}) do produto a transportar;
- Ocupação das unidades de carga a 100%.

A figura 21 ilustra unidades de transporte.



Figura 21 - Transporte de material fragmentado

Como foi dito anteriormente, deve dedicar-se especial atenção ao crescimento da pedreira no intuito de a otimizar as actividades, calculando frequentemente o tempo de ciclo constituído por:

- Tempo de posicionamento na frente de desmonte;
- Tempo que demora a carregar;
- Tempo necessário para chegar ao local de descarga;
- Tempo de manobra;
- Tempo necessário para descarregar a carga;
- Tempo de percurso de regresso, vazio.

Um dos factores, e talvez o mais importante a ter em conta na optimização, é sem dúvida o estado das pistas. Para tal, deve-se reduzir o mais possível as inclinações das rampas, manter as pistas niveladas, utilizando motoniveladoras (figura 22) para melhorar a qualidade do piso e aplicar adequadamente as regas (Ribeiro, 2008).



Figura 22 - Utilização de motoniveladora (Ribeiro, 2008)

3.4.6 Fragmentação com britador primário

3.4.6.1 Objectivo

A fragmentação primária é uma das principais operações de tratamento de minérios. É a etapa que recebe o material proveniente do desmonte, fragmentando-o para que possa ser encaminhado para as operações seguintes.

Esta operação é realizada por fragmentadores, também designados de britadores, que exercem forças de compressão sobre as partículas a fragmentar vencendo assim as forças de coesão internas separando-as e produzindo material de menor calibre (Sampaio, 2006).

A operação de fragmentação tem como principais objectivos:

- Produzir lotes de material de utilização imediata;
- Reduzir o material desmontado para este seguir para outro tipo de equipamento;
- Produzir um produto final que seja facilmente transportável.

3.4.6.2 Etapas da fragmentação

Apresenta-se na figura 23 um esquema sobre as etapas da fragmentação e os campos de aplicação das máquinas. Este esquema não pode ser considerado de modo tão linear, uma vez que, na prática, os seus campos de aplicação se sobrepõem (Fernandes, 2006).

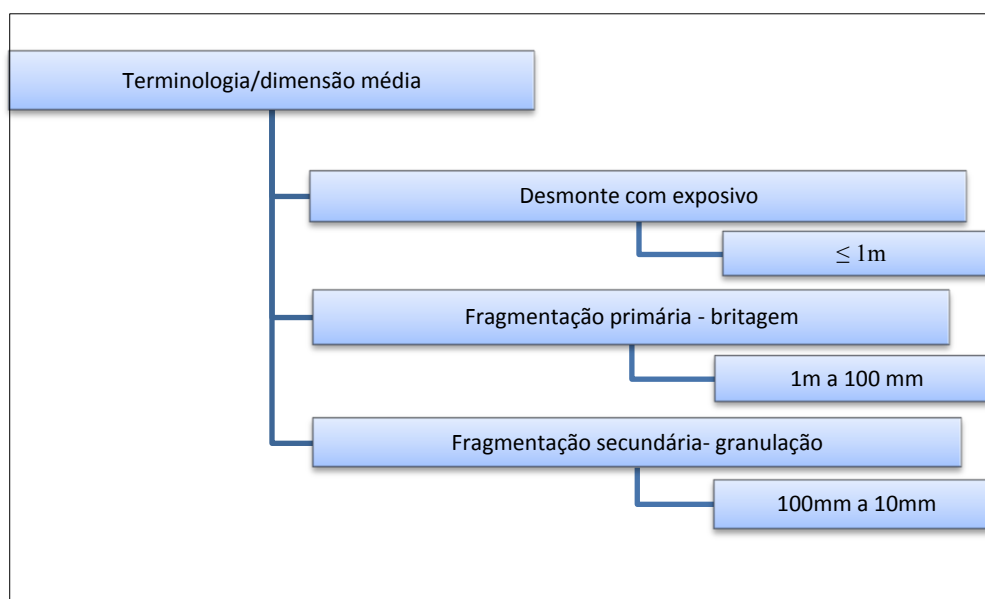


Figura 23 - Etapas da fragmentação (adaptado: Fernandes, 2006)

3.4.6.3 Fragmentação *versus* consumo de energia

A fragmentação é uma das operações que mais energia consome sendo por isso uma das operações com grandes custos no processo de tratamento. Por esta razão, os equipamentos de fragmentação deverão ser criteriosamente seleccionados (Fernandes, 2006).

O consumo de energia na fragmentação aumenta significativamente à medida que o tamanho das partículas vai diminuindo. Assim, apresentam-se de seguida os consumos médios de energia por tonelada de material fragmentado, nas diferentes operações de redução de calibre:

- Britagem \Rightarrow 1 a 3 kW/h por tonelada
- Granulação \Rightarrow 3 a 9 kW/h por tonelada
- Moagem \Rightarrow 10 a 30 kW/h por tonelada

3.4.6.4 Factores que influenciam a operação de fragmentação

3.4.6.4.1 Tempo de residência

O tempo de residência é entendido com, o tempo que uma porção de rocha permanece dentro de uma máquina de fragmentação, estando sujeita à acção das peças fragmentadoras. O tempo em cada fragmentador depende do seu mecanismo de transporte interno (Sampaio, 2006).

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

Tendo em conta o mecanismo interno de transporte, que pode ser ou não independente do caudal de alimentação, podemos referir a existência de dois tipos fundamentais de fragmentadores industriais (Sampaio, 2006). Assim, podemos distinguir:

- Fragmentadores graúdos – no qual o tempo de residência é completamente independente do caudal de alimentação;
- Fragmentadores finos – para os quais o tempo de residência depende do caudal de alimentação.

As características fundamentais e que levam às principais diferenças entre estes dois fragmentadores são:

- O trabalho de fragmentação produzido pelos fragmentadores graúdos depende da geometria e dimensão da máquina. Nos fragmentadores finos o grau de fragmentação é independente da geometria e dimensão do moinho;
- Nos fragmentadores graúdos, devido à dimensão das partículas, a fragmentação opera-se com pouca interação das partículas umas com as outras. Nos fragmentadores finos a fragmentação realiza-se, não só com o movimento de fragmentação do equipamento, como também pelo contacto entre as próprias partículas;
- Nos fragmentadores graúdos o caudal de passagem é independente do caudal de alimentação.

Podemos concluir que o tempo que uma partícula reside no interior de um fragmentador graúdo, com determinada regulação é praticamente constante. Este tempo de residência pode variar dentro de uma estreita gama de regulações possíveis, com as quais a capacidade máxima do aparelho também varia (Sampaio, 2006).

3.4.6.4.2 Relação de redução

Um equipamento de fragmentação, depois de determinada afinação realiza sempre o mesmo trabalho de fragmentação que normalmente se avalia pelo parâmetro relação de redução, que consiste na relação entre a composição granulométrica inicial (alimentação) e a final (Fernandes, 2006).

O parâmetro relação de redução é frequentemente expresso pela razão das malhas que retêm 85, 90 ou 95% de cada um desses lotes, ou pelos calibres médios de cada lote, uma vez que é praticamente impossível determinar um quociente entre as distribuições granulométricas. O parâmetro relação de redução que caracteriza e distingue cada fragmentador, pode ser sempre alterado sempre que se altera a variação da regulação ou a variação do calibre de entrada (Sampaio, 2006).

Apresentam-se na tabela 6 alguns dos valores das relações de redução em equipamentos de fragmentação típicos:

Tabela 6 - Relações de redução dos vários equipamentos (adaptado: Fernandes, 2006)

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

Como se pode verificar pelos valores apresentados, os fragmentadores graúdos são mais inflexíveis na variação dos valores das relações de redução. A eficiência do fragmentador graúdo irá diminuir, sempre que se tentar aumentar, para além dos valores admissíveis, os valores da relação de redução, pois vai dar origem, não só, a um aumento do consumo de energia por tonelada fragmentada como também ao aumento de produção de finos pela diminuição dos calibres intermédios (Sampaio, 2006).

3.4.7 Fragmentadores primários

A escolha do fragmentador primário é extremamente importante pois estes equipamentos para além de terem um custo elevado de aquisição, são eles que vão influenciar as seguintes fases de operação de tratamento.

São os primeiros equipamentos a receber o material proveniente do rebentamento do maciço rochoso, deve-se portanto assegurar uma boa fragmentação do material para que ele possa entrar na boca do fragmentador primário e ser fragmentado sem que haja encravamentos, que iriam resultar em perdas de tempo, e por conseguinte, aumento de custo. Deve ser então encontrada a melhor solução técnica e económica, no desmonte, para que se obtenham calibres adequados à admissão no primário.

No entanto, nem tudo sai como se espera devido à variável incontroável que é a geologia, e por isso, mesmo em instalações bem dimensionadas encontram-se por vezes partículas de dimensão superior, que passam despercebidos, normalmente, ao operador da pá carregadora mas que não passam na boca do fragmentador. Estas partículas vão danificar o equipamento e dar origem a encravamentos que resultam na perda de tempo e consequente aumento de custo de produção. Para desencravar a rocha é utilizado, pelo operador do primário, um martelo demolidor. O

operador executa um controlo do material de forma visual (figura 24), parando a instalação e procedendo à fragmentação ou remoção do bloco.



Figura 24 - Controle da alimentação de um fragmentador primário (Sampaio, 2006)

3.4.7.1 Características gerais dos fragmentadores primários

Antes de escolhermos o equipamento para a instalação de britagem, devemos ter em atenção as características da própria instalação e também as características da rocha a ser tratada. Assim, relativamente à instalação de britagem deve-se ter em conta a capacidade desejada, o calibre máximo a admitir, a relação de redução que se pretende e o tipo de material a fragmentar (Sampaio, 2006).

Em relação à rocha a ser tratada, devemos ter em atenção as seguintes características:

- Resistência à fragmentação;
- Forma dos produtos a tratar;
- Grau de compacidade / friabilidade;
- Abrasividade;
- Grau de humidade e plasticidade.

No que diz respeito ao próprio equipamento de fragmentação, também este deve possuir uma série de características fundamentais, tais como:

- Ser robusto e ter elevada segurança de marcha;
- Baixo consumo de energia;
- Ser fácil de manejar;
- Baixo consumo de peças de desgaste.

Para determinar as eficiências em termos energéticos e as granulometrias dos produtos obtidos, devem ser realizados ensaios experimentais com o tipo de rocha a tratar em diferentes tipos de equipamentos.

Os objectivos da fragmentação primária, através de acções de choque, esmagamento, atrito, impacto e corte, é fazer com que os fragmentos de rocha provenientes do desmonte fiquem com as dimensões que permitam a respectiva entrada nos granuladores, tornando-os mais facilmente transportáveis ou até mesmo para serem utilizados imediatamente (Sampaio, 2006).

Nas figuras 25 e 26 podemos ver as diferenças granulométricas do material à entrada e saída do fragmentador primário, respectivamente.

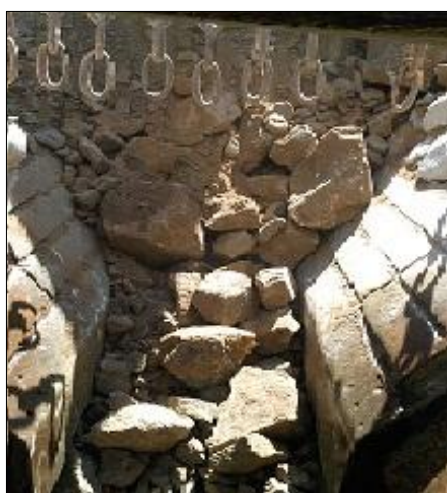


Figura 25 - Aspecto da alimentação de um primário



Figura 26 - Aspecto dos produtos saídos de um primário

3.4.7.2 Tipos de fragmentadores primários

Na figura 27, apresentam-se os vários tipos de fragmentadores primários

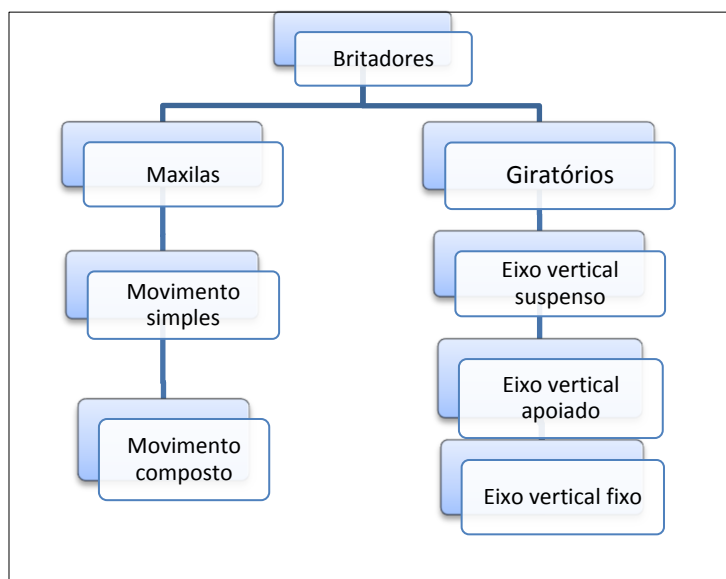


Figura 27 - Tipos de fragmentadores primários (adaptado: Fernandes, 2006)

3.4.7.2.1 Britador de maxilas

A tabela 7 indica os tipos de britadores de maxilas e suas características:

Tabela 7 – Tipos e características de britadores de maxilas (adaptado: Fernandes, 2006)

Equipamento	Tipo	Dureza	Abrasividade	Humidade	Plasticidade	Relação de redução
Maxilas	Movimento simples	Dura a meio dura	Abrasiva	Seca ou pouco húmida	Pouco colante	4/1 a 6/1
	Movimento composto		Pouco abrasiva			
	<i>Dodge</i>	Frágil	Não abrasiva	Seca	Não colante	

3.4.7.2.2 Britador tipo *Blake*

O britador de maxilas tipo *Blake* (figura 28) é um equipamento em aço provido por uma maxila fixa e outra móvel, com forras de substituição e duas cunhas de aperto. A fragmentação da rocha é efectuada através do movimento alternativo, ascendente e descendente, que a maxila móvel faz em direcção à maxila fixa, movimento esse que se realiza através de um motor que integra o equipamento. O britador actua intermitentemente consumindo energia útil apenas durante meia

volta, daí a existência do pesado volante regularizador da energia ao longo da rotação completa. O sistema de regulação da abertura das maxilas é constituído por cunhas e tirantes (Sampaio, 2006).

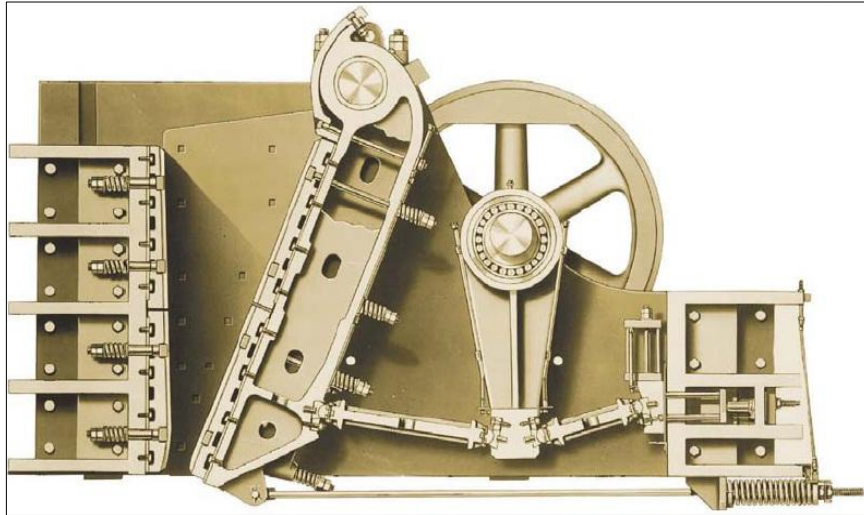


Figura 28 - Britador de maxilas tipo *Blake* (www.metsominerals.com)

3.4.7.2.2.1 Vantagens e Desvantagens

O britador de maxilas tipo Blake possui as seguintes vantagens:

- Grande capacidade;
- Mecânica simples, facilitando a operação;
- Baixo custo de manutenção, devido à sua mecânica simplificada que tem como consequência um menor desgaste das maxilas e rolamentos;
- Baixo consumo de energia.

Como desvantagem, temos apenas a referir a baixa uniformidade do material que sai do britador.

3.4.7.2.3 Britador de maxilas sem biela tipo *Bulldog*

Este britador surgiu depois do britador tipo *Blake* com uma constituição mais simples. Possui apenas um prato e o veio excêntrico de accionamento funciona também como eixo de suporte da maxila móvel, funcionando como biela, como mostra a figura 29.

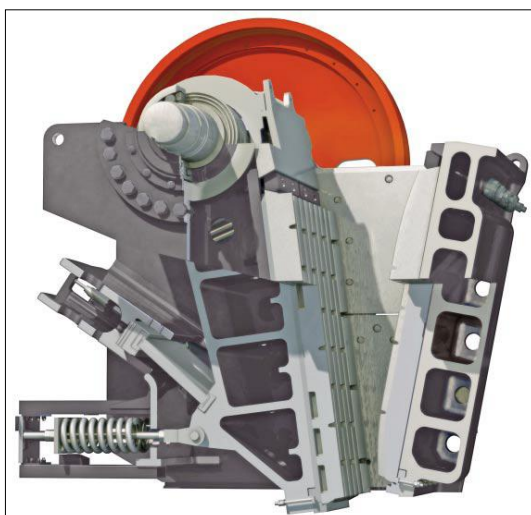


Figura 29 - Britador de maxilas sem biela tipo *Bulldog* (www.sandvik.com)

O que realmente distingue um britador do outro é o seu modo de funcionamento, uma vez que, no britador tipo *Bulldog*, a maxila móvel descreve arcos de elipse devido ao movimento do veio excêntrico no britador, fazendo com que tenha uma componente de arrastamento, associada ao movimento pendular característico, provocando a descarga dos produtos residentes na câmara de fragmentação (Sampaio, 2006).

3.4.7.2.3.1 Vantagens e Desvantagens

O britador tipo *Bulldog* apresenta as seguintes vantagens:

- Equipamento com grande amplitude de movimento, especialmente na zona de descarga;
- Permite tratar substâncias argilosas;
- Com as mesmas dimensões de maxilas, este equipamento tem maior capacidade de produção devido ao maior movimento na abertura de descarga;
- Mecanismo mais reduzido o que faz de si uma máquina mais barata.

Em relação às desvantagens podemos referir:

- Apresenta maior desgaste nas forras das maxilas e dos excêntricos por existir fragmentação por atrito;
- Como os volantes se situam imediatamente à direita e à esquerda da abertura de carga, torna-se difícil o acesso e vigilância;
- Marcham apenas num sentido;
- Elevado consumo de energia.

3.4.7.2.4 Britador tipo *Dodge*

O britador tipo *Dodge* apareceu no mercado para combater o problema da produção de grandes heterogeneidades granulométricas provocada pelos britadores anteriormente descritos. Para contrariar essa heterogeneidade, surgiu este britador com maior movimento na entrada e menor amplitude de movimento na goela (Sampaio, 2006).

A figura 30 representa um britador tipo *Dodge*.

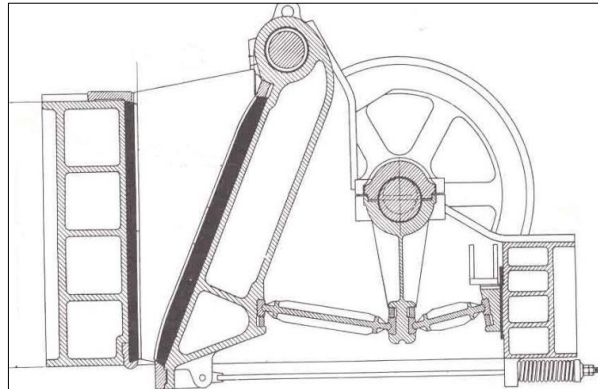


Figura 30 - Britador de maxilas tipo *Dodge* (www.google.com/imgres)

No entanto, este britador tornou-se um fracasso devido à menor amplitude da goela, a qual fez com que o tempo de residência do material aumentasse bastante, provocando engasgamentos e provocando o aumento de produção de finos (Sampaio, 2006).

3.4.7.2.4.1 Desvantagens

- Equipamento de grande complexidade;
- Elevado consumo de energia;
- Facilmente encraváveis;
- Produzem uma significativa quantidade de finos;
- Acumulação de material na câmara de alimentação;
- Grandes desgastes das máquinas.

3.4.7.2.5 Britadores giratórios

Este equipamento é constituído por um eixo principal em forma de cone, revestido por uma liga de protecção. Esse eixo em forma de cone move-se de forma excêntrica dentro de um outro cone maior mas invertido criando assim uma câmara por onde irá circular o material.

A tabela 8 indica os tipos de britadores giratórios e suas características:

Tabela 8 - Tipos e características de britadores giratórios (adaptado: Fernandes, 2006)

Equipamento	Tipo	Dureza	Abrasividade	Humidade	Plasticidade	Relação de redução
Giratórios	Suspenso	Dura a meio dura	Abrasiva	Seca	Não colante	6/1 a 8/1
	Apoiado	Meio dura a Frágil	Não abrasiva			
	Fixo					

O britador giratório, representado na figura 31, realiza o mesmo processo de trabalho de fragmentação que o britador de maxilas. Difere apenas no volume da câmara de fragmentação, sendo maior no britador giratório do que no britador de maxilas (Sampaio, 2006).

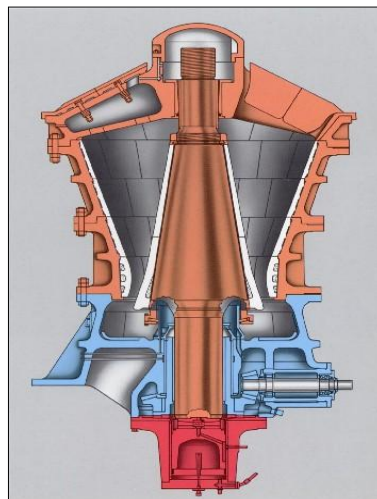


Figura 31 - Britador giratório (Sampaio, 2006)

O ângulo formado por esses dois cones vai diminuindo e por causa do movimento excêntrico criado pelo eixo principal, vai haver aproximações e afastamentos, realizando assim a fragmentação do material.

Podemos classificar os fragmentadores giratórios segundo o movimento do eixo portador do cone, podendo ser:

- De eixo suspenso – São os mais usados na indústria, realizando o movimento de maior amplitude na parte inferior, junto da descarga;
- De eixo apoiado – com movimento de maior amplitude na zona superior;

- De eixo fixo – com amplitude de movimento igual ao longo do eixo. São mais delicados e por isso mais sujeitos a avarias.

3.4.7.2.5.1 Vantagens e Desvantagens

O Britador giratório apresenta as seguintes vantagens:

- São equipamentos com uma elevada capacidade produtiva;
- Executam marcha mais suave e equilibrada;
- Provocam menos vibrações e ruído;
- A alimentação pode ser feita em qualquer direcção.

Como desvantagens, pode-se destacar o facto de apresentarem um elevado custo e por serem dificilmente ajustáveis.

4. Caso de Estudio

4. Caso de estudo

Neste capítulo é abordado todo o estudo prático realizado na pedreira de Cervães, iniciando-se com a recolha de dados da situação operacional na pedreira antes de se ter iniciado o estudo propriamente dito. Analisaram-se as principais diferenças entre os rebentamentos, incluindo a análise das curvas granulométricas fornecidas pelo *software Wipfrag*, o que permitiu conhecer a percentagem de fragmentos com dimensão abaixo e acima de 800 milímetros e também a percentagem de material abaixo de 250 milímetros, já que é extremamente vantajoso, nos dias de hoje, saber a quantidade de finos produzidos e conseguir removê-los da fase de fragmentação primária, minimizando assim o excesso de britagem e melhorando a sua eficiência energética. Será ainda abordada a produtividade dos vários equipamentos já antes mencionados pela seguinte ordem: pá carregadora, onde se destacam os tempos de ciclo nos diferentes rebentamentos; o martelo demolidor, calculando o seu rendimento horário e o número de horas utilizadas em cada tipo de rebentamento; o fragmentador primário, onde se apresenta os tempos de trabalho, os tempos em que o equipamento esteve parado e os tempos de encravamento. Calculou-se ainda a energia consumida através do método de *Bond*.

4.3 Situação de referência da pedreira de Cervães

Uma das primeiras acções realizadas na pedreira de Cervães foi analisar a situação existente no que diz respeito às cargas específicas utilizadas nos rebentamentos, às relações de distância à frente e espaçamento, aos diâmetros de perfuração e às alturas de bancada dos meses de Janeiro, de Fevereiro, de Março, de Abril, de Maio e de Junho de 2009, para que assim fosse possível alterar alguns parâmetros e obter outros tipos de resultados em relação à fragmentação resultante do desmonte do maciço rochoso com explosivos.

Realizada a análise aos planos de desmonte, concluiu-se que as cargas específicas usadas variavam entre 0,44 e 0,47 kg/m³, a relação de distância à frente e espaçamento era de 2,5×3 metros, o diâmetro de perfuração utilizado era de 76 milímetros e a altura de bancada variava entre os 14 e os 12 metros nos diferentes patamares de trabalho.

Conhecendo-se a complexidade da análise dos resultados do rebentamento com explosivos quando se variam diferentes parâmetros do mesmo, foi decidido que neste estudo apenas seria alterado os parâmetros da distância à frente e do espaçamento, o que indirectamente também faria aumentar a carga específica se utilizada a mesma composição de carga nos furos.

4.4 Rebentamentos com explosivos

Recorda-se que o objectivo do estudo é avaliar a influência da fragmentação no custo de produção de agregados graníticos por trituração e selecção. Para se obter diferentes curvas de fragmentação, houve a necessidade de alterar dois dos parâmetros do rebentamento (a perfuração e carga específica) para posteriormente comparar os vários resultados. Assim, foram considerados seis rebentamentos (tabela 9).

Tabela 9 - Dados relativos aos rebentamentos estudados

Rebentamento	Data de realização	Bancada	Relação V × E (m)	Carga específica (kg/m ³)	Volume da pega <i>in situ</i> (m ³)
1.º	20-03-2009	5	2,5 × 3,0	0,460	7.371
2.º	28-05-2009	1	2,5 × 3,0	0,470	9.180
3.º	24-06-2009	4	2,0 × 3,0	0,579	3.972
4.º	19-08-2009	1	2,5 × 3,0	0,446	8.624
5.º	09-09-2009	5	2,0 × 2,5	0,695	3.201
6.º	19-03-2010	3	2,0 × 3,0	0,520	8.154

4.4.1 Primeiro rebentamento

O primeiro rebentamento, ilustrado na figura 32, realizado para o estudo foi efectuado em Março, na bancada 5, em granito são. O volume do rebentamento era de 7.371 m³, com uma relação distância à frente - espaçamento de 2,5×3,0 m e com uma carga específica de 0,46 kg/m³. Deste rebentamento resultou um material homogéneo, bem fragmentado, com blocos não muito grandes e pouca quantidade de finos, não se verificando projecções significativas.



Figura 32 - Imagem resultante do primeiro rebentamento

Apresenta-se na figura 33 a curva granulométrica, e respectivo histograma, resultante do primeiro rebentamento:

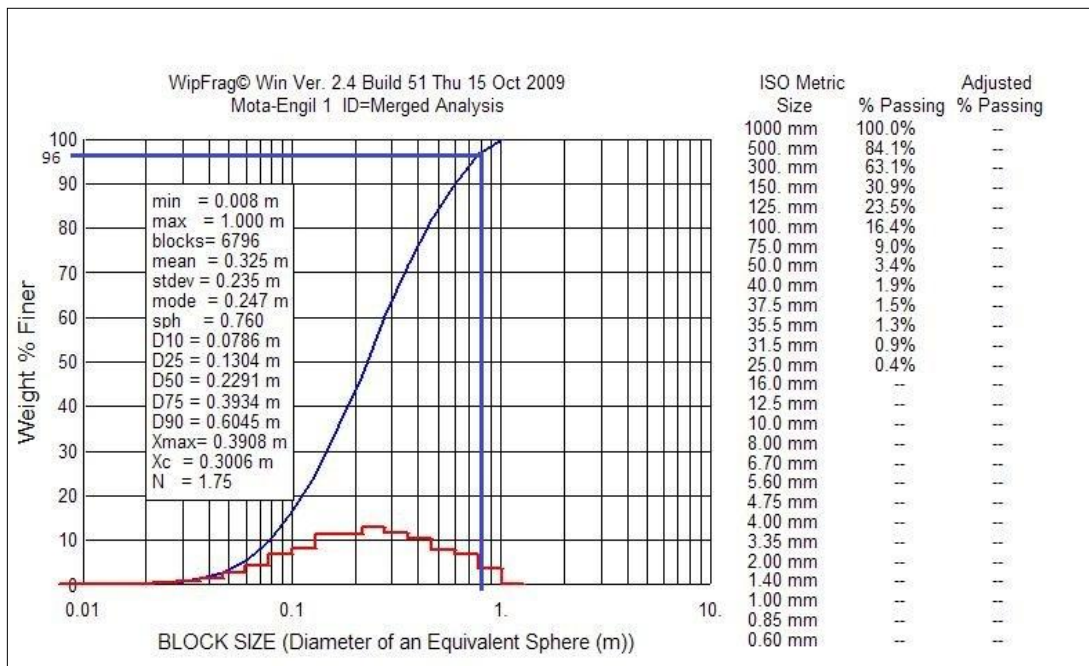


Figura 33 - Curva granulométrica do primeiro rebentamento

A análise da curva granulométrica corresponde ao material obtido no primeiro rebentamento, permite constatar que a quantidade de material para fragmentação secundária é pequena, uma vez que só 4% do material se encontra acima da dimensão máxima considerada admissível pelo fragmentador primário, seguindo 96% directamente para o fragmentador primário. Em relação à percentagem de material menor que 250 milímetros, percentagem de material que não necessitaria de passar pelo fragmentador primário, é de 55,5%.

Em relação ao histograma produzido pelo *Wipfrag*, pode-se observar um resultado homogêneo do material desmontado, com o seu pico situado entre 0,2 e 0,3 metros de diâmetro, realçando o valor estatístico da moda, isto é, o valor que surge com mais frequência, que é de 247 milímetros. É um valor baixo em relação à dimensão das partículas e apresenta um significado ainda maior quando comparado com a dimensão das partículas resultantes da fragmentação do britador primário.

4.4.2 Segundo rebentamento

O segundo rebentamento (figura 34) foi realizado em Maio, na bancada 1, em granito alterado. Obteve-se um volume de material desmontado de 9.180 m³, com uma relação distância à frente -

espaçamento de 2,5×3,0 m e com uma carga específica de 0,47 kg/m³. Não existiram variações significativas em relação ao primeiro rebentamento, com excepção do grau de alteração do granito desmontado. O resultado final do rebentamento foi um material homogéneo, apesar de estarmos perante um material alterado.



Figura 34 - Granulometria do material obtido no segundo rebentamento

Apresenta-se na figura seguinte a curva granulométrica e histograma, referentes ao segundo rebentamento:

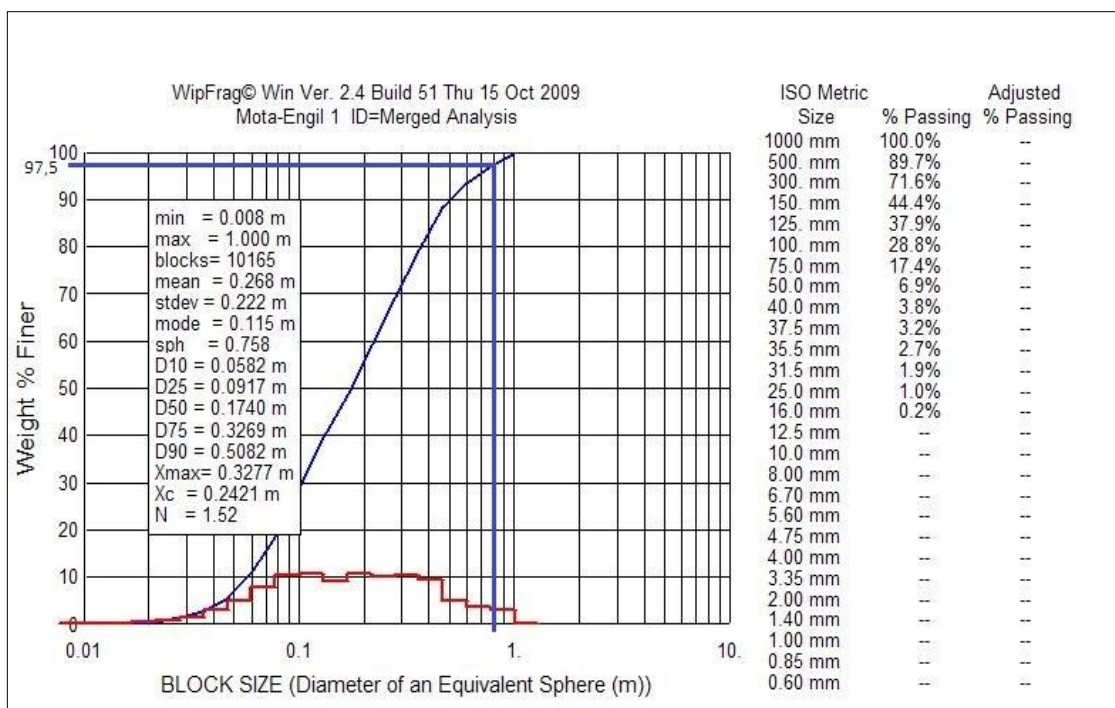


Figura 35 - Curva granulométrica do segundo rebentamento

Dos resultados do segundo rebentamento pode constatar-se que a quantidade de material para fragmentação secundária é ainda menor que no rebentamento nº 1, com apenas 2,5% do

material para fragmentação secundária, seguindo os restantes 97,5% directamente para o fragmentador primário. A percentagem de material menor que 250 milímetros é de 64,5%, maior que a quantidade de material obtido no primeiro rebentamento.

Em relação ao histograma do segundo rebentamento, pode-se verificar um material resultante muito homogéneo, não se destacando nenhum pico. A quantidade de blocos grandes é muito pequena, a dimensão do maior bloco não passa de 1 metro. No entanto, a quantidade de finos é um pouco elevada. Constata-se, ainda, que o maior número de partículas resultante do rebentamento apresenta cerca de metade da dimensão das partículas resultantes do rebentamento anterior, sendo 115 milímetros o valor da moda.

4.4.3 Terceiro rebentamento

O terceiro rebentamento (figura 36) foi realizado em Junho, na bancada 4. O seu volume era de 3.972,12 m³, com uma relação distância à frente - espaçamento de 2,0×3,0 m e uma carga específica de 0,58 kg/m³. Neste rebentamento já houve uma alteração da área desmontada por furo, diminuindo, o que originou o aumento da carga específica, já que a constituição da carga por furo se manteve constante. Após o rebentamento, resultou um material mais ou menos homogéneo, com alguns blocos de maior dimensão, podendo ser a área específica da pedreira e das condições geológicas particulares a principal causa desse facto. Não se verificaram projecções significativas.



Figura 36 - Resultado do terceiro rebentamento

Apresenta-se na figura 37 a curva granulométrica e histograma, referentes ao terceiro rebentamento:

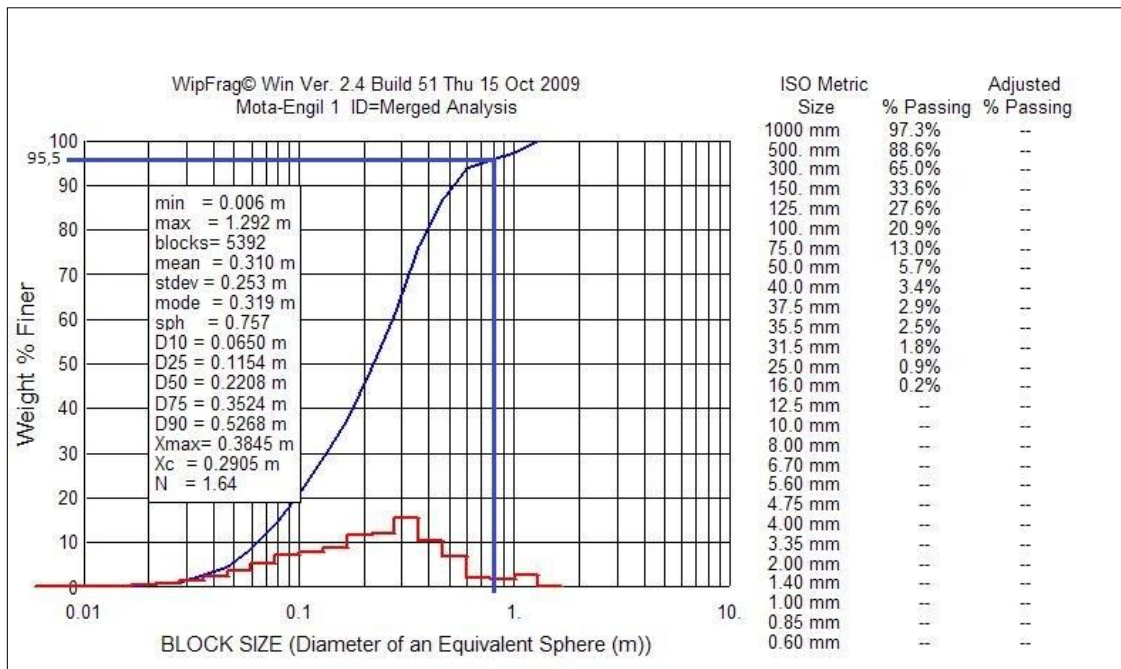


Figura 37 - Curva granulométrica do terceiro rebentamento

Tal como no primeiro rebentamento, obteve-se praticamente a mesma percentagem de material abaixo e acima de 800mm. Assim, 4,5% do material teve que ser fragmentado pelo martelo demolidor, ao passo que 95,5% do material seguiu para o fragmentador primário. Em relação à percentagem de material menor que 250 milímetros, houve um ligeiro aumento quando comparado com o primeiro rebentamento, situando-se em 56,5%. É um valor relativamente baixo se compararmos a carga específica utilizada em ambos os rebentamentos. Seria de esperar que com uma maior carga específica e maior número de furos e superfícies de contacto entre a rocha e o explosivo, aumentasse o número de fragmentos menores.

Da observação do histograma obtido neste rebentamento, verifica-se que a quantidade de material com dimensão menor que 800mm é semelhante à do primeiro rebentamento, mas a quantidade de material acima de 1 m de diâmetro aumenta bastante, sendo a dimensão do maior bloco de 1,292 metros. Verifica-se um pico de material com diâmetro entre 0,3 e 0,4 metros, sendo que 310 mm é a dimensão dos blocos que surgem com mais frequência, valor bem acima de 250 milímetros.

4.4.4 Quarto rebentamento

O quarto rebentamento (figura 38) foi realizado em Agosto, na bancada 1 em granito alterado. O volume do rebentamento era de 8.623,65 m³, com uma relação distância à frente - espaçamento de 2,5x3,0 m e com uma carga específica de 0,45 kg/m³. É um rebentamento idêntico ao segundo

no que diz respeito à área de desmorte por furo e também por ter sido realizada na bancada 1, mas ao contrário do segundo rebentamento, deste resultou um material muito heterogéneo, com blocos de grandes dimensões e ao mesmo tempo uma quantidade significativa de material fino. O facto de estarmos perante uma frente de desmorte muito facturada pode ser a explicação para se ter obtido este resultado final de fragmentação, já que as fissuras abertas perturbam o regular funcionamento do explosivo, permitindo o escape rápido da pressão do gás da detonação e libertando os blocos maioritariamente pelas fissuras naturais.



Figura 38 - Granulometria resultante do quarto rebentamento

Apresenta-se na figura seguinte a curva granulométrica e histograma, referentes ao quarto rebentamento:

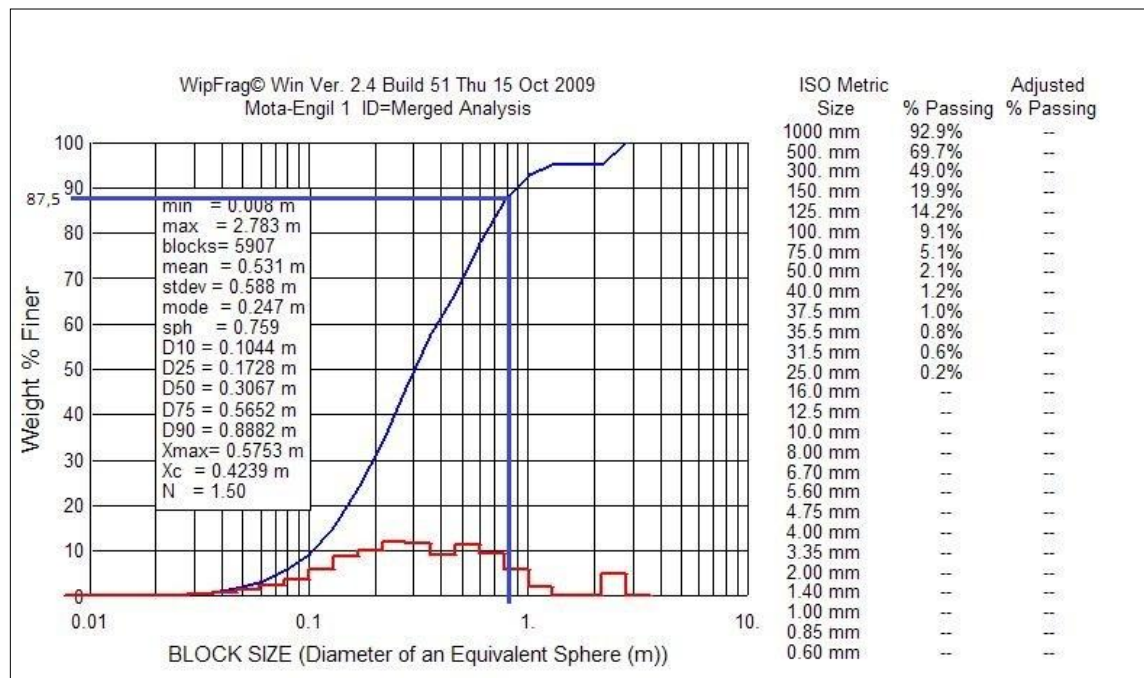


Figura 39 - Curva granulométrica do quarto rebentamento

No quarto rebentamento podemos verificar que a quantidade de material para fragmentação secundária é grande comparativamente ao resultado dos rebentamentos anteriores, uma vez que 12,5% do material vão ser processados com fragmentação secundária, seguindo 87,5% directamente para o fragmentador primário. Comparando também a percentagem de material menor que 250 milímetros, verifica-se que houve uma grande diminuição, pois apenas 40% não necessita de ser fragmentado pelo britador primário.

Quando se observa o histograma que resulta deste quarto rebentamento, verifica-se a heterogeneidade do material desmontado. O resultado final foi uma grande quantidade de material grosso, destacando-se um ligeiro pico de material com diâmetros entre 2 e 3 metros, sendo 2,783 metros a dimensão do maior diâmetro obtido e uma quantidade muito pequena de material fino. O diâmetro do material mais representativo é de 247 milímetros, valor bem mais baixo que o rebentamento anterior.

4.4.5 Quinto rebentamento

O quinto rebentamento (figura 40) foi efectuado em Setembro, na bancada 5, com granito são. Obteve-se um volume de material desmontado de 3.201,2 m³, com uma relação distância à frente - espaçamento de 2,0x2,5 m e com uma carga específica de 0,70 kg/m³. Neste rebentamento, tal como no terceiro, houve uma alteração da área desmontada por furo, diminuindo ainda mais relativamente aos rebentamentos já efectuados, aumentando por isso a carga específica e a perfuração específica. Deste rebentamento resultou um material com uma granulometria pequena, podendo haver dois factores para tais resultados. O primeiro tem a ver com a área desmontada por furo ser mais apertada, aumentando a carga específica. A outra razão poderá estar ligada ao facto do rebentamento ter sido projectado para uma bancada inferior originando mais colisões entre as partículas.



Figura 40 - Imagem resultante do quinto rebentamento

Apresenta-se na figura 41 a curva granulométrica e respectivo histograma resultante do quinto rebentamento:

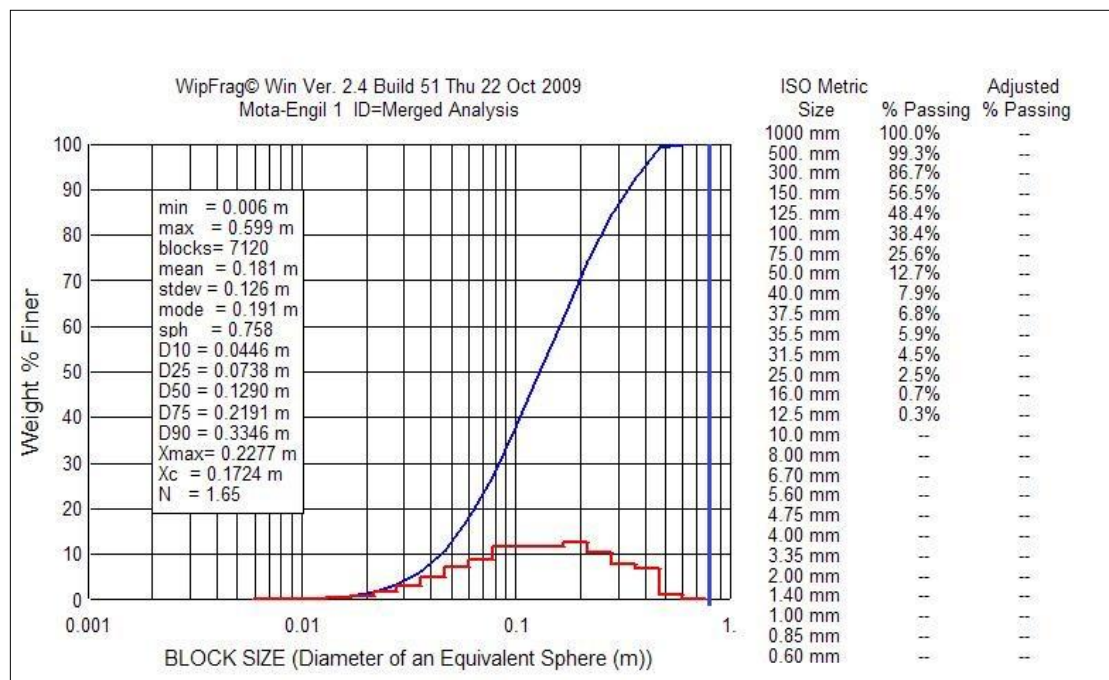


Figura 41 - Curva granulométrica do quinto rebentamento

Em relação aos anteriores rebentamentos, a curva granulométrica não apresenta qualquer percentagem de blocos acima de 800 mm, material que seria destacado para a fragmentação secundária. Sendo assim 100% do material rebentado seguirá para o fragmentador primário. Em relação à percentagem de material de dimensão inferior a 250 mm, este rebentamento obteve o valor mais alto com 80% do material a não necessitar de ser fragmentado pelo britador primário. Presumimos que a elevada carga específica utilizada, terá contribuído para a obtenção desse valor tão elevado.

O histograma que resulta do rebentamento, só reforça as conclusões retiradas da observação da curva granulométrica, verificando-se que de um modo geral o material desmontado é muito pequeno. Os blocos de maior dimensão possuem apenas 0,6 metros e encontram-se numa % muito baixa. Apresenta uma distribuição mais significativa entre 0,08 e 0,2 metros de diâmetro, sendo que o valor da dimensão das partículas mais representadas é de 191 milímetros, valor ligeiramente superior quando comparado com o segundo rebentamento.

4.4.6 Sexto rebentamento

O sexto rebentamento estudado (figura 42) foi realizado em Março de 2010 na bancada 3. O volume do material desmontado era de 8.153,76 m³, com uma relação distância à frente - espaçamento de 2,0×3,0 m, tal como a realizada no terceiro rebentamento e com uma carga específica de 0,52 kg/m³. O resultado final deste rebentamento foi um material bastante homogêneo com poucos blocos de grandes dimensões.



Figura 42 - Imagem resultante do sexto rebentamento

Apresenta-se na figura 43 a curva granulométrica e histograma, referentes ao sexto rebentamento:

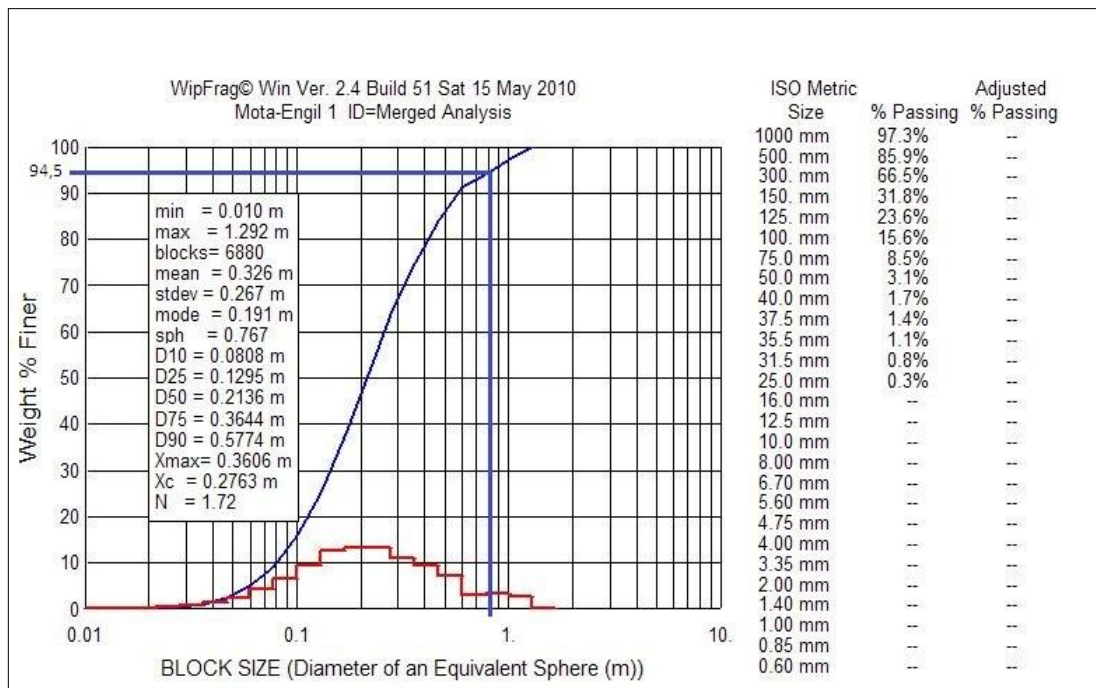


Figura 43 - Curva granulométrica do sexto rebentamento

A análise da curva granulométrica do sexto rebentamento permite constatar que a quantidade de material para fragmentação secundária corresponde apenas a 4,5% do volume total do rebentamento, sendo que os restantes 95,5% vão directamente para o fragmentador primário. Estes dados são curiosos, uma vez que são iguais aos resultados obtidos do terceiro rebentamento, sendo ainda mais curioso o facto de ambos os rebentamentos serem realizados com a mesma área desmontada por furo. No entanto, a percentagem de material abaixo de 250 milímetros, é ligeiramente superior com 58%, embora se tenha utilizado uma carga específica ligeiramente inferior. A geologia do local onde foi realizado o desmonte, pode ser o principal motivo para estas diferenças de resultado.

Ao observar-se o histograma do sexto rebentamento, verifica-se alguma semelhança com o histograma do primeiro rebentamento. Este rebentamento teve um resultado final homogéneo, tal como o primeiro, apresentando uma distribuição mais significativa entre os 0,15 e 0,4 metros de diâmetro, estando o diâmetro das partículas mais representativas situado nos 191 milímetros, e a dimensão do maior bloco foi de 1,292 metros.

4.5 Operação de carga

O estudo sobre a operação de carga iniciou-se com a recolha de dados relativos aos rebentamentos anteriores ao período de estudo como forma de obtermos elementos comparativos, relativos ao volume total por rebentamento e ao número de horas que foram necessárias para carregar esse volume. Calculou-se ainda o rendimento horário e a quantidade de *dumpers* carregados. O peso médio transportado por cada unidade é de 22 toneladas. Foram ainda calculados os custos fixos e variáveis associados à utilização da pá carregadora.

Para o período em estudo foram determinados os tempos de ciclo da pá carregadora obtidos na movimentação do material desmontado em cada rebentamento.

Na tabela 10 apresentam-se os valores relativos aos tempos de ciclo da pá carregadora em segundos. Os valores apresentados dizem respeito ao mesmo número de *dumpers* carregados para assim se poder comparar os tempos de ciclo da pá carregadora com o mesmo volume removido e transportado, ou seja, 154 toneladas. Decidiu-se comparar assim os valores para se obter resultados mais fiáveis, já que se comparássemos os valores com o tempo e não com o número de *dumpers*, poderíamos ter valores enganadores, uma vez que o tempo de manobra da pá carregadora é diferente para cada rebentamento, devido às condicionantes de irregularidade do piso em cada local e do espaço disponível para uma manobra fácil. Na tabela 10 podem verificar-se os valores obtidos, sendo de realçar o impacto que o tempo de manobra pode ter no

rendimento da operação, ainda que com rebentamentos bem fragmentados como por exemplo nos rebentamentos 5 e 6.

Tabela 10 – Tempos de ciclo da pá carregadora

Rebentamento	1.º	3.º	4.º	5.º	6.º
Manobra (s)	391	396	567	337	406
Descarga (s)	118	117	114	96	87
Carregamento (s)	232	366	336	211	244

Considera-se a operação de manobra como todo o tempo necessário para a pá carregadora executar o posicionamento na frente de trabalho desde que termina a descarga no *dumper*, mais o tempo de movimentação entre a frente depois da carga do balde até que executa a descarga.

A operação de descarga consiste em colocar o material que o balde da pá carregadora contém na caixa do *dumper*. O tempo foi cronometrado desde que o balde atingiu a altura do *dumper* para descarregar, até que inicia a sua retirada. O tempo de carregamento considera-se aquele que a pá carregadora necessita para encher o respectivo balde.

É curioso verificar a relação entre os tempos de descarga nos rebentamentos 5 e 6 quando comparados com os restantes. Naqueles, os tempos de descarga foram inferiores, admitindo-se que para tal tenha contribuído a elevada % de materiais finos resultantes do rebentamento, que motivam o operador a uma descarga mais rápida, por não necessitar de proteger a caixa do *dumper* do impacto dos grandes blocos.

Podem-se ver os valores do tempo de ciclo representados graficamente na figura 44.

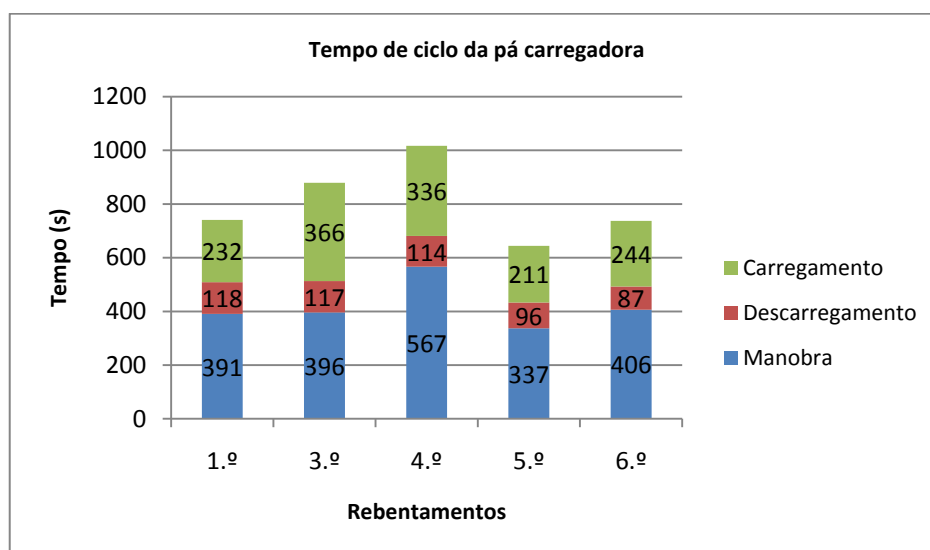


Figura 44 - Tempos de ciclo da pá carregadora nos diferentes rebentamentos

O quarto rebentamento foi realizado na bancada 1 e estava previsto ser carregado apenas com a retroescavadora, uma vez que não havia muito espaço de manobra para o operador da pá carregadora executar o trabalho convenientemente. No entanto, foi encontrada a solução de carregar o número mínimo de *dumpers* que não afectassem o resto da produção de agregados, isto é, que não obrigasse o fragmentador primário a estar demasiado tempo à espera de material.

Pelos mesmos motivos foi impossível retirar os tempos de ciclo da pá carregadora referentes ao segundo rebentamento, pois este foi todo carregado por uma retroescavadora.

Segundo a representação gráfica dos tempos de ciclo da pá carregadora, verifica-se que o quarto rebentamento é o que apresenta valores mais altos, sendo o tempo de manobra a razão principal para tal registo. Recorde-se que este rebentamento foi realizado na bancada 1 onde o espaço para manobrar a pá carregadora é muito reduzido, havendo necessidade de executar várias manobras de posicionamento e foi o que apresentou maior percentagem de blocos de dimensão superior a 800 mm, o que terá contribuído para o aumento do tempo de descarga. Por sua vez, o quinto rebentamento é o que apresenta os valores mais baixos para os tempos de carga, descarga e manobra, atribuindo-se este facto ao bom estado do piso no local da carga a à granulometria do material desmontado. Recorde-se que este rebentamento não produziu blocos superiores a 800 mm e cerca de 80% de dimensão inferior a 250 mm.

Retirando o quarto rebentamento, pelas razões anteriormente mencionadas, pode-se realizar uma comparação entre os tempos de ciclo da pá carregadora e as cargas específicas utilizadas nos diferentes rebentamentos. Verifica-se que com excepção do rebentamento nº 6, existe uma relação directa entre a fragmentação e o tempo de ciclo, sendo certo que no rebentamento nº 6 o tempo de manobra foi relativamente elevado.

Tabela 11 – Comparação entre o tempo de ciclo da pá carregadora e a carga específica.

Rebentamento	Tempo de ciclo (s)	Carga específica (kg/m ³)
1.º	741	0,460
3.º	879	0,579
4.º	1.017	0,446
5.º	644	0,695
6.º	737	0,520

Na tabela 12, apresentam-se os dados recolhidos de cada mês sobre o peso em toneladas, o trabalho em horas e a quantidade de *dumpers* carregados, referentes aos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio e Junho.

Tabela 12 - Dados recolhidos em cada mês sobre peso, horas de trabalho e nº de *dumpers* carregados

	Peso (t)	Tempo (h)	Quantidade de <i>dumpers</i> carregados
Janeiro	29.400	125	1.356
Fevereiro	27.350	193	1.232
Março	29.430	220	1.322
Abril	23.250	190	1.094
Mai	28.890	191	1.334
Junho	31.200	197	1.350

Feita esta recolha de dados, conseguiu-se calcular o rendimento médio em toneladas por hora e o rendimento médio de toneladas que a pá carregadora movimenta e que o *dumper* é capaz de transportar (tabela 13).

Tabela 13 - Rendimento médio da pá carregadora e dos *dumpers*

	Rendimento horário (t/h)	Rendimento médio (t/h)	Rendimento (t/ <i>dumper</i>)	Rendimento médio (t/ <i>dumper</i>)
Janeiro	235,2	157,1	21,7	22,0
Fevereiro	141,7		22,2	
Março	133,8		22,3	
Abril	122,4		21,3	
Mai	151,3		21,7	
Junho	158,4		23,1	

Uma vez obtido o volume do rebentamento e o rendimento horário da pá carregadora, calculou-se o número de horas que o equipamento necessitou para carregar todo o material desmontado, assunto será abordado mais à frente.

Na tabela 14 apresentam-se os custos inerentes ao funcionamento pá carregadora:

Tabela 14 – Consumos e custos variáveis da pá carregadora

		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho
Gasóleo	l	2.405	4.568	4.983	3.497	3.429	3.169
	€/l	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	1,05
	€	2.333	4.431	4.784	3.392	3.326	3.327
Lubrificantes	l	200	41	20	135	185	135
	€/l	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
	€	328	67	33	221	303	221
Material de desgaste	€	1.751	83	302	0	326	333
Custo de manutenção	€	0	0	0	0	0	185
Pneus	€	1.417	2.930,43	0	2.418,04	0	0
Equipamento	h	90	152	173	128	132	121

Podemos verificar, como seria de esperar, que a maior fatia de custos inerentes à pá carregadora é atribuída ao gasóleo, responsável por mais de metade dos custos totais. O custo dos pneus assume uma expressão significativa, tendo em conta o elevado preço de aquisição.

Na figura 45 podemos observar a representação gráfica dos custos operacionais referentes à pá carregadora.

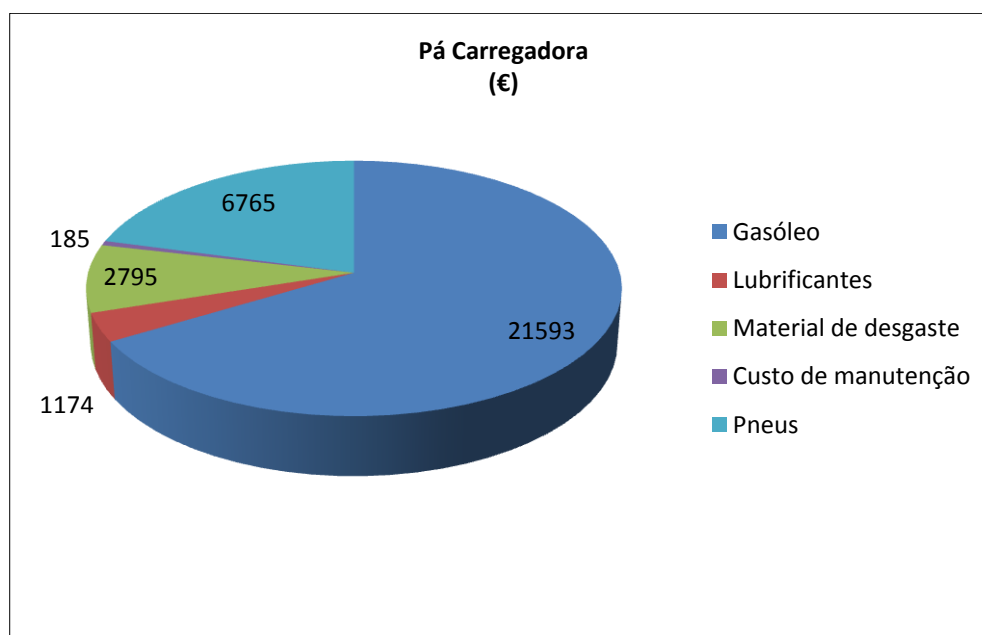


Figura 45 - Representação gráfica dos custos operacionais da pá carregadora

4.6 Martelo Demolidor

A análise do funcionamento do martelo demolidor iniciou-se com o objectivo de obter o valor do seu rendimento horário. Durante a fase de estudo, foram-se medindo, em dias aleatórios, determinados volumes de material que iriam sofrer fragmentação secundária por parte do martelo demolidor, sendo contabilizado o tempo que o equipamento demorou a partir esse volume de rocha. Contabilizaram-se assim as horas de trabalho do equipamento em função do volume de material que sofreu fragmentação secundária, o que permitiu obter o rendimento médio do equipamento (tabela 15).

Tabela 15 - Dados do martelo demolidor referentes ao volume, trabalho e rendimento

	Volume (m ³)	Tempo (h)	Rendimento (m ³ /h)	Rendimento Médio (m ³ /h)
Amostra 1	46,00	0,76	60,50	56,1
Amostra 2	38,00	0,67	56,70	
Amostra 3	28,00	0,51	54,90	
Amostra 4	41,00	0,83	49,40	
Amostra 5	33,00	0,56	58,90	

Tal como na pá carregadora, calcularam-se também, os custos variáveis associados à utilização do martelo hidráulico, como o consumo de combustível e o material de desgaste que o equipamento obteve (tabela 16).

Estes custos variáveis calculados são de rebenamentos realizados anteriormente ao início deste estudo. Eram de rebenamentos *standard* da empresa, cujo único objectivo foi a saber o custo horário do equipamento. Entende-se por rebenamento *standard* da empresa, o rebenamento executado com uma distância à frente e espaçamento de 2,5×3,0 m respectivamente.

Tabela 16 - Custos variáveis do martelo demolidor

		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho
Gasóleo	l	4.585	3.746	3.956	3.238	4.106	4.266
	€/l	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	1,05
	€	4.447	3.634	3.798	3.141	3.983	4.479
Lubrificantes	l	35	135	29	116	101	279
	€/l	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
	€	57	221	48	190	166	458
Material de Desgaste	€	1.065	775	0	174	842	2.889
Custo de manutenção	€	0	0	0	0	0	185
Equipamento	h	145	133	128	106	142	147

Tal como se havia verificado na pá carregadora, a maior fatia de custos é atribuída ao combustível, que ocupa mais de metade dos custos totais.

Os custos variáveis ao martelo hidráulico encontram-se representados graficamente na figura 46.

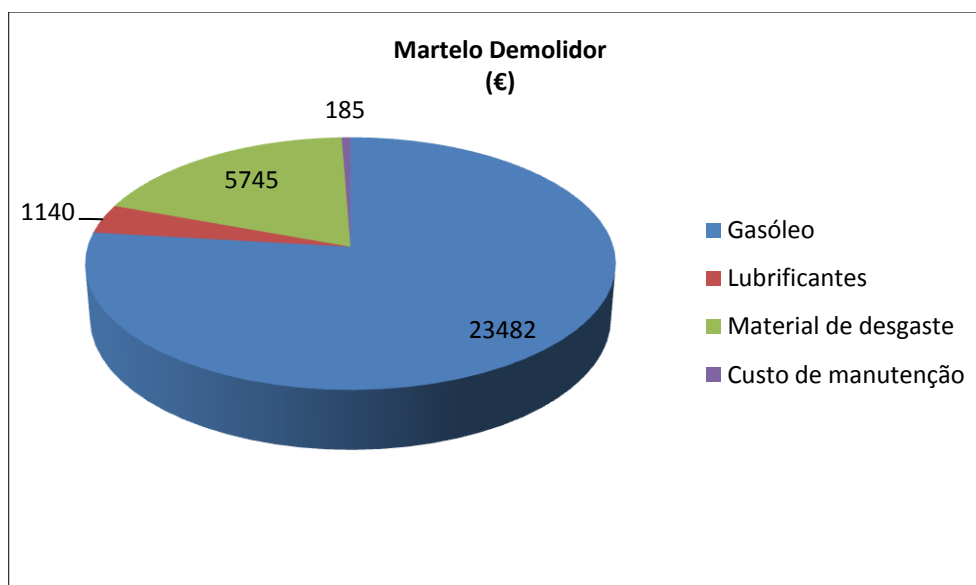


Figura 46 - Representação gráfica dos custos variáveis do martelo demolidor

4.7 Fragmentador Primário

A análise do funcionamento do fragmentador primário iniciou-se com a recolha, em cada rebentamento, dos tempos referentes ao estudo para determinação da produtividade do

equipamento, nomeadamente, o tempo de trabalho em carga, o tempo que esteve parado por encravamento e o tempo que esteve parado à espera de material proveniente da frente de desmonte.

Para além do estudo da produtividade e na falta de equipamentos de medida do consumo de energia no fragmentador primário, estimou-se a energia consumida em quilowatts hora por tonelada (kWh/t) através da equação de *Bond*.

Tabela 17 – Tempos relativos ao fragmentador primário

Rebentamento	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º
Trabalho (s)	3.158	2.604	3.014	2.413	3.413	2.686
Encravamento (s)	269	106	380	413	0	345
Parado (s)	210	874	219	817	247	553

Na figura 47 encontram-se representados graficamente, os valores relativos à produtividade do fragmentador primário.

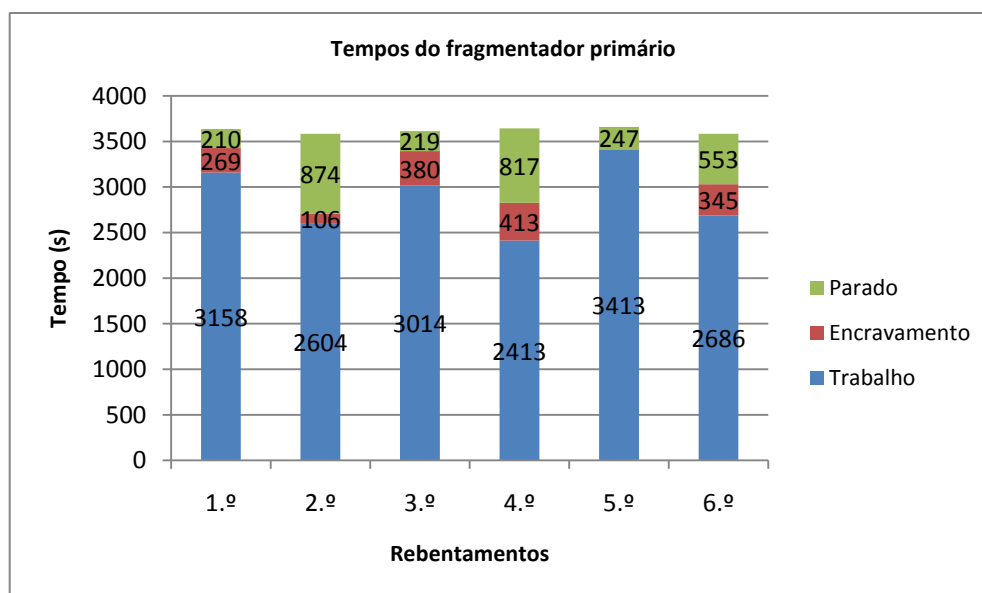


Figura 47 - Representação gráfica dos tempos de trabalho, encravamento e de espera do fragmentador primário

Analisando o gráfico que representa os tempos em que o fragmentador primário esteve a trabalhar em carga, o tempo que esteve encravado e o tempo que esteve parado à espera de material, verifica-se que o maior tempo em que o equipamento esteve à espera de pedra,

corresponde aos rebentamentos 2 e 4, que foram exactamente os que se encontravam na bancada 1, ou seja, a bancada mais distante relativamente ao fragmentador primário.

Destaca-se, ainda, a inexistência de horas de encravamento no quinto rebentamento, reforçando a certeza do diminuto número de blocos de maiores calibres.

Comparando os valores dos tempos obtidos no fragmentador primário com as cargas específicas utilizadas em cada rebentamento, verifica-se que o rebentamento nº 5 que utilizou mais carga específica foi o que possibilitou mais horas de trabalho contínuo e menos horas de encravamento. Pelo contrário, o rebentamento nº 4 e que utilizou a menor carga específica foi o que obteve menos horas de trabalho contínuo e um maior número de horas de encravamento.

Ainda em relação ao fragmentador primário calculou-se a energia consumida através da equação de *Bond*, como mostra a tabela 18. As duas primeiras colunas, representadas por D_{80} e d_{80} , significam o calibre de alimentação e o calibre resultante, respectivamente, de 80% do material passado. Os valores de calibre de alimentação foram obtidos nas curvas granulométricas fornecidas pelo programa *WipFrag* dos diferentes rebentamentos. Os valores do calibre resultante foram obtidos na curva granulométrica fornecida pelo fabricante do fragmentador primário.

O estudo realizado por *Eloranta*, (1997) que calculou o consumo energético das fases de rebentamento, fragmentação primária e moagem pelo método de *Bond*, comparando esses valores com os valores de consumo energético real, concluiu que na fase de fragmentação, a eficiência aparente, ou seja, a diferença entre os valores reais e os calculados pelo método de *Bond* era de 29%. Utilizou-se esse valor da eficiência aparente de 29% para obter valores mais reais do consumo energético do fragmentador primário.

Tabela 18 - Energia consumida pelo fragmentador primário

Rebentamento	D_{80} (microns)	d_{80} (microns)	W (Calc.) (kWh/t)	Eficiência aparente (%)	W (Corrigida) (kWh/t)
1.º	450000	193000	0,11	29,00	0,38
2.º	370000	193000	0,09		0,31
3.º	400000	193000	0,10		0,34
4.º	640000	193000	0,15		0,51
5.º	250000	193000	0,04		0,14
6.º	430000	193000	0,11		0,38

Pelos resultados obtidos através do método de *Bond* em relação à energia consumida pelo fragmentador primário, verifica-se que as variações maiores de consumo são em relação ao quarto e quinto rebentamento tendo consumido 0,51 e 0,14 quilowatts hora por tonelada, respectivamente. De facto, já seriam de esperar os valores obtidos nestes dois rebentamentos, isto porque, no quarto rebentamento, aquele que mais energia consumiu, foi o rebentamento que obteve menor quantidade de fragmentos inferiores a 250 mm. Isso significa que a relação de redução para fragmentar o material mais grosseiro deste rebentamento teve de ser maior levando a um maior consumo de energia. Por outro lado, o quinto rebentamento foi o que menos energia consumiu na fragmentação primária. Ao contrário do quarto rebentamento, este obteve, no geral, valores mais baixos no que diz respeito ao tamanho médio dos blocos, não necessitando, por isso, de uma relação de redução muito elevada. Em relação aos restantes rebentamentos, os valores da energia consumida obtidos situam-se entre os 0,31 e 0,38 quilowatts hora por tonelada.

5. Considerações de Carácter Económico/Eficiência Energética

5. Considerações de Carácter Económico/Eficiência Energética

Neste capítulo pretende-se ensaiar um modelo de cálculo de custos versus eficiência energética, que possibilite entender de que forma podem ser conduzidas as operações de desmonte de rocha com explosivos, de forma económica e energeticamente eficiente.

Para tal foram utilizados os valores de custo e consumo de energia em cada tipo de rebentamento estudado e comparados entre si e com os rebentamentos anteriores ao estudo.

5.3 Pá Carregadora

Com base em valores históricos médios de vários meses, calcularam-se os custos fixos e variáveis relativos à operação da pá carregadora (tabela 19).

Tabela 19 - Custo horário em diferentes meses para a pá carregadora

		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho
Gasóleo	€/h	25,9	29,2	27,7	26,5	25,2	27,5
Lubrificantes	€/h	3,6	0,4	0,2	1,7	2,3	1,8
Material de desgaste	€/h	19,5	0,5	1,7	0,0	2,5	2,8
Custo de manutenção	€/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
Pneus	€/h	15,7	19,3	0,0	18,9	0,0	0,0
Operador	€/h	9	9	9	9	9	9
Amortização	€/h	8,9					

Em seguida calculou-se o custo médio horário da pá carregadora (tabela 20).

Tabela 20 - Custo total por hora da pá carregadora

		Média de custo (€/h)	Custo médio total (€/h)
Gasóleo	€/h	27,0	60,3
Lubrificantes	€/h	1,7	
Material de desgaste	€/h	4,5	
Custo de manutenção	€/h	0,3	
Pneus	€/h	9,0	
Operador	€/h	9,0	
Amortização	€/h	8,9	

Conhecendo a quantidade em toneladas desmontadas em cada rebentamento, o número de horas necessário para a sua remoção e o custo médio horário, calculou-se o custo de utilização da pá carregadora em cada um dos rebentamentos estudados (tabela 21).

Tabela 21 - Custo total de cada rebentamento em relação à pá carregadora

Rebentamento	Peso (t)	Trabalho (h)	Custo (€)
1.º	30.003	263	11.517
2.º	36.518	320	14.018
3.º	16.084	141	6.174
4.º	30.786	270	11.818
5.º	13.573	119	5.210
6.º	32.670	286	12.541

De seguida, na tabela 22, calculou-se o custo que a pá carregadora obteve nos tempos de ciclo retirados e o custo por tonelada obtido em cada rebentamento.

Tabela 22 – Custo por tonelada em relação à pá carregadora

Rebentamento	1º	3º	4º	5º	6º
Total (s)	741	879	1017	644	737
Total (h)	0,21	0,24	0,28	0,18	0,20
Custo total (€)	12,4	14,7	17,0	10,8	12,3
Custo total (€/t)	0,08	0,10	0,11	0,07	0,08

Verifica-se que o quinto rebentamento foi o que obteve o menor custo por tonelada de material carregado com 0,07 €/t, enquanto o quarto rebentamento obteve o maior custo por tonelada com 0,11 €/t. Existe uma diferença muito significativa de 0,04 € entre os dois rebentamentos.

5.4 Martelo demolidor

Tal como na pá carregadora, também no martelo demolidor se calcularam os custos fixos e variáveis horários de cada componente ligado ao equipamento (tabela 23).

Tabela 23 - Custo horário em diferentes meses para o martelo demolidor

		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho
Gasóleo	€/h	30,7	27,3	29,7	29,6	28,0	30,5
Lubrificantes	€/h	0,4	1,7	0,4	1,8	1,2	3,1
Material de desgaste	€/h	7,3	5,8	0,0	1,6	5,9	19,7
Custo de manutenção	€/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
Operador	€/h	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Amortização	€/h	11,8					

Calculados esses custos horários, calculou-se o custo médio, para seguidamente, calcular-se o custo médio total do equipamento por hora, com a soma dos custos fixos e variáveis, como indica a tabela 24.

Tabela 24 – Custo médio por hora do martelo demolidor

		Média de custo	Custo médio total (€/h)
Gasóleo	€/h	29,3	59,7
Lubrificantes	€/h	1,4	
Material de desgaste	€/h	6,7	
Custo de manutenção	€/h	0,2	
Operador	€/h	10,3	
Amortização	€/h	11,8	

Inicialmente, tentou-se avaliar fisicamente e comparar a quantidade de blocos para fragmentação secundária resultantes de cada rebentamento, com a percentagem obtida com a análise fotográfica e programa *wipfrag*, na tentativa de encontrar um padrão de comportamento entre os dois métodos. No entanto, por avaria do equipamento de demolição, o operador da pá carregadora misturou o material para fragmentação secundária de vários rebentamentos, sendo portanto impossível a contabilização do volume de cada um. Assim, decidiu-se dar continuidade ao estudo, utilizando os valores obtidos na análise fotográfica do *WipFrag*, sendo considerados os valores da percentagem de blocos de dimensão superior a 800 mm (tabela 25).

Tabela 25 - Custo total da fragmentação secundária em cada rebentamento

Rebentamento	Peso (t)	Trabalho (h)	Custo (€)
1.º	1.250	8	478
2.º	936	6	358
3.º	758	5	299
4.º	4.398	30	1.791
5.º	0	0	0
6.º	1.901	13	776

5.5 Fragmentador Primário

No fragmentador primário, resta apenas apresentar o custo total de operação de cada pega e o custo por tonelada referente à equação de *Bond*, o qual se encontra representado na tabela 26.

Tabela 26 - Custo da energia no fragmentador primário em cada rebentamento

Rebentamento	D ₈₀ (microns)	d ₈₀ (microns)	W (Real) (kWh/t)	Custo de energia (€/kW)	Custo (€/t)	Custo total (€)
1.º	450.000	193.000	0,38	0,10	0,038	1.188
2.º	370.000	193.000	0,31	0,10	0,031	1.161
3.º	400.000	193.000	0,34	0,10	0,034	573
4.º	640.000	193.000	0,51	0,10	0,051	1.794
5.º	250.000	193.000	0,14	0,10	0,014	190
6.º	430.000	193.000	0,38	0,10	0,038	1.314

Como referido anteriormente, o custo da energia consumida por cada tonelada fragmentada foi superior nos rebentamentos com curvas granulométricas mais grosseiras.

5.6 Perfuração e carregamento de explosivo

Apresentam-se em seguida os custos de cada rebentamento relativamente à perfuração e ao consumo de explosivos. Quando adicionados aos valores apresentados nos capítulos anteriores permitem-nos obter o custo total de cada rebentamento.

O objectivo desta análise é o de comparar a energia total consumida, seja na forma de energia eléctrica, combustível ou explosivo, em cada um dos rebentamentos estudados.

5.6.1 Primeiro rebentamento

A tabela 27 indica os custos de carregamento e a quantidade de gasóleo consumido na operação perfuração do primeiro rebentamento.

Tabela 27 - Custo total de gasóleo e explosivos do primeiro rebentamento

Rocha desmontada (t)	Gasóleo (l)	Gasóleo (€)	Acessórios	Custo dos acessórios (€)	Custo em explosivo		Custo total (€)
					Carga de fundo (kg)	Carga de coluna (kg)	
19.533	1.953	2.148	Detonador eléctrico	0,85			7.009,84
			Ligador 17MS	34,50	775	2575	Custo total (€/t)
			Ligador 25MS	1,38			
			Ligador 42MS	64,86	1.140,80	3.346,21	0,36
			Ligador 400MS	273,24			

Em termos energéticos, consumiram-se de 1.953 litros de gasóleo e 3.350 quilogramas, sendo 775 quilogramas da *EMULEX 731* referente à carga de fundo e 2.575 quilogramas da *EMULEX 711* referente à carga de coluna. O diâmetro de perfuração foi de 76 milímetros e a altura de bancada de 13 metros. Obteve-se um custo de 0,36 euros por tonelada desmontada.

5.6.2 Segundo rebentamento

A tabela 28 indica os custos de carregamento e a quantidade de gasóleo consumido na operação perfuração do segundo rebentamento.

Tabela 28 - Custo total de gasóleo e explosivos do segundo rebentamento

Rocha desmontada (t)	Gasóleo (l)	Gasóleo (€)	Acessórios	Custo dos acessórios (€)	Custo em explosivo		Custo total (€)
					Carga de fundo (kg)	Carga de coluna (kg)	
23.409	2.340	2.575	Detonador eléctrico	0,85			8.881,30
			Ligador 17MS	51,06	1.100	3.200	Custo total (€/t)
			Ligador 25MS	1,38			
			Ligador 42MS	88,32	1.619,20	4.158,40	0,38
			Ligador 400MS	387,09			

Em relação ao gasóleo, houve um consumo de 1.117,92 litros enquanto a quantidade de explosivo consumido foi de 4.300 quilogramas, sendo que 1.100 quilogramas da *EMULEX 731* é referente à carga de fundo e 3.200 quilogramas do explosivo *EMULEX 711* é referente à carga de coluna. O diâmetro de perfuração foi de 76 milímetros e perfurou cerca de 13,25 metros de rocha, sendo a altura de bancada de 12 metros. Obteve-se um custo total de 0,38 euros por tonelada desmontada.

5.6.3 Terceiro rebentamento

A tabela 29 indica os custos de carregamento e a quantidade de gasóleo consumido na operação perfuração do terceiro rebentamento.

Tabela 29 - Custo total de gasóleo e explosivos do terceiro rebentamento

Rocha desmontada (t)	Gasóleo (l)	Gasóleo (€)	Acessórios	Custo dos acessórios (€)	Custo em explosivo		Custo total (€)			
					Carga de fundo (kg)	Carga de coluna (kg)				
10.526	1.052	1.157	Detonador eléctrico	0,85	500	1.800	4.472,38			
			Ligador 17MS	22,08			Custo da carga (€)	Custo da carga (€)	Custo total (€/t)	
			Ligador 25MS	1,38	736,00	2.339,10				0,42
			Ligador 42MS	41,40						
			Ligador 400MS	174,57						

Em termos energéticos, consumiram-se 1.052 litros de gasóleo e 2.300 quilogramas de explosivo, sendo 500 quilogramas da *EMULEX 731* referente à carga de fundo e 1.800 quilogramas do explosivo *EMULEX 711* referente à carga de coluna. O diâmetro de perfuração foi de 76 milímetros e a altura de bancada de 14 metros. Obteve-se um custo de 0,42 euros por tonelada desmontada.

5.6.4 Quarto rebentamento

A tabela 30 indica os custos de carregamento e a quantidade de gasóleo consumido na operação perfuração do quarto rebentamento.

Tabela 30 - Custo total de gasóleo e explosivos do quarto rebentamento

Rocha desmontada (t)	Gasóleo (l)	Gasóleo (€)	Acessórios	Custo dos acessórios (€)	Custo em explosivo		Custo total (€)
					Carga de fundo (kg)	Carga de coluna (kg)	
21.991	2.192	2.411	Detonador eléctrico	0,85			8.027,13
			Ligador 17MS	35,88	925	2.925	Custo total (€/t)
			Ligador 25MS	1,38			
			Ligador 42MS	81,42	1.361,60	3.801,04	0,37
			Ligador 400MS	333,96			

Em termos energéticos, consumiram-se 2.192 litros de gasóleo e 3.850 quilogramas de explosivo, sendo 925 quilogramas da EMULEX 731 referente à carga de fundo e 2.925 quilogramas do explosivo EMULEX 711 referente à carga de coluna. O diâmetro de perfuração foi de 76 mm e a altura de bancada de 12,6 metros. No final, obteve-se um custo de 0,37 euros por tonelada desmontada.

5.6.5 Quinto rebentamento

A tabela 31 indica os custos de carregamento e a quantidade de gasóleo consumido na operação perfuração do quinto rebentamento.

Tabela 31 - Custo total de gasóleo e explosivos do quinto rebentamento

Rocha desmontada (t)	Gasóleo (l)	Gasóleo (€)	Acessórios	Custo dos acessórios (€)	Custo em explosivo		Custo total (€)
					Carga de fundo (kg)	Carga de coluna (kg)	
8.483	848	933	Detonador eléctrico	0,85			4170,24
			Ligador 17MS	17,94	500	1.725	Custo total (€/t)
			Ligador 25MS	1,38			
			Ligador 42MS	49,68	736,00	2.241,64	0,49
			Ligador 400MS	189,75			

Em relação ao gasóleo, houve um consumo de 848 litros enquanto a quantidade de explosivo consumido foi de 2.225 quilogramas, sendo que 500 quilogramas da *EMULEX 731* é referente à carga de fundo e 1.725 quilogramas do explosivo *EMULEX 711* é referente à carga de coluna. O diâmetro de perfuração foi de 76 milímetros, em relação à altura de perfuração não houve um número constante devido às irregularidades do terreno, sendo a altura de bancada de 13 metros. Obteve-se um custo final de 0,49 euros por tonelada desmontada.

5.6.6 Sexto rebentamento

A tabela 32 indica os custos de carregamento e a quantidade de gasóleo consumido na operação perfuração do sexto rebentamento.

Tabela 32 - Custo total de gasóleo e explosivos do sexto rebentamento

Rocha desmontada (t)	Gasóleo (l)	Gasóleo (€)	Acessórios	Custo dos acessórios (€)	Custo em explosivo		Custo total (€)
					Carga de fundo (kg)	Carga de coluna (kg)	
21.607	2.160	2.376	Detonador eléctrico	0,85			8602,66
			Ligador 17MS	33,12	1.075	3.175	Custo total (€/t)
			Ligador 25MS	48,30			
			Ligador 42MS	56,58	1.582,40	4.125,91	0,40
			Ligador 400MS	379,5			

Em termos energéticos, consumiram-se 2.192 litros de gasóleo e 3.850 quilogramas de explosivo, sendo 925 quilogramas da *EMULEX 731* referente à carga de fundo e 2.925 quilogramas do explosivo *EMULEX 711* referente à carga de coluna. O diâmetro de perfuração foi de 76 mm e a altura de bancada de 13,5 metros. No final, obteve-se um custo de 0,40 euros por tonelada desmontada.

5.7 Eficiência energética

No intuito de determinar qual a melhor solução a adoptar relativamente ao desmonte do maciço rochoso, foi avaliado o consumo de energia em diferentes fases da produção de agregados,

entendidas como as mais importantes para este estudo, designadamente nas operações de perfuração, de rebentamento de fragmentação secundária e de britagem (tabela 33).

Relativamente ao transporte, por se tratar de uma operação com percursos variáveis, entendeu-se, para facilitar a interpretação dos resultados, não considerar o efeito do consumo de combustível nesta operação.

Tabela 1 - Consumo energético de perfuração, de rebentamento, de fragmentação secundária e de britagem.

Rebentamento	D ₅₀	Gasóleo		Quantidade de carga de explosivo		Consumo de energia do britador (kWh)	Consumo de energia total (kWh)
		l	kWh	T	kWh		
1.º	0,2291	2.193	25.075,31	3,35	3,20E+03	3.437,83	3,17E+04
2.º	0,1740	2.550	29.157,33	4,30	4,15E+03	3.370,86	3,67E+04
3.º	0,2208	1.202	13.743,97	2,30	2,19E+03	1.684,20	1,76E+04
4.º	0,3067	3.122	35.697,72	3,85	3,69E+03	5.277,60	4,47E+04
5.º	0,1290	848	9.696,24	2,23	2,12E+03	542,92	1,24E+04
6.º	0,2136	2.550	29.157,33	4,25	4,10E+03	3.802,92	3,71E+04

A tabela 34 apresenta, para cada rebentamento e por tonelada produzida, os valores de consumo de energia e da carga específica.

Tabela 2 – Valores comparativos entre o consumo de energia, carga específica e o custo total de cada rebentamento.

Rebentamento	D ₅₀	Consumo de energia total (kWh)	Carga específica (kg/m ³)	Consumo de energia total (kWh/t)	Custo total (€/t)
1.º	0,2291	3,17E+04	0,46	1,01	0,79
2.º	0,1740	3,67E+04	0,47	0,98	0,81
3.º	0,2208	1,76E+04	0,58	1,05	0,84
4.º	0,3067	4,47E+04	0,45	1,27	0,81
5.º	0,1290	1,24E+04	0,70	0,91	0,50
6.º	0,2136	3,71E+04	0,52	1,07	0,83

Segundo os valores indicados na tabela 34, verifica-se que o quinto rebentamento é claramente o menos dispendioso com apenas 0,50 €/t. Para tal, contribuiu o facto de este rebentamento não ter sido contabilizado qualquer tipo de custo em relação ao martelo demolidor, pois segundo o programa *Wipfrag, software* utilizado para saber a quantidade de material que iria ser fragmentado pelo martelo demolidor, não se obtiveram valores de material que necessitassem de ser fragmentados. No entanto, foi o rebentamento que consumiu mais energia e o que possui o valor mais elevado de carga específica.

Apesar do programa *WipFrag* indicar que não se obteve qualquer percentagem de material acima de 800 mm, acreditamos que, pelo que se observou em campo, resultaram alguns blocos de dimensões superiores a 800 mm. Assim, assumindo que o martelo demolidor fragmentou esses blocos de granulometria superior à admitida no fragmentador primário, a sua posição de rebentamento menos dispendioso, passaria automaticamente para o rebentamento mais dispendioso.

Os rebentamentos 3 e 6 são, por ordem decrescente de custo, os mais dispendiosos com 0,84 €/t e 0,83 €/t, respectivamente. Curiosamente, e admitindo que o martelo demolidor foi utilizado no 5º rebentamento, os que saíram mais dispendiosos foram os rebentamentos que sofreram alteração no volume desmontado por furo, ao contrário dos restantes rebentamentos em que não foi alterado o volume desmontado por furo, ou seja, os rebentamentos *standard* da empresa foram os mais vantajosos no que diz respeito ao custo por tonelada desmontada.

6. Conclusões

6. Conclusões

Com o objectivo de se perceber até que ponto a fragmentação do maciço granítico influenciava o custo total de produção, iniciou-se um estudo com o registo de dados relativos à perfuração e carga dos explosivos, à produtividade da pá carregadora, à produtividade do martelo de impacto utilizado na fragmentação secundária e à produtividade do fragmentador primário, operações que são influenciáveis pelo estado de fragmentação do maciço e da fragmentação resultante do rebentamento.

Após os levantamentos geotécnicos realizados e a análise dos resultados obtidos em relação à força e tensão de rotura, conclui-se que o granito se encontra medianamente alterado à superfície, melhorando em profundidade. A primeira bancada da exploração contém granito moderadamente alterado (W3). A segunda e terceira bancadas possuem granito ligeiramente alterado (W2), sendo que a última bancada contém um granito (W1-2), situando-se entre são e ligeiramente alterado. Em relação à resistência do granito, conclui-se que, os provetes de granito que possuem uma força de rotura de 1049,6 e 984,0 KN e cuja tensão de rotura é de 124,6 e 117,9 MPa, correspondem a um granito são, muito resistente. O granito que obteve uma força de rotura de 811.7 KN e uma tensão de rotura de 98.6 MPa é um granito resistente, medianamente alterado. O granito com uma força de rotura de 332,1 KN e uma tensão de rotura de 39,5 MPa, corresponde a um granito de resistência média.

Na operação de perfuração, onde só foi avaliado o custo do explosivo e o combustível utilizado em cada rebentamento, ao analisar o custo por tonelada de rocha desmontada, verifica-se que o rebentamento mais dispendioso foi o quinto com 0,49 €/t ao passo que o menos dispendioso foi o primeiro rebentamento com 0,36 €/t. Já seria previsível um custo mais elevado no quinto rebentamento uma vez que é a que foi realizado com um menor volume desmontado por furo.

Na operação de carga, onde se avaliaram os tempos de ciclo da pá carregadora a carregar o material desmontado para o *dumper*, verificou-se que o 5º rebentamento foi o que obteve o menor tempo de ciclo, enquanto o 4º rebentamento foi o que obteve o maior tempo de ciclo. No que diz respeito ao custo por tonelada movimentada verifica-se que o rebentamento mais dispendioso foi o quarto com 0,11 €/t e o menos dispendioso foi o quinto rebentamento com 0,07 €/t. Os valores apresentados são influenciados, não só pelo estado de fragmentação apresentado, mas também pela irregularidade da plataforma e pelo espaço de manobra disponível em cada bancada.

Na fragmentação secundária de blocos maiores aos admitidos no fragmentador primário, o martelo demolidor teve um custo de 0,39 €/t em todos os rebentamentos, pois foi calculado o custo médio de todos os rebentamentos anteriores.

Na fragmentação primária, através da equação de *Bond* estimou-se um consumo de energia em quilowatts hora por tonelada, tendo-se concluído que o quinto rebentamento teve um menor consumo de energia, com o valor de 0,14 kWh/t, o qual corresponde a um custo de 0,014 €/t. O quarto rebentamento por sua vez foi o que consumiu mais energia, chegando ao valor de 0,51 kWh/t, o qual corresponde a um custo de 0,051 €/t. São ambos valores esperados, só pela simples observação dos dados fornecidos pelo *software WipFrag*, uma vez que, quanto maior a dimensão do material obtido nos diferentes desmontes, maior terá de ser a relação de redução e por conseguinte maior será a energia consumida pelo britador primário.

Em todas as operações descritas anteriormente, à excepção da fragmentação primária, o combustível representa a maior fatia de custos, responsável por mais de metade dos custos totais.

A análise das curvas granulométricas e dos histogramas poderá dar uma ideia melhor sobre a dimensão do material desmontado em cada rebentamento. Saber se o material é de granulometria menor ou maior é um excelente indicador para planeamento da continuidade do ciclo de trabalho e para introdução de alterações ao diagrama de fogo.

As curvas granulométricas e os histogramas foram analisados individualmente no capítulo 7.2. No geral, os resultados do 3º, 4º e 6º rebentamento, levam à sua exclusão pela quantidade exagerada de grandes blocos. Em relação ao 3º e ao 6º, a razão para esse acontecimento pode estar no aumento da área desmontada, enquanto no quarto rebentamento, a razão pode ser na utilização da pequena carga específica. Em relação ao 2º rebentamento que foi realizado no mesmo tipo de granito, na mesma bancada e com a mesma área por furo que o 4º rebentamento, apresenta um valor muito inferior de blocos grandes e uma melhor distribuição do material. A falta de tempo e os objectivos propostos inicialmente não permitiu analisar o comportamento destes dois rebentamentos, no entanto seria interessante, mais tarde noutra estudo, analisar-se apenas rebentamentos realizados na bancada 1 com mais pormenor e tentar perceber o que é que diferencia tanto os seus resultados.

O 5º rebentamento com um volume desmontado por furo menor, obteve valores de granulometria muito finos, sendo de excluir se o objectivo for produzir enrocamento, mas é um caso interessante se o objectivo for apenas produzir material mais fino como areias.

Por exclusão, segundo os resultados obtidos em cada um, restaram o 1º e o 2º rebentamento. De facto, as curvas granulométricas e os histogramas obtidos no programa *WipFrag*, são os que melhor satisfazem os interesses da pedreira no que diz respeito à fragmentação obtida no desmonte. Esse facto deve-se a um equilibrado uso da carga específica consoante o maciço rochoso presente e à relação distância à frente - espaçamento utilizada.

O cálculo do consumo energético comparado com o custo por tonelada e com a carga específica de cada rebentamento consolidou a ideia que de facto os dois primeiros rebentamentos com uma área desmontada por furo de 2,5 × 3 m são os mais vantajosos, tanto no custo por tonelada como na qualidade de granulometria obtida no desmonte.

Com os valores apresentados conclui-se que é vantajoso continuar a utilizar o rebentamento *standard* da empresa com a área desmontada por furo de 2,5 × 3,0 metros.

6.3 Perspectivas de Estudo e Desenvolvimento

O estudo revelou-se interessante embora facilmente se conclua que para uma análise mais detalhada será necessário a avaliação do resultado de um maior número de rebentamentos. Face às diferenças da estrutura geológica nos diversos locais em que se executam os rebentamentos, seria interessante estudar de que modo a alteração dos diagramas de fogo poderia contribuir para uma melhoria da fragmentação em resultado da utilização de explosivo.

7. Bibliografia

7. Bibliografia

Cruz A., 2007. Relações Petrogeoquímicas dos Maciços Graníticos do NE Alentejano. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. (Tese de Doutoramento).

Correia, A., 2009. Novas formulações para leis de propagação de vibrações, em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos. I.S.T. - Universidade Técnica de Lisboa. (Dissertação para obtenção de grau de Mestre).

Lopez Jimeno, C., Lopez Jimeno, E., Manglano Alonso, S., Toledo Santos, J.M., 1991. Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo Abierto. s.l. : Cartografía Madrid, S.A., pp. 139 – 162.

Medeiros C., Teixeira A., 1969. Nota explicativa da folha 5-C Barcelos, Carta Geológica de Portugal. Direcção geral de minas e serviços geológicos. Ministério da Economia.

C.P.A. Consultoria e Projectos de Ambiente, Lda., 2007. Estudo de Impacte Ambiental Do Conjunto Comercial Dolce Vita Braga em Fase de Estudo Prévio. (Resumo-Não-Técnico)

Eloranta, J.W. 1997, Efficiency of Blasting vs. Crushing & Grinding, Proceedings of the twenty-third conference of Explosives and Blasting Technique, Las Vegas, Nevada, February 2-6, 1997. International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio.

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

GEOMEGA – Geotecnia e Ambiente, Lda., 2006. Projecto de Exploração da Pedreira “Serra da Gatanha” – Estudo de Impacte Ambiental. Volume 1. (Resumo-Não-Técnico)

Gomes L., Galiza A. & Vieira A., 2008. Desmonte de rocha com explosivos. FIPP, Porto, pp. 63. (Texto não publicado)

Gomes L., Galiza A. & Vieira A., 2006. Desmonte de Maciços Rochosos I -Versão 2006/2007. ISEP, Porto, pp. 159. (Texto não publicado)

Gomes L., Galiza A. & Vieira A., 2006. Desmonte de Maciços Rochosos II - Versão 2006/2007. ISEP, Porto, pp. 114. (Texto não publicado)

Hustrulid., 1999. Blasting Principles for Open Pit Mining - Volume 1 General design concepts. s.l. : Balkema, pp. 24 – 119.

Kujundzic T. & Bedekovic G. & Kuhinek D. & Korman T., 2008. Impact of Rock Hardness on Fragmentation of Hydraulic Hammer and Crushing in Jaw Crusher. Paper Volume 20.

Leite M.R.M., 1987. Fragmentação e Classificação de Rochas e Minérios., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Luz A.B. et al., 2002. Tratamento de Minérios. 3ª edição. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral – Rio de Janeiro.
- Maerz, N. H., Palangio, T. C., and Franklin, J. A., 1996. WipFrag image based granulometry system. Proceedings of the FRAGBLAST. 5º Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 23-24 Aug., pp. 91-99.
- Martins, J., Moreira, Pedro N., Santos Pereira, C., Neto, Eduardo P., Medeiros Pereira, A., Teixeira, José, Vieira, António, Chaminé, Helder I., 2006. A Técnica de Amostragem Linear Aplicada a Estudos de Compartimentação de Maciços Rochosos no Norte de Portugal. In: 10º Congresso Nacional de Geotecnia, 2006, Abstract, volume 1, pp. 255 – 264.
- Mohanty, B. 1996. Rock Fragmentation by Blasting. s.l. : Balkema, pp. 13 – 35.
- Mota – Engil, SA., 2004. Estudo de Impacte Do Projecto de Ampliação da Pedreira “Bouça do Menino”. (Resumo-Não-Técnico)
- Torres, V. N., Silva, J. F., Gama, C. D., 2005. Modelação do Controle de Impactes Ambientais Associados ao Desmonte com Explosivos na Pedreira “Vale Grande N.º 3” In: XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros.
- Novitzky, Alejandro. 1966. Transporte e Extraccion en Minas y a Cielo Abierto. Argentina : s.n., pp. 83 – 119.
- Persson, Per – Anders, Holmberg, R., Lee, J., 1994. Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press LLC, pp. 5 – 24.
- Pernia Llera, J. M., 1987. Factores Geomecanicos que Influyen en la Seleccion de Equipos de Arranque: Minas e Obras a Cielo Abierto. s.l. : ETIMSA. Crta, pp. 3 – 43.
- Ribeiro C., 2008. Carga e Transporte. Fundação Politécnico do Porto - FIPP, pp. 51. (Texto não publicado)
- Sampaio M.J.C., 2006. Processamento de Matérias – Primas Minerais e Resíduos. Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, pp. 214 (Texto não publicado)
- Spínola S., 1999. Movimento de Terras. Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, pp. 195. (Texto não publicado)
- Vaz S., 2008. Desmonte com Explosivos. Fundação Politécnico do Porto - FIPP, pp. 99. (Texto não publicado)
- Vieira A., 2008. A importância da perfuração no desmonte de rocha com explosivos. Fundação Politécnico do Porto - FIPP, pp. 56. (Texto não publicado)

Vieira A., 2008. Acessórios de perfuração, utilização e manutenção. Fundação Politécnico do Porto - FIPP, pp. 99. (Texto não publicado)

Vieira A., 2008. Fragmentação Secundária, Controlo da Fragmentação, Controlo das Projecções, Controlo da Onda de Choque Aérea, Controlo das Vibrações. Fundação Politécnico do Porto – FIPP, pp. 52. (Texto não publicado)

Sites consultados:

Centro de Tecnologia Mineral, 2005. A Review on Indicators of Sustainability for the Minerals Extraction Industries. [Online] 2005. [Citação: 7 de Maio de 2009.] http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/review_indicators_sustainability.pdf.

Correia, Nuno Miguel Pires. 2008. Carta Geológica de Portugal. [Online] 2008. [Citação: 3 de Abril de 2009.] <http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/carta-geol%C3%B3gia-de-portugal>.

Instituto Geológico e Mineiro (1999). Regras de Boa Prática no Desmante a Céu Aberto. Versão Online no site do INETI: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/boa_pratica/indice.htm (consultado em 23 de Março de 2009)

Maquinaria de Obra Pública, Construcción y Minería. 2008. [Online] 3 de Fevereiro de 2008. [Citação: 5 de Junho de 2009.] <http://members.fortunecity.es/100pies/>.

<http://www.metso.com> (consultado a 30 de Maio de 2009)

http://snirh.pt/snirh/_atlasagua/galeria/mapasweb/pt/aa1002.pdf (consultado a 11 de Junho de 2009)

http://snirh.pt/snirh/_atlasagua/galeria/mapasweb/pt/aa1006.pdf (consultado a 11 de Junho de 2009)

<http://reducaosolidos.tripod.com/mandibulas.htm/> (consultado a 16 de Junho de 2009)

<http://reducaosolidos.tripod.com/giratorio.htm> (consultado a 16 de Junho de 2009)

<http://www.aubema.de/wDatasheet/Kegelbrecher.pdf> (consultado a 16 de Junho de 2009)

<http://www.aubema.de/wDatasheet/Backenbrecher.pdf> (consultado a 16 de Junho de 2009)

<http://www.tvciencia.pt/cat/pagcat/icat03.asp?varcota=CDI-2996-1949> (consultado a 3 de Abril de 2009)

[http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050616-2256F-C8565/\\$File/Cap_2_Manual_Britagem.pdf](http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050616-2256F-C8565/$File/Cap_2_Manual_Britagem.pdf) (consultado a 19 de Junho de 2009)

[http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Jaw*2AJaw*brochure/\\$file/Sandvik%20Jaw_eng.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Jaw*2AJaw*brochure/$file/Sandvik%20Jaw_eng.pdf) (consultado a 19 de Junho de 2009)

http://www.google.com/imgres?imgurl=http://www.miningbasics.com/assets/images/autogen/a_Cross_sectional_detail_of_modern_type_double-toggle_crusher.jpg&imgrefurl=http://www.miningbasics.com/types-jaw-crushers-applications&usg=__knv7xEvj6SGCC9Mcs80HmByXkKY=&h=289&w=403&sz=58&hl=pt-PT&start=1&itbs=1&tbnid=shNQvc63WAN1GM:&tbnh=89&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3Djaw%2Bcrusher%2Bdodge%26hl%3Dpt-PT%26gbv%3D2%26tbs%3Disch:1 (consultado a 20 de Junho de 2009)

<http://www.uk-rocks.net/MK2/pages/mk2-daylife.html> (consultado a 1 de Setembro de 2010)

8. Anexos (ver em CD-Rom)

Anexo 1 – Dados dos rebentamentos

Anexo 2 – Tempos de ciclo da Pá Carregadora

Anexo 3 – Tempos do Fragmentador Primário

Anexo 4 – Tabelas de conversão