

ALEXANDER SEYMOUR BURT SÃO THIAGO

**AUMENTO DA COMPETITIVIDADE DE UMA PEQUENA
MINERADORA POR MEIO DE MELHORIAS NO DESMONTE**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientador:
Prof. Dr. Giorgio de Tomi (Poli/USP)

São Paulo

2017

TF-2017
Sabia
Lynx 2881009

H 2017 d

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010033

Catálogo-na-publicação

Thiago, Alexander Seymour Burt São

Aumento da competitividade de uma pequena mineradora por meio de melhorias no desmonte / A. S. B. S. Thiago -- São Paulo, 2017.
36 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.DESMONTE DE ROCHAS I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIVISÃO DOS CUSTOS TOTAIS DE UMA MINERAÇÃO (ORICA, 2016)	8
FIGURA 2. DIVISÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM UMA MINERAÇÃO, POR ÁREA (ORICA, 2016)	8
FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA NUM EMPREENDIMENTO MINERÁRIO (DOE, 2007)	9
FIGURA 4. INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO FURO (SILVA, 2009)	11
FIGURA 5. MALHAS DE PERFURAÇÃO (SILVA, 2009)	12
FIGURA 6. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE UM PLANO DE FOGO A CÉU ABERTO (IRAMINA, 2016)	13
FIGURA 7. RESULTADOS OBTIDOS COM A MELHORA NO DESMONTE (ORICA, S.D.)	15
FIGURA 8. FORMULÁRIOS PARA COLETA DE DADOS DO DESMONTE	18
FIGURA 8. INFLUÊNCIA DA MALHA DE DESMONTE NA GERAÇÃO DE MATAÇOS (CALCÁRIO CALCÍTIPO)	23
FIGURA 9. INFLUÊNCIA DA MALHA DE DESMONTE NA GERAÇÃO DE MATAÇOS (CALCÁRIO DOLOMÍTICO)	23
FIGURA 10. INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE CARGA NA GERAÇÃO DE MATAÇOS	24
FIGURA 11. INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE CARGA NA GERAÇÃO DE MATAÇOS	25
FIGURA 12. INFLUÊNCIA DA MALHA DE DESMONTE E DA RAZÃO DE CARGA NA GERAÇÃO DE MATAÇOS	26
FIGURA 13. CAPACIDADE PRODUTIVA DO BRITADOR PRIMÁRIO C125 EM FUNÇÃO DO APF (METSO, 2005)	27
FIGURA 14. CURVA GRANULOMÉTRICA NA SAÍDA DO BRITADOR C125 EM FUNÇÃO DO APF (METSO, 2005)	27
FIGURA 15. APF DO BRITADOR SECUNDÁRIO HP400 EM FUNÇÃO DO MATERIAL DE ENTRADA (METSO, 2005)	28
FIGURA 16. CURVA GRANULOMÉTRICA NA SAÍDA DO BRITADOR HP400 EM FUNÇÃO DO APF (METSO, 2005)	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PRODUTIVIDADE DO MOINHO VERSUS RAZÃO DE CARGA PARA O GRANITO TIPO "STANSTEAD"(MURR <i>ET AL.</i> , 2015)	16
TABELA 2. PRODUTIVIDADE DO MOINHO VERSUS RAZÃO DE CARGA PARA O GRANITO TIPO "LAURENTIAN"(MURR <i>ET AL.</i> , 2015)	16
TABELA 3. PRODUTIVIDADE DO MOINHO VERSUS RAZÃO DE CARGA PARA O GRANITO TIPO "BARRE"(MURR <i>ET AL.</i> , 2015)	16
TABELA 4. AMOSTRAS UTILIZADAS NO PROJETO.....	18
TABELA 5. DADOS REFERENTES AO DESMONTE DE CALCÁRIO CALCÍTIPO	21
TABELA 6. DADOS REFERENTES AO DESMONTE DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO	22
TABELA 7. CARACTERÍSTICA DOS BRITADORES	22
TABELA 8. RELAÇÃO ENTRE A GERAÇÃO DE MATAÇOS E O APF DO BRITADOR PRIMÁRIO	29
TABELA 9. RELAÇÃO ENTRE O APF DO BRITADOR PRIMÁRIO E O APF DO BRITADOR SECUNDÁRIO	30
TABELA 10. RELAÇÃO ENTRE O APF BRITADOR SECUNDÁRIO E O CONSUMO ENERGÉTICO DO MOINHO	30
TABELA 11. COMPILADO DA RELAÇÃO ENTRE O MATAÇO E A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NO MOINHO.....	30
TABELA 12. CUSTO DE DESMONTE EM FUNÇÃO DA ÁREA DA MALHA E DA RAZÃO DE CARGA	31
TABELA 13. CUSTO DE MOAGEM EM FUNÇÃO DA ÁREA DA MALHA E DA RAZÃO DE CARGA	31
TABELA 14. CUSTO TOTAL EM FUNÇÃO DA ÁREA DA MALHA E DA RAZÃO DE CARGA	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	OBJETIVO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	CONSUMO DE ENERGIA	8
2.2	PARÂMETROS DAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO E DESMONTE	10
2.2.1	<i>Perfuração.....</i>	<i>10</i>
2.2.2	<i>Desmonte.....</i>	<i>12</i>
2.3	ESTUDOS REALIZADOS EM OUTRAS MINERAÇÕES	14
3	METODOLOGIA	18
3.1	COLETA DE DADOS	18
3.2	ANÁLISE DO DESMONTE NA FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA.....	19
3.3	ANÁLISE DO IMPACTO DA CURVA GRANULOMÉTRICA NA COMINUIÇÃO.....	19
3.4	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS IDEAIS DE DESMONTE	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1	DADOS COLETADOS	21
4.2	IMPACTO DO DESMONTE NA CURVA DO MATACO.....	23
4.2.1	<i>MALHA DE DESMONTE.....</i>	<i>23</i>
4.2.2	<i>RAZÃO DE CARGA</i>	<i>24</i>
4.2.3	<i>MALHA DE DESMONTE E RAZÃO DE CARGA.....</i>	<i>25</i>
4.3	IMPACTO DA FRAGMENTAÇÃO NA COMINUIÇÃO	26
4.4	RELAÇÃO DO DESMONTE COM A BRITAGEM	29
4.5	ANÁLISE DE CUSTOS	31
5	CONCLUSÕES	33
	REFERÊNCIAS.....	34

RESUMO

Sabe-se que, dentre todos os custos operacionais de uma mineração, o de maior impacto é o custo energético. Sabe-se também que a etapa de cominuição é responsável por mais de 50% do consumo total de energia e que a eficiência deste processo é significativamente influenciada pela fragmentação da rocha que vem da cava (ROM). A fim de se estudar as melhores condições de desmonte para se gerar uma fragmentação adequada, que traga uma redução global dos custos de operação, dados de uma mineradora de calcário de pequeno porte foram analisados. Pelas análises realizadas, notou-se que quanto menor a malha (afastamento x espaçamento) e maior a razão de carga, menor é a incidência de maticos, ou seja, maior é a fragmentação da rocha obtida pelo desmonte. Além disso, observou-se que alterações na curva granulométrica do ROM impactam de forma significativa os custos de operação da mineradora em questão, podendo gerar uma economia de até 6% no custo total caso a condição ideal de desmonte encontrada seja utilizada, ou seja, malha de 2,50 m x 3,00 m e razão de carga de 0,90 kg/m³.

PALAVRAS-CHAVE: desmonte, fragmentação, consumo energético, mine-to-mill.

ABSTRACT

It is known that of all operational mining costs, energy consumption has the greatest impact. It is also known that comminution is responsible for more than 50% of the total energy consumption and that the efficiency of this process is significantly influenced by the fragmentation of the rock that comes from the pit (ROM). In order to study the best blast parameters to generate proper fragmentation, which results in an overall reduction in operating costs, data from a small limestone mining company were analyzed. According to the analysis, it was noticed that the lower the pattern (burden x spacing) and the higher the powder factor, the better is the rock fragmentation obtained by blasting. In addition, it was observed that changes in mill feed size impact significantly the operating costs of the mining company in study, and can result in savings up to 6% of the total cost, if the ideal blasting parameters are used, which is 2,50 x 3,00 m pattern and powder factor of 0,90 kg/m³.

KEYWORDS: blasting, fragmentation, energy consumption, mine-to-mill.

1 INTRODUÇÃO

Na área de mineração os principais custos envolvidos na extração e beneficiamento do minério são relativos à aquisição e manutenção de equipamentos, ao salário de funcionários, à energia elétrica, ao combustível, aos explosivos, entre outros. A partir da definição dos custos e das receitas obtidas com a venda do produto final, é possível determinar a viabilidade econômica de um determinado empreendimento, de onde se pode concluir que o custo operacional de uma mineração está diretamente ligado com quão competitiva a empresa será no mercado. Quanto menores os custos operacionais, maiores serão as margens de lucro da empresa e, por consequência, a viabilidade econômica daquela mina.

Dentre todos os custos operacionais, o de maior impacto é o custo energético (Infomine, 2008). O gasto de energia está em todas etapas do processo, desde o desmonte até o produto final. No caso de uma mineradora de pequeno porte, com uma cava a céu-aberto e com processos de beneficiamento terminando após a etapa de moagem, os maiores custos operacionais estão relacionados a energia gasta para a redução do tamanho do minério lavrado. Como o produto inicial é uma rocha *in situ* e o produto final tem que ser inferior a uma determinada granulometria, é essencial balancear o processo de modo a gastar a menor energia possível para se atingir o objetivo.

Em média, as etapas de desmonte, britagem e moagem consomem energia na proporção 0,1:1:10 kilowatts-hora por tonelada processada (Delboni, 2016), portanto, assumindo que um aumento de 10% de energia no desmonte gere uma redução de 10% no consumo energético da moagem, a redução do consumo energético total será de 9%, gerando um aumento de competitividade enorme para a mineradora.

Vários estudos têm mostrado que a capacidade e a eficiência dos processos de cominuição são significativamente influenciados pela distribuição granulométrica, ou seja, da fragmentação da rocha que vem da cava, chama de *run of mine* (ROM), o que, por sua vez, é influenciado pelo processo de desmonte (Smith et al., 1993, Scott e McKee 1994, Kojovic et al., 1995, Nielsen e Kristiansen 1995, Eloranta 1995). Assim, afetando a eficiência, a fragmentação obtida no desmonte impacta o gasto energético e, conseqüentemente, o custo das operações subsequentes, principalmente nas etapas de britagem e moagem. Segundo a empresa de

explosivos Orica (2016), as operações que tem como foco a fragmentação através de um desmonte efetivo, observam diversos benefícios, como o aumento da capacidade da planta de beneficiamento, menores custos de operação, possível redução dos custos de investimento através da necessidade de equipamentos menores, entre outros. Mesmo pequenas modificações nestes índices podem gerar retornos muito significantes para a empresa.

Por tais motivos, é crescente o número de empresas de mineração que estão explorando o potencial de integrar as atividades de lavra e beneficiamento a fim de aumentar a eficiência global do processo e, portanto, sua lucratividade (Simkus and Dance, 1998; Kojovic et al., 1998). É neste contexto que o presente trabalho buscou estudar as melhores condições de fragmentação da rocha logo nas etapas iniciais de todo o processo de um empreendimento minerário.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho de formatura tem como principal objetivo analisar como os parâmetros de desmonte influenciam na fragmentação da rocha, bem como avaliar a influência de tal aspecto nos custos totais de operação, principalmente relacionados à energia gasta na cominuição.

Com base na mineradora de pequeno porte analisada, buscou-se determinar quais são os parâmetros de desmonte que geram a redução dos custos totais de operação deste empreendimento, sendo, portanto, os parâmetros ideais a serem utilizados no plano de fogo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSUMO DE ENERGIA

As operações de britagem e moagem numa usina de beneficiamento representam um custo significativo das operações de um empreendimento minerário, tanto em termos financeiros quanto em consumo de energia. Segundo a empresa Orica (2016), estudos mostraram que a cominuição pode representar até 67% dos custos totais de uma mina (Figura 1) e pode consumir até 53% do total de energia utilizado em uma mineração (Figura 2).

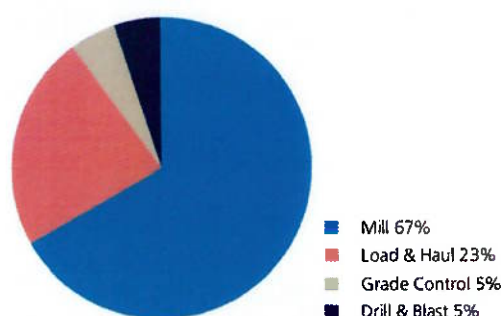


Figura 1. Divisão dos custos totais de uma mineração (Orica, 2016)

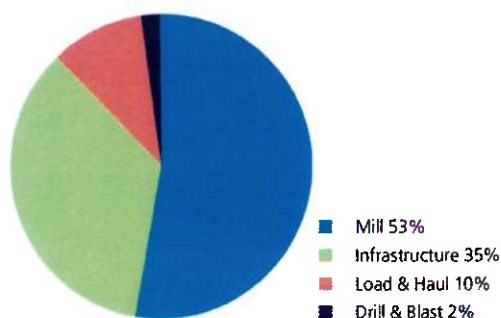


Figura 2. Divisão do consumo de energia em uma mineração, por área (Orica, 2016)

Através de outra análise de consumo de energia em cada unidade de operação em uma típica mineração de metálicos, incluindo lavra e beneficiamento, pode-se ter um bom entendimento sobre como a energia é utilizada num empreendimento minerário. Um estudo do *Department of Energy*, 2007 identificou todas as operações envolvidas e sua participação percentual no gasto total de energia como ilustrado na Figura 3.

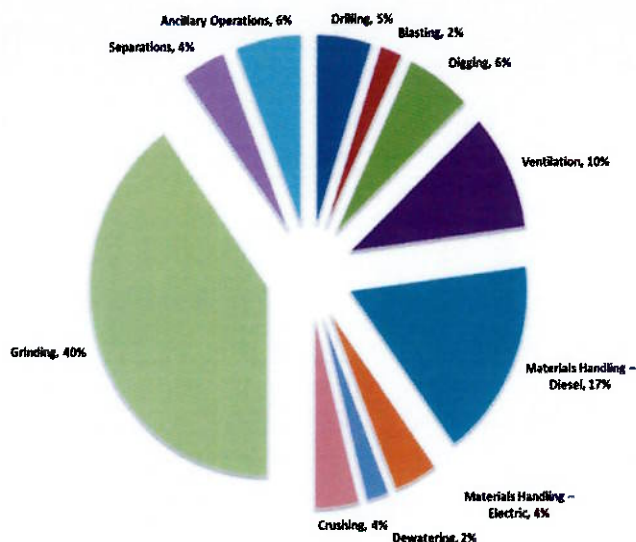


Figura 3. Distribuição de consumo de energia num empreendimento minerário (DOE, 2007).

Neste estudo a moagem e a britagem representam juntos 44% do consumo energético, enquanto a perfuração e desmonte apenas 7%. Apesar dos valores serem um pouco diferentes dos apresentados anteriormente (Orica, 2016), ambos os estudos apontam para uma diferença significativa de consumo de energia entre perfuração e desmonte e as operações subsequentes de cominuição, o que sugere que a melhor área para se buscar otimizações é mesmo a área de desmonte, onde a energia é utilizada de forma mais eficiente, a fim de reduzir o consumo de energia na cominuição por britagem e moagem. A energia utilizada na perfuração é elétrica, mas em alguns casos é utilizado diesel, enquanto toda a energia do desmonte está nos agentes explosivos utilizados, como emulsões, booster, cordel, entre outros.

Para reforçar esta ideia, apresentam-se também os estudos realizados por Baranov e Tangeav (1988) sobre a eficiência de cada um dos processos de cominuição. Segundo eles, o processo de britagem é 16% menos eficiente do que o desmonte, enquanto a moagem, por sua vez, se apresenta como 9 vezes menos eficiente que o uso de explosivos. Além de mostrar que o desmonte é significativamente mais eficiente do que as operações de britagem e que essa diferença é ainda mais significativa quanto se trata da moagem, tais resultados indicam que, de fato, as operações de perfuração e desmonte são a maneira mais efetiva e econômica de se gerar finos, deixando o material que chega na usina (ROM) o mais cominuído possível para facilitar as operações de britagem e moagem e, assim, reduzir a energia elétrica necessária no processo.

Segundo Murr *et al.* (2015), a otimização das operações de perfuração e desmonte através da incorporação das melhores tecnologias disponíveis não necessariamente aumenta os custos totais do empreendimento se ocorrer uma economia na britagem e na moagem. Um pequeno aumento na energia de detonação, se voltada à uma melhor fragmentação, pode gerar uma redução significativa nos custos de cominuição.

Por fim, ainda sobre a questão energética, Bond (1952), em sua Terceira Teoria da Cominuição, define uma relação entre a granulometria de entrada e saída nos equipamentos de moagem e a energia específica necessária, em kWh/t, para que essa redução seja obtida. Segundo Bond,

$$W = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Onde: F = d80 da alimentação (em μm);

P = d80 do produto (em μm);

WI = Work Index do minério (kWh/t); e

W = consumo energético específico (em kWh/t) necessário para a redução desejada.

Pela equação nota-se que, para uma mesma granulometria de saída, quanto menor a granulometria do material de entrada, menor o gasto energético necessário e, portanto, menor o custo envolvido nesta operação. A partir disso, reforça-se a importância de se obter uma fragmentação adequada nas operações de desmonte.

2.2 PARÂMETROS DAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO E DESMONTE

Considerando que o foco do presente estudo será na otimização das operações iniciais de cominuição, é preciso entender todos os parâmetros envolvidos neste processo.

2.2.1 Perfuração

A perfuração de rochas é a primeira etapa do processo e tem como objetivo criar furos em uma distribuição e geometria adequada nos maciços que se pretende detonar, para que estes recebam as cargas explosivas e os acessórios iniciadores (Silva, 2009). Para tal atividade podem ser utilizadas perfuratrizes hidráulicas e

pneumáticas, através de métodos como percussão, rotação, rotopercussão, entre outros.

Os dois principais parâmetros que caracterizam furos de desmonte são: diâmetro e profundidade. Em relação ao diâmetro, este depende da finalidade para a qual o furo foi realizado. No caso específico de detonações, os fatores que influenciam na determinação do tamanho do furo são, por exemplo, o tamanho desejado dos fragmentos após o desmonte, o tipo de explosivo a ser utilizado, a vibração máxima a qual o terreno pode ser submetido, tamanho do equipamento disponível para perfuração, carregamento e transporte, produção horária requerida, entre muitos outros. Segundo Silva (2009), em geral, em grandes minerações a céu aberto, quanto maior o diâmetro dos furos, menores os custos de perfuração e detonação por metro cúbico desmontado ou tonelada de rocha carregada. Já em minas subterrâneas, onde os equipamentos são determinados pelo método de lavra adotado, o diâmetro variará em função destes equipamentos. A Figura 4 ilustra a influência do diâmetro no número de furos, na fragmentação da rocha, na altura da pilha de material desmontado e no porte do equipamento de carregamento.

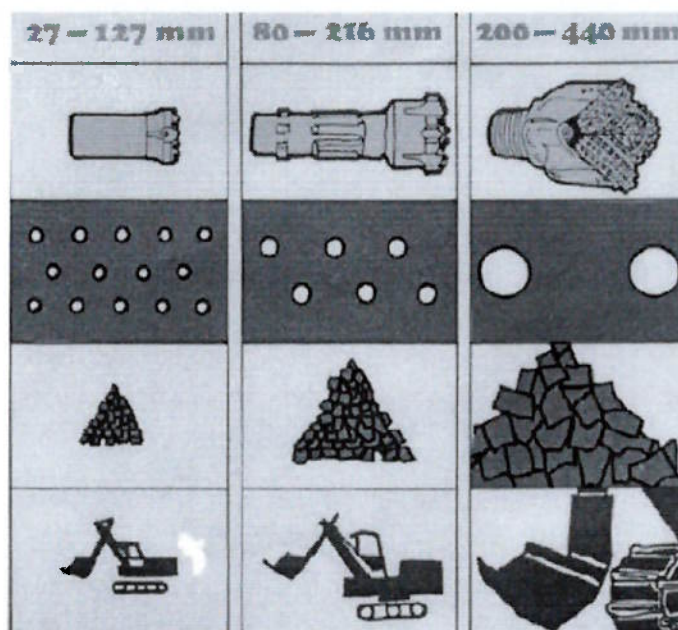


Figura 4. Influência do diâmetro do furo (Silva, 2009).

Já em relação à profundidade do furo, esta depende do tamanho das bancadas adotadas em uma mina a céu aberto, ou do avanço desejado em uma mina subterrânea. Tais aspectos, por sua vez, determinam a escolha do equipamento de

perfuração, o qual deve ter hastes e sistemas de avanço compatíveis com tais profundidades.

Outra variável é a malha de perfuração, a qual representa como os furos estarão distribuídos considerando o espaçamento e afastamento desejados (definições apresentadas na seção 1.3.2). A geometria das malhas de perfuração pode ser quadrada, retangular ou estagiada, conforme ilustrado na Figura 5.

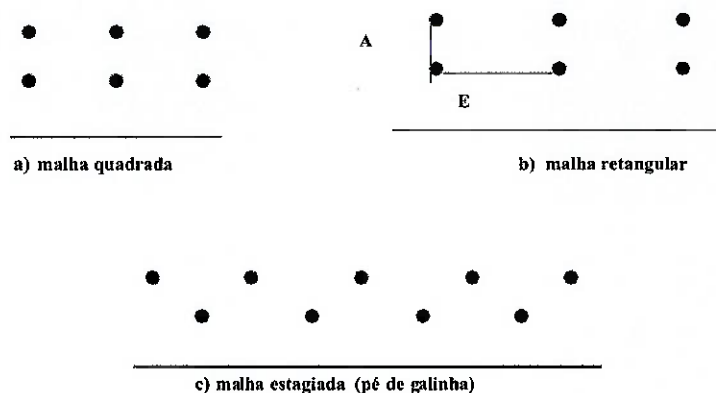


Figura 5. Malhas de perfuração (Silva, 2009).

As malhas quadradas e retangulares são mais fáceis de perfurar, dado o maior tempo de locomoção entre os furos, enquanto nas malhas estagiadas a geometria alternada dos furos dificulta a perfuração (Silva, 2009). Porém, estudos mostram que, comparando malhas quadradas e estagiadas com a mesma área de influência em torno de um furo, existe uma diferença na distribuição de energia ao longo da malha de perfuração, onde a distribuição na malha quadrada foi 21% menos homogênea do que na malha estagiada. A explicação dada para tal fato é que numa malha quadrada a maior distância entre dois furos é maior do que a maior distância entre dois furos de uma malha estagiada, fazendo assim com que a carga explosiva esteja melhor distribuída no maciço rochoso (Murr *et al.*, 2015). Com tais resultados, é possível dizer que nesta situação a fragmentação obtida no desmonte será mais fina e os fragmentos individuais serão menos resistentes à britagem e moagem devido ao aumento de micro fraturas internas.

2.2.2 Desmonte

Entre os vários tipos de desmonte existentes, o desmonte por explosivos é um dos mais utilizados nas minerações ao redor do mundo. O uso de explosivos na mineração tem por objetivo principal a redução do tamanho do maciço rochoso

através da fragmentação e distribuição granulométrica adequadas que permitem carregamento, transporte, manuseio e beneficiamento eficientes. Ou seja, busca-se um produto desmontado sem excesso de finos ou blocos muito grandes (matacos) que exijam um desmonte secundário.

Para se realizar um desmonte é preciso definir alguns parâmetros, que são reunidos no chamado plano de fogo. Cada bancada ou avanço de uma mineração possui seu respectivo plano de fogo e este contém todas as informações necessárias para a realização do desmonte.

Os elementos geométricos de um plano de fogo são ilustrados na Figura 6 e cada um dos parâmetros é descrito abaixo (Iramina, 2016).

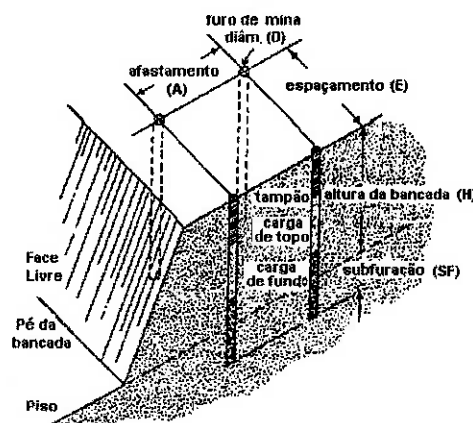


Figura 6. Elementos geométricos de um plano de fogo a céu aberto (Iramina, 2016).

- Face livre - superfície exposta da rocha, para onde a carga de explosivo direcionará os esforços de fragmentação;
- Altura da bancada (H);
- Diâmetro dos furos - dependem da perfuratriz, da produção desejada associada à altura da bancada e da capacidade da caçamba das máquinas;
- Afastamento (A) - distância entre a face livre e a 1ª linha de furos ou entre 2 linhas consecutivas de furos;
- Espaçamento (E) - distância entre furos consecutivos de uma mesma linha;
- Repé - irregularidade junto ao pé da bancada.
- Subfuração (SF) - comprimento do furo abaixo do nível do piso da bancada para arrancar a parte mais confinada da rocha;
- Colar e Tampão - parte vazia na parte superior do furo (junto à sua boca) deixada após o carregamento com explosivos.

Tais parâmetros são definidos por meio de estudos teóricos apoiados em experiências de campo e também por regras práticas obtidas depois da realização de diversos desmontes de rocha. Na maioria dos casos as regras práticas estabelecem valores iniciais para o plano de fogo e com os resultados dos desmontes realizados em uma determinada mineração, os valores vão sendo ajustados até se chegar a um resultado ótimo.

Além dos parâmetros apresentados até agora, alguns outros fatores também influenciam no resultado de uma detonação, entre eles: características do maciço rochoso, razão de carga (quantidade de explosivo utilizado por metro cúbico de rocha desmontada), tipo/característica do explosivo, acessórios utilizados, sistema de iniciação, sequenciamento dos furos, etc.

A fim de otimizar os resultados de um desmonte, todos os parâmetros citados anteriormente podem ser variados para obter, por exemplo, uma fragmentação mais adequada ao circuito de britagem e moagem em uso, buscando assim minimizar o consumo de energia e maximizar a capacidade da planta.

Vários estudos já foram realizados na área, entre eles: Singh *et al.* (2016), que observou a variação de parâmetros de desmonte em três minas da Índia; Strelec *et al.* (2011), Mohamed *et al.* (2015) e Martins (s.d.), que estudaram o efeito da variação da razão de carga em desmontes a céu aberto; Cardu *et al.* (2014), Cardu *et al.* (2015) e Hettinger (2015), que estudaram como o sequenciamento dos furos e tempos de retardo entre eles afeta a fragmentação obtida num desmonte; entre vários outros estudos já publicados e ainda em andamento.

No presente trabalho de formatura serão analisadas alterações nos parâmetros de razão de carga e malha de perfuração com base em dados de operação da empresa para então analisar o efeito dessas modificações na fragmentação obtida.

2.3 ESTUDOS REALIZADOS EM OUTRAS MINERAÇÕES

A seguir apresentam-se alguns exemplos mostrando como a melhora da fragmentação do material que vem da cava, por meio de mudanças em parâmetros de perfuração e/ou desmonte, melhorou significativamente os resultados das operações de britagem, moagem e também de aspectos como recuperação eficiência do processo como um todo.

1) Mina de tântalo, a Sons of Gwalia's Greenbushes já havia feito anteriormente um teste aumentando a razão de carga do desmonte, o qual resultou em melhorias significantes nos processos de carregamento e transporte e de cominuição. Com isto, passaram a considerar a realização de mais mudanças nos parâmetros de desmonte para obter ganhos ainda maiores. Em parceria com a empresa Orica, a mina começou a caracterizar as fragmentações obtidas nos desmontes sob diferentes padrões de carregamento e correlacioná-las à performance dos processos de cominuição seguintes. Foram obtidas informações acerca dos seguintes parâmetros: caracterização do minério, carregamento de explosivo, produtividade da escavadeira, fragmentação da pilha gerada após a detonação, alimentação do britador e moinho e distribuição granulométrica dos produtos, capacidade/fluxo de material no britador e no moinho, consumo de energia e recuperação. Os resultados mostraram que através de mudanças no plano de fogo é possível melhorar a produtividade da escavadeira, a fragmentação do ROM e também aumentar o fluxo de material nas etapas de cominuição na usina. A Figura 7 apresenta alguns dos resultados obtidos.

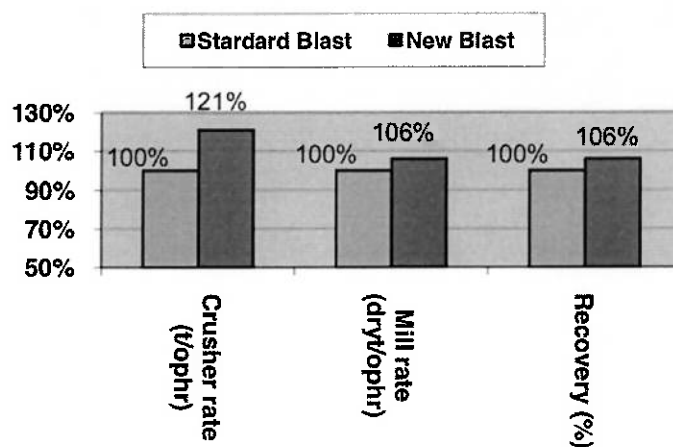


Figura 7. Resultados obtidos com a melhora no desmonte (Orica, s.d.)

Vale ressaltar que os maiores custos gerados pelo novo plano de fogo foram compensados pela economia em consumo de energia, menor desgaste no britador primário, menores custos de carregamento e transporte e melhor desempenho da britagem e da planta de beneficiamento de tântalo (Orica, s.d.).

2) Para avaliar a variação dos resultados do desmonte de acordo com parâmetros do processo, Murr *et al.* (2015) fizeram uma simulação utilizando o software JKSImMet (versão 6.01,2014). O circuito era composto por um moinho SAG, alimentado com minério com abertura de 212 mm, cujo diâmetro interno era de 12 m, comprimento de 6 m e grelha de 20 mm. A carga de bolas foi definida em 12% em volume e a bola de maior tamanho era de 125 mm. A descarga do moinho consistia numa polpa com 70% de sólidos que era alimentada numa peneira de 12 mm de abertura. Nas diferentes simulações rodadas foram variados parâmetros como razão de carga e taxa de alimentação, fornecendo assim o consumo de energia por tonelada de material em cada um dos cenários simulados. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os resultados obtidos por Murr *et al.* (2015).

Tabela 1. Produtividade do moinho versus razão de carga para o granito tipo "Stanstead" (Murr *et al.*, 2015)

Granito "Stanstead"				
Q (kg/m ³)	0	0,39	0,78	1,17
Energia (kWh)	11578	11644	11665	11668
Taxa de alimentação (t/h)	2075	3325	3775	3875
Energia específica (kWh/t)	5,58	3,50	3,10	3,01

Tabela 2. Produtividade do moinho versus razão de carga para o granito tipo "Laurentian" (Murr *et al.*, 2015)

Granito "Laurentian"				
Q (kg/m ³)	0	0,39	0,78	1,17
Energia (kWh)	11511	11569	11597	11582
Taxa de alimentação (t/h)	1300	2100	2500	2400
Energia específica (kWh/t)	8,85	5,51	4,64	4,83

Tabela 3. Produtividade do moinho versus razão de carga para o granito tipo "Barre" (Murr *et al.*, 2015)

Granito "Barre"				
Q (kg/m ³)	0	0,39	0,78	1,17
Energia (kWh)	11538	11597	11602	11619
Taxa de alimentação (t/h)	1700	2500	2700	2900
Energia específica (kWh/t)	6,79	4,64	4,30	4,01

Pela observação das tabelas acima, nota-se o efeito do aumento da razão de carga é a redução da energia necessária no moinho. Uma significativa redução ocorreu na primeira etapa, entre o material não desmontado e material desmontado com uma

razão de carga de 0,39 kg/m³. Apesar de não existir material não desmontado numa detonação, minério longe dos furos detonados ou ainda blocos isolados por descontinuidades ou por práticas incorretas de detonação, podem não ser afetados pela carga explosiva e, portanto, tal estudo mostrou que exigiriam maior energia durante sua cominuição. Por outro lado, notou-se que há um momento em que o aumento da razão de carga para de trazer benefícios ao desmonte, visto que num determinado ponto o aumento da carga explosiva passa a não mais diminuir o consumo de energia, como foi observado no caso do granito Laurentian. Mais estudos ainda serão realizados pelos autores para verificar e confirmar tais tendências.

3) Outros estudos apresentados pela Orica (2016):

- Redução do P80 da alimentação de 150 mm para 80 mm aumentou a capacidade e eficiência de uma mineração de metálicos em 40%.
- Em uma mina de cobre, o aumento da fração de minério passante em 25 mm de 18% para 45%, aumentou a capacidade da planta em 6,5% e reduziu o consumo específico de energia em 4,6%.
- Fazendo uma comparação com um desmonte convencional, a aplicação de uma técnica de detonação que utiliza uma maior razão de carga, chamada "*Ultra High Intensity Blasting*", aumentou a fração passante em 25 mm de 35% para 56%.

3.2 ANÁLISE DO DESMONTE NA FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA

A análise dos dados foi realizada a partir dos dados coletados em campo nas diversas visitas realizadas à mineração em questão. Esta análise foi composta pelo entendimento da relação entre a fragmentação da rocha no processo de desmonte e parâmetros como malha de desmonte e razão de carga. O principal aspecto levado em conta para avaliar a fragmentação foi a quantidade de matacos gerados no desmonte, isto é, blocos de rocha que precisam sofrer um desmonte secundário antes de serem carregados e transportados até o britador.

A análise da fragmentação foi realizada em três etapas, sendo a primeira etapa alterando apenas a malha de desmonte, a segunda alterando apenas a razão de carga e a última com alterações em ambos os parâmetros. Em todos os casos, os dados de campo foram adicionados numa planilha de Excel e, por meio de gráficos e linhas de tendência, foi possível verificar a existência de correlações entre eles.

Em relação à malha de desmonte, pode-se alterar os parâmetros de afastamento e espaçamento para se estabelecer a nova distância entre os furos e determinar como tal aspecto influencia na fragmentação da rocha. Neste projeto foram utilizadas as seguintes variações: 2,0 x 2,0; 2,0 x 2,5; 2,0 x 3,0; 2,5 x 3,0; 2,5 x 3,5; e 3,0 x 4,0 (sendo o primeiro número o afastamento, em metros, e o segundo, espaçamento entre os furos, também em metros).

Já em relação à razão de carga, que corresponde à quantidade, em gramas, de explosivo por tonelada de minério desmontada, tal parâmetro foi alterado para mais ou para menos a fim de avaliar qual é a relação entre a carga explosiva utilizada e a fragmentação obtida. As razões de carga utilizadas neste projeto foram: 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; e 0,2 (valores em kg/m^3).

3.3 ANÁLISE DO IMPACTO DA CURVA GRANULOMÉTRICA NA COMINUIÇÃO

Com os diversos cenários de alterações da malha de desmonte e da razão de carga, produtos de granulometrias diferentes são obtidos, ou seja, para cada uma das condições o ROM que entrará na planta de beneficiamento terá uma curva granulométrica específica. Neste mesmo sentido, é possível estabelecer uma relação entre a porcentagem de matacos gerados e malha e razão de carga utilizadas no desmonte.

A partir da fragmentação obtida, ou seja, do *top size* obtido no desmonte e de dados fornecidos pela Metso, fabricante dos britadores utilizados na planta em questão, como tabelas relacionando APF e capacidade e curvas granulométricas de produto em função do APF utilizado, foi possível analisar o impacto de um *top size* menor entrando no britador primário no consumo energético da moagem.

Nesta etapa, a porcentagem de matacos gerada foi relacionada ao APF necessário ao britador primário, o que por sua vez foi relacionado ao *top size* gerado pela britagem primária e APF necessário ao britador secundário. De acordo com a curva granulométrica do britador secundário, é possível determinar a granulometria de entrada nos moinhos e, com isso, calcular a energia relativa gasta na etapa de moagem para cada uma das condições de desmonte estudadas.

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE DESMONTE

Por fim, a partir de todos os cenários e resultados analisados foram determinados os parâmetros de desmonte, ou seja, as condições do plano de fogo que geraram a maior redução de custos em todo o processo.

Para isso, foi analisado o custo gasto a cada tonelada desmontada para cada uma das condições estudadas (tabela de preços de acordo com a malha e com a razão de carga) e o custo relativo da moagem do produto referente a tais condições.

A soma destes dois valores forneceu o custo global da operação e a combinação de malha e razão de carga que apresentou o menor custo total foi definida como a condição ótima de trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos oito primeiros meses do ano foram coletados diversos dados de controle da operação da mineradora. Entre todo o material lavrado, apenas dois minérios são cominuídos pelos moinhos, são eles: calcário calcítico e calcário dolomítico.

4.1 DADOS COLETADOS

Ao todo foram 50.000 dados coletados nos diversos setores de produção da mineradora, são eles: desmonte, britagem e moagem.

Neste trabalho de formatura foram considerados apenas os dados referentes ao desmonte, entre eles estão a malha, razão de carga, geração de matacos e os custos de desmonte, além dos dados referentes à cominuição, como as características dos britadores, a configuração dos mesmos e os custos relacionados.

Em relação aos dados de desmonte coletados, na Tabela 5 estão listados os dados de desmonte relacionados ao calcário calcítico e a Tabela 6 contém os dados de desmonte referentes ao calcário dolomítico.

Tabela 5. Dados referentes ao desmonte de calcário calcítico

ID	Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Razão de carga (kg/m³)	Mataco
1	2,0	3,5	0,476	13%
2	2,0	2,5	0,322	2%
3	2,0	3,0	0,534	4%
4	2,0	3,0	0,462	8%
5	2,0	3,0	0,667	0%
6	2,0	3,0	0,500	0%
7	2,0	3,0	0,603	8%
8	2,5	3,0	0,317	6%
9	2,5	3,0	0,444	2%
10	2,5	3,0	0,370	3%
11	2,5	3,0	0,417	2%
12	2,5	3,0	0,285	6%
13	2,5	3,5	0,594	0%
14	2,5	3,0	0,479	1%
15	2,5	3,0	0,684	0%
16	2,5	3,5	0,347	3%
17	2,5	3,5	0,440	5%
18	2,0	2,0	0,515	1%
19	3,0	4,0	0,759	10%
20	2,5	3,5	0,628	2%
21	2,5	3,5	0,429	5%
22	2,5	3,0	0,572	1%

23	2,5	3,0	0,572	2%
24	2,5	3,0	0,469	4%
25	2,5	3,0	0,785	0%
26	2,5	3,0	0,989	0%
27	2,5	3,0	0,502	2%

Tabela 6. Dados referentes ao desmonte de calcário dolomítico

<i>ID</i>	<i>Afastamento (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>Razão de carga (kg/m³)</i>	<i>Mataco</i>
1	2,5	4,0	0,337	2%
2	2,5	3,0	0,575	1%
3	3,0	4,0	0,462	7%
4	2,5	3,5	0,490	0%
5	3,3	4,0	0,462	0%
6	3,0	4,0	0,496	0%
7	3,3	4,3	0,507	0%
8	3,0	4,0	0,483	1%
9	2,5	3,5	0,937	0%
10	3,0	4,0	0,643	6%
11	3,0	4,0	0,443	2%
12	3,0	4,0	0,562	1%
13	3,0	4,0	0,492	1%
14	3,0	4,0	0,610	1%
15	3,0	4,0	0,496	1%

Nas duas tabelas, cada ID representa um fogo distinto, o afastamento e o espaçamento representam a distância entre os furos, a razão de carga é fornecida pela relação entre a quantidade de explosivo por volume de material desmontado e a última coluna mostra a porcentagem de matacos gerados, ou seja, blocos de rocha acima do tamanho limite que o britador primário tem capacidade de receber, em relação ao volume total de material desmontado.

Em relação aos dados do setor de britagem, na Tabela 7 estão descritas as características dos dois britadores que a empresa tem em sua operação.

Tabela 7. Característica dos britadores

<i>ID</i>	<i>Área</i>	<i>Equipamento</i>
1	Britador Primário	Britador de mandíbula de 1 eixo, modelo C125 da Metso Minerals, APF de 5,5 polegadas
2	Britador Secundário	Britador cônico da série HP, modelo HP400 da Metso Minerals, APF de 20 milímetros

4.2 IMPACTO DO DESMONTE NA OCORRÊNCIA DE MATAÇOS

Com base nos dados coletados, realizou-se primeiramente uma análise de como o desmonte influencia a fragmentação da rocha através da geração de matacos. A análise foi dividida em três etapas distintas, com diferentes características: a primeira com variações nos parâmetros da malha e com a quantidade de explosivos constante, a segunda com variações na razão de carga e com a malha constante e a terceira com alterações em ambos os parâmetros.

4.2.1 MALHA DE DESMONTE

A Figura 8, relacionada ao calcário calcítico, demonstra a linha de tendência obtida a partir dos dados coletados. A linha relaciona a área da malha, ou seja, a multiplicação entre o afastamento e o espaçamento, com a ocorrência de matacos.

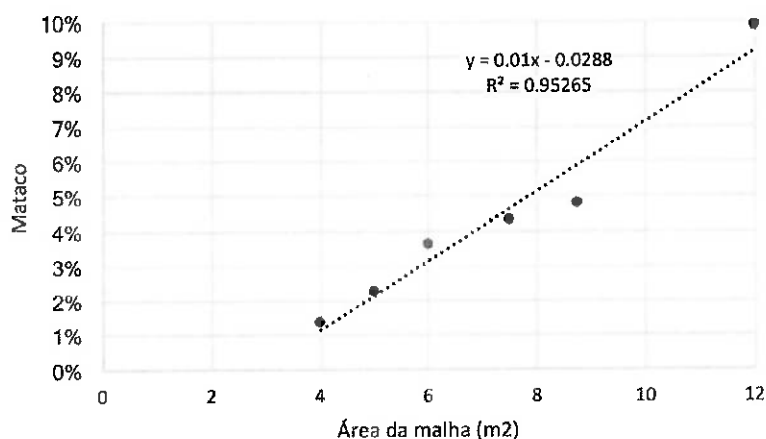


Figura 9. Influência da malha de desmonte na geração de matacos (calcário calcítico)

Já a Figura 9, apresenta os dados obtidos para os desmontes referentes ao calcário dolomítico.

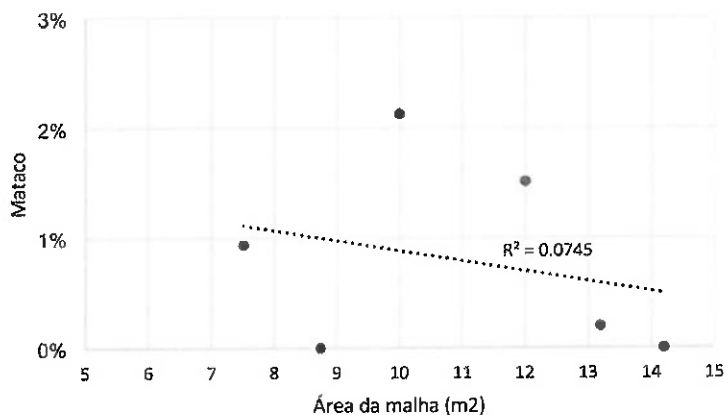


Figura 10. Influência da malha de desmonte na geração de matacos (calcário dolomítico)

Após a análise dos resultados obtidos, observa-se que, no caso do calcário calcítico, existe uma relação clara entre a área da malha de desmonte e a geração de matacos, criando-se uma proporcionalidade direta entre os dois parâmetros, ou seja, quanto menor a área da malha, menor será a geração de matacos.

Por outro lado, não é possível perceber uma correlação clara nos dados do calcário dolomítico. Tal fato pode ser justificado por alguns fatores, entre eles a grande variabilidade ou falta de padrão nos desmontes deste minério, visto o início recente de sua extração e comercialização, contaminação do minério com outros materiais, dada a proximidade do corpo mineral à superfície, ou até mesmo falha na obtenção dos dados.

4.2.2 RAZÃO DE CARGA

A Figura 10, relacionada ao calcário calcítico, demonstra a curva de tendência criada com base nos dados coletados de malha constante 2,5 m x 3,0 m. A curva correlaciona a razão de carga, que é a relação entre o peso do explosivo utilizado por volume de minério desmontado, com a ocorrência de matacos.

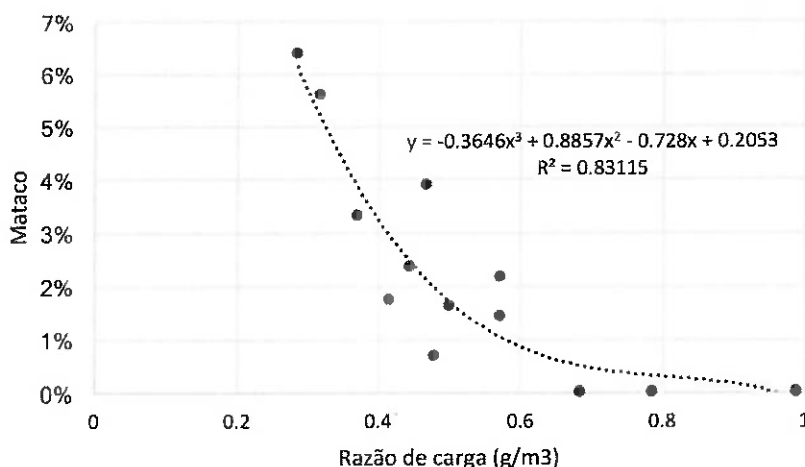


Figura 11. Influência da razão de carga na geração de matacos

A Figura 11, relacionada ao calcário dolomítico, apresenta os dados coletados para uma malha constante de 3,0 m x 4,0 m.

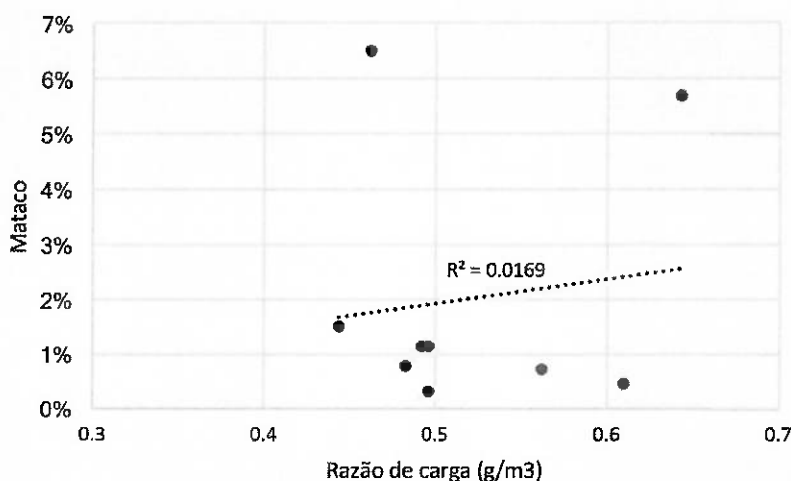


Figura 12. Influência da razão de carga na geração de matacos

Após a análise dos resultados obtidos, observa-se que, no caso do calcário calcítico, existe uma relação clara entre a razão de carga e a geração de matacos, criando-se uma proporcionalidade indireta entre os dois parâmetros, ou seja, quanto menor a razão de carga, maior será a geração de matacos.

Por outro lado, da mesma forma quando se tratou da malha de desmonte, não foi possível perceber uma correlação clara nos dados do calcário dolomítico. Em função dos diversos fatores que podem ter resultado na falta de relação entre os dados, decidiu-se por não considerar tal minério nas análises seguintes.

4.2.3 MALHA DE DESMONTE E RAZÃO DE CARGA

Na Figura 12 estão representadas seis curvas referentes à alteração simultânea da malha de desmonte e da razão de carga a fim de determinar a geração de matacos em cada conjunto de parâmetros para o minério calcário calcítico. Cada curva representa uma malha distinta, 2,0 x 2,0 ; 2,0 x 2,5 ; 2,0 x 3,0 ; 2,5 x 3,0 ; 2,5 x 3,5 ; 3,0 x 4,0 e os pontos em cada curva, da esquerda pra direita representam as razões de carga, 1,0 ; 0,9 ; 0,8 ; 0,7 ; 0,6 ; 0,5 ; 0,4 ; 0,3 ; 0,2.

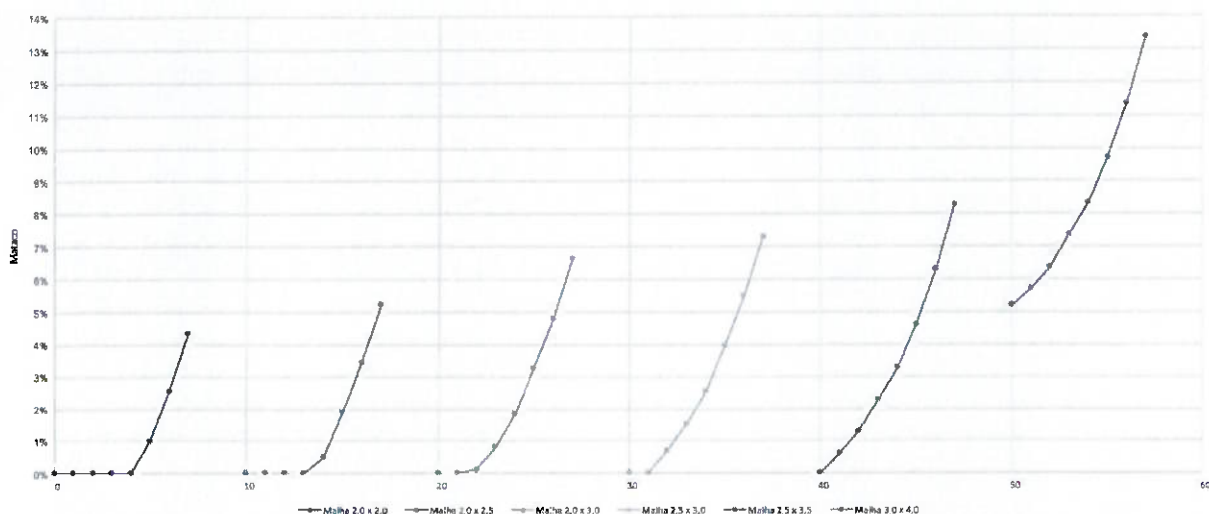


Figura 13. Influência da malha de desmonte e da razão de carga na geração de maticos

Para cada conjunto de parâmetros analisados, é gerada uma determinada quantidade de maticos. Como esperado, com base nas análises anteriores, quanto maior a malha e menor a razão de carga, maior é a ocorrência de maticos, podendo chegar a mais de 13% do volume desmontado para a condição de malha 3,0 x 4,0 m e 0,2 kg/m³ de razão de carga.

4.3 IMPACTO DA FRAGMENTAÇÃO NA COMINUIÇÃO

O processo de cominuição da mineradora analisada é composta pela etapa de britagem, moagem e pulverização. As possíveis alterações a serem realizadas na etapa de britagem foram analisadas com base nos valores teóricos de cada equipamento, retirados do Manual de Britagem da Metso (2005). Já para a etapa de moagem, que foi analisada exclusivamente pelo seu consumo energético, utilizou-se apenas os resultados obtidos pela fórmula do WI de Bond.

Atualmente para a britagem primária, a mineradora utiliza o britador mandíbulas modelo C125 da Metso Minerals com APF de 5,5". Segundo os dados teóricos obtidos pela Figura 13, este britador pode ter uma APF mínima de 4" e uma APF máxima de 10", criando uma grande possibilidade de variação na sua configuração.

APF	C63	C80	C95	C100	C105	C110	C125	C140	C145	C160	C200	C3055
mm (pol.)	Capacidades em t/h com alimentação de material com densidade aparente de 1,6 t/m³											
40 (1 5/8)	40	65										
50 (2)	55	80										
60 (2 3/8)	65	95	120									
70 (2 3/4)	80	115	140	150	155	190						240
80 (3 1/8)	95	130	160	170	175	210						270
90 (3 1/2)	110	150	180	190	200	235						295
100 (4)	120	165	200	215	220	255	290					325
125 (5)		210	250	265	280	310	350	385	400			390
150 (6)		250	300	315	335	370	410	455	470	520		460
180 (7)		290	360	370	390	425	470	520	540	595	760	530
200 (8)				420	445	480	530	590	610	675	855	600
225 (9)							590	655	680	750	945	
250 (10)							650	725	750	825	1040	
275 (11)									820	900	1130	
300 (12)										980	1225	

Figura 14. Capacidade produtiva do britador primário C125 em função da APF (Metso, 2005)

Com base no intervalo de APF possíveis, obtêm-se um intervalo de produtos que este britador irá gerar com base na APF escolhida. Por meio da Figura 14, é possível notar que o *top size* do produto de saída deste britador pode variar de 160 mm até 380 mm.

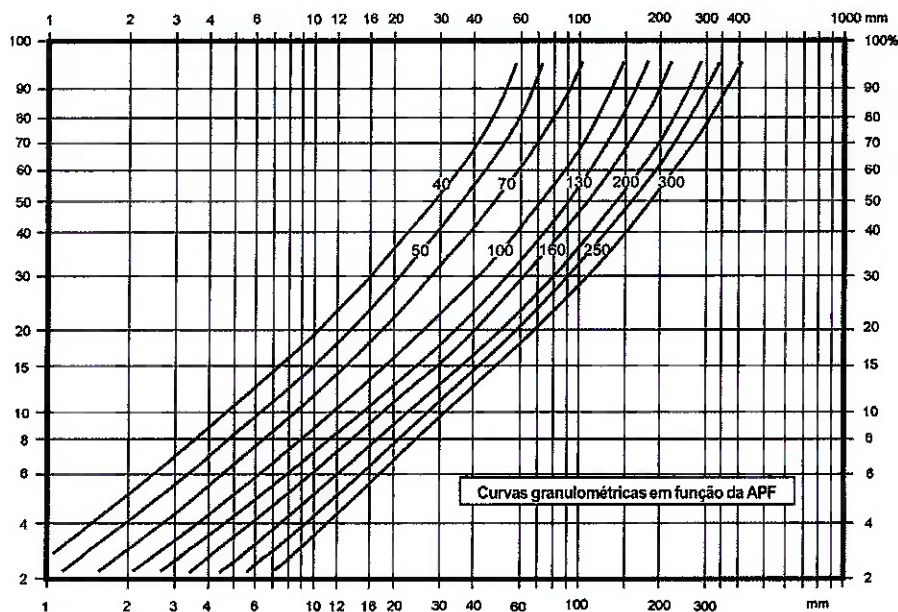


Figura 15. Curva granulométrica na saída do britador C125 em função da APF (Metso, 2005)

Em relação à britagem secundária, atualmente a mineradora tem um britador cônico modelo HP400 da Metso Minerals e utiliza uma APF de 20 mm. Segundo os dados teóricos obtidos pela Figura 15, este britador pode ter uma APF mínima de 14 mm e uma APF máxima de 30 mm, criando uma grande possibilidade de variação na sua configuração.

Modelo	Câmara	STANDARD		CABEÇA CURTA	
		Ajuste mínimo "A" ^{"1"} mm (pol.)	Abertura de alimentação "B" ^{"2"} mm (pol.)	Ajuste mínimo "A" ^{"1"} mm (pol.)	Abertura de Alimentação "B" ^{"2"} mm (pol.)
HP 100	Extra fino			6 (0,24")	20 (0,79")
	Fino			9 (0,35")	50 (1,97")
	Médio			9 (0,35")	70 (2,76")
	Grosso			13 (0,51")	100 (3,94")
	Extra grosso			21 (0,83")	150 (5,91")
HP 200	Extra fino			6 (0,24")	25 (0,98")
	Fino	14 (0,55")	95 (3,74")	6 (0,24")	25 (0,98")
	Médio	17 (0,67")	125 (4,92")	6 (0,24")	54 (2,13")
	Grosso	19 (0,75")	185 (7,28")	10 (0,39")	76 (2,99")
	Extra grosso				
HP 300	Extra fino			6 (0,24")	25 (0,98")
	Fino	13 (0,51")	107 (4,21")	6 (0,24")	25 (0,98")
	Médio	16 (0,63")	150 (5,91")	8 (0,31")	53 (2,09")
	Grosso	20 (0,79")	211 (8,31")	10 (0,39")	77 (3,03")
	Extra grosso	25 (0,98")	233 (9,17")		
HP 400	Extra fino			6 (0,24")	30 (1,18")
	Fino	14 (0,55")	111 (4,37")	6 (0,24")	40 (1,57")
	Médio	20 (0,79")	198 (7,80")	8 (0,31")	52 (2,05")
	Grosso	25 (0,98")	252 (9,92")	10 (0,39")	92 (3,62")
	Extra grosso	30 (1,18")	299 (11,77")		
HP 500	Extra fino			6 (0,24")	35 (1,38")
	Fino	16 (0,63")	133 (5,24")	8 (0,31")	40 (1,57")
	Médio	20 (0,79")	204 (8,03")	10 (0,39")	57 (2,24")
	Grosso	25 (0,98")	286 (11,26")	13 (0,51")	95 (3,74")
	Extra grosso	30 (1,18")	335 (13,19")		
HP 800	Extra fino				
	Fino	16 (0,63")	219 (8,62")	5 (0,20")	33 (1,30")
	Médio	25 (0,98")	267 (10,51")	10 (0,39")	92 (3,62")
	Grosso	32 (1,26")	297 (11,69")	13 (0,51")	155 (6,10")
	Extra grosso	32 (1,26")	353 (13,90")		

Figura 16. APF do britador secundário HP400 em função do material de entrada (Metso, 2005)

Com base no intervalo de APF possíveis, obtêm-se um intervalo de produtos que este britador irá gerar com base na APF escolhida. Por meio da Figura 16, é possível notar que o *top size* do produto de saída deste britador pode variar de 26 mm até 58 mm.

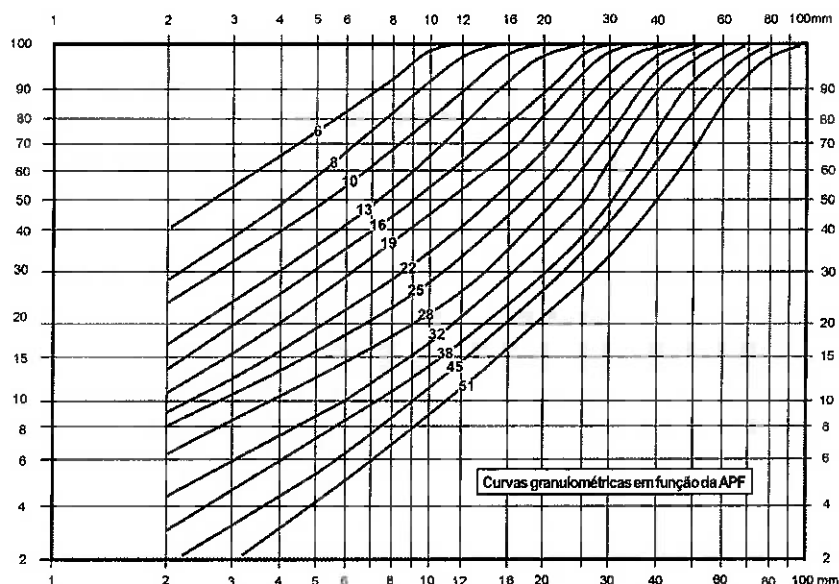


Figura 17. Curva granulométrica na saída do britador HP400 em função da APF (Metso, 2005)

As diversas possibilidades de escolha da APF do britador secundário irão impactar diretamente os custos energéticos envolvidos na moagem. Por meio da fórmula de Bond apresentada abaixo é possível notar que o tamanho do produto de entrada no moinho, denominado pela letra F, tem um impacto direto no consumo energético, ou seja, quanto maior o tamanho de partícula da entrada do moinho, maior será o consumo energético da moagem, considerando, nos dois casos, um produto de mesma granulometria.

$$W = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Com base nas informações de cominuição apresentadas, nos próximos tópicos foram correlacionadas as informações de desmonte e cominuição para se determinar uma conclusão final de como as etapas afetam o resultado global.

4.4 RELAÇÃO DO DESMONTE COM A BRITAGEM

A Tabela 8, obtida experimentalmente, relaciona a quantidade de mataco gerado na etapa de desmonte com a APF necessária a ser utilizado no britador primário. Observa-se que quanto maior a porcentagem de mataco, maior deverá ser a APF do britador primário.

Tabela 8. Relação entre a geração de maticos e a APF do britador primário

<i>ID</i>	<i>Mataco</i>	<i>APF do Britador Primário</i>
1	0%	4"
2	0% e 3%	5"
3	3% e 6%	6"
4	6% e 9%	7"
5	9% a 12%	8"
6	12% a 15%	9"

Com base na APF do britador primário e com auxílio das Figuras 15 e 16, é possível determinar qual será a APF do britador secundário. As relações estão exemplificadas na Tabela 9.

Tabela 9. Relação entre a APF do britador primário e a APF do britador secundário

<i>ID</i>	<i>APF do Britador Primário</i>	<i>APF do Britador Secundário</i>
1	4"	14 mm
2	5"	20 mm
3	6"	20 mm
4	7"	20 mm
5	8"	25 mm
6	9"	25 mm

Tendo-se a APF do britador secundário e levando em conta a fórmula de Bond apresentada no tópico anterior, criou-se uma relação proporcional do gasto energético. Como atualmente eles utilizam a APF de 20 mm para o britador secundário, uma redução para 14 mm na APF gera uma redução de 5,1% no consumo energético do moinho e um aumento para 25 mm na APF gera um aumento de 2,7% no consumo energético, conforme é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10. Relação entre a APF britador secundário e o consumo energético do moinho

<i>ID</i>	<i>APF do Britador Secundário</i>	<i>W</i>
1	14 mm	94,9%
2	20 mm	100,0%
3	20 mm	100,0%
4	20 mm	100,0%
5	25 mm	102,7%
6	25 mm	102,7%

Por último, com base em todas as relações apresentadas anteriormente, chega-se em uma relação direta entre a porcentagem de mataco existente e o consumo energético relativo do moinho, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Compilado da relação entre o Mataco e a energia elétrica consumida no moinho

<i>ID</i>	<i>Mataco</i>	<i>W</i>
1	0%	94,9%
2	0% e 3%	100,0%
3	3% e 6%	100,0%
4	6% e 9%	100,0%
5	9% a 12%	102,7%
6	12% a 15%	102,7%

4.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Com a determinação da relação de maticos produzidos no desmonte com o consumo energético do moinho, foram adicionados os custos de cada uma dessas etapas para se determinar quais são os parâmetros ideais para se obter o menor custo operacional global da mineradora. Por meio de dados coletados, tem-se que, por exemplo, um desmonte com malha de 2,5 x 3,5 e razão de carga de 0,5 kg/m³ gera um custo de R\$ 1,00 por tonelada de material desmontado. Na Tabela 12 estão descritos os custos de desmonte para cada um dos parâmetros analisados. No eixo y desta tabela estão as razões de carga (em kg/m³) e no eixo x estão descritas as áreas das malhas de desmonte (em metros quadrados).

Tabela 12. Custo de desmonte em função da área da malha e da razão de carga

	4	5	6	7,5	8,75	12
0,20	R\$0,79	R\$0,63	R\$0,53	R\$0,42	R\$0,40	R\$0,29
0,30	R\$1,18	R\$0,95	R\$0,79	R\$0,63	R\$0,60	R\$0,44
0,40	R\$1,58	R\$1,26	R\$1,05	R\$0,84	R\$0,80	R\$0,58
0,50	R\$1,97	R\$1,58	R\$1,31	R\$1,05	R\$1,00	R\$0,73
0,60	R\$2,36	R\$1,89	R\$1,58	R\$1,26	R\$1,20	R\$0,88
0,70	R\$2,76	R\$2,21	R\$1,84	R\$1,47	R\$1,40	R\$1,02
0,80	R\$3,15	R\$2,52	R\$2,10	R\$1,68	R\$1,60	R\$1,17
0,90	R\$3,54	R\$2,84	R\$2,36	R\$1,89	R\$1,80	R\$1,31
1,00	R\$3,94	R\$3,15	R\$2,63	R\$2,10	R\$2,00	R\$1,46

Em relação aos custos energéticos da moagem, obteve-se experimentalmente que 100% do consumo energético, denominado por W, tem um custo de R\$ 35,00 por tonelada de material moído, portanto a Tabela 13 mostra o custo de moagem de cada um dos parâmetros.

Tabela 13. Custo de moagem em função da área da malha e da razão de carga

	4	5	6	7,5	8,75	12
0,20	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,95
0,30	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,95
0,40	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,95
0,50	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00
0,60	R\$33,22	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00
0,70	R\$33,22	R\$33,22	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00
0,80	R\$33,22	R\$33,22	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00	R\$35,00
0,90	R\$33,22	R\$33,22	R\$33,22	R\$33,22	R\$35,00	R\$35,00
1,00	R\$33,22	R\$33,22	R\$33,22	R\$33,22	R\$33,22	R\$35,00

Por fim, tem-se uma somatória dos custos de desmonte com os custos de moagem para se determinar as condições de desmonte que irão trazer o menor custo operacional global para a mineradora. A Tabela 14 mostra os custos globais para cada um dos cenários analisados.

Tabela 14. Custo total em função da área da malha e da razão de carga

	4	5	6	7,5	8,75	12
0,20	R\$35,79	R\$35,63	R\$35,53	R\$35,42	R\$35,40	R\$36,24
0,30	R\$36,18	R\$35,95	R\$35,79	R\$35,63	R\$35,60	R\$36,38
0,40	R\$36,58	R\$36,26	R\$36,05	R\$35,84	R\$35,80	R\$36,53
0,50	R\$36,97	R\$36,58	R\$36,31	R\$36,05	R\$36,00	R\$35,73
0,60	R\$35,58	R\$36,89	R\$36,58	R\$36,26	R\$36,20	R\$35,88
0,70	R\$35,97	R\$35,42	R\$36,84	R\$36,47	R\$36,40	R\$36,02
0,80	R\$36,37	R\$35,74	R\$37,10	R\$36,68	R\$36,60	R\$36,17
0,90	R\$36,76	R\$36,05	R\$35,58	R\$35,11	R\$36,80	R\$36,31
1,00	R\$37,15	R\$36,37	R\$35,84	R\$35,32	R\$35,22	R\$36,46

Com base na Tabela 14 é possível perceber que o menor custo global é gerado pela malha de área $7,5 \text{ m}^2$, ou seja, $2,5 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ e com razão de carga de $0,9 \text{ kg/m}^3$.

Interessante notar que o maior custo está atrelado a maior razão de carga e menor área da malha. Portanto conclui-se que não se pode simplesmente aumentar a fragmentação da rocha no desmonte para se obter os custos mínimos de OPEX. É necessário realizar uma análise individual da mineradora para determinar qual é o parâmetro ideal no processo para se minimizar os custos.

5 CONCLUSÕES

Os parâmetros de desmonte analisados, malha de desmonte e razão de carga, têm grande influência na fragmentação da rocha. Alterações nesses parâmetros podem produzir de 0% a 13% de maticos no material desmontado, sendo que quanto menor a malha de desmonte e maior a razão de carga utilizada, menor será a ocorrência de maticos no desmonte.

Em relação à etapa de britagem, conclui-se que quanto menor a granulometria do material de entrada, menor será a granulometria do material de saída desta etapa. Com isto, é possível reduzir até 5,1% o consumo energético dos moinhos, que são responsáveis pelo maior consumo energético da mineradora. Por outro lado, o aumento da granulometria do material pode gerar um aumento de consumo energético dos moinhos de até 2,7% em relação ao consumo atual.

Com base em todas as 56 possíveis combinações de área de malha de desmonte com razão de carga, determinou-se o custo de desmonte e de moagem que cada combinação gerou e a partir disto, conclui-se que cada combinação gera um custo total distinto.

A combinação ótima para esta mineradora para o desmonte do calcário calcítico é um desmonte com uma malha de área de $7,5 \text{ m}^2$, com 2,5 m de afastamento por 3,0 m de espaçamento e uma razão de carga de $0,9 \text{ kg/m}^3$. Esta combinação gera um custo de R\$ 35,11 por tonelada de material processado.

Apesar dos custos de moagem terem o maior impacto nos custos totais de uma mineradora deste porte, reduzir ao máximo a fragmentação da rocha na etapa de desmonte não gera os menores custos globais. É interessante notar que ele é responsável por gerar o maior custo global, aumentando os custos em 6% em relação ao custo mínimo. Portanto, conclui-se que é necessário realizar uma análise individual para cada minério em cada mineradora para se determinar os parâmetros ideais que irão trazer os menores custos globais.

REFERÊNCIAS

- BARANOV E. G. & TANGEAV I. A. **Energy principles for analysis and optimization of mining and ore preparation processes**. 1988, p. 342.
- BOND, F. C. **The Third Theory of Comminution**, Mining Engineering, May, 1952, p 484-494.
- CARDU, M.; SECCATORE, J; VAUDAGNA, A.; REZENDE; A.; GALVÃO, F.; BETTENCOURT, J.; TOMI G. **Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting – Part I**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 67(3), 337-342, jul-sep, 2014.
- CARDU, M.; SECCATORE, J; VAUDAGNA, A.; REZENDE; A.; GALVÃO, F.; BETTENCOURT, J.; TOMI G. **Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting – Part II**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 68(4), 455-462, oct-dec, 2015.
- DELBONI, H. **Notas de aula da disciplina PMI3215 - Tratamento de Minérios: Cominuição e Classificação**, do curso de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. São Paulo/SP, Agosto, 2016.
- DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **Mining energy bandwidth study**. U.S. Department of Energy Industrial Technologies Program: BCS Corporation, 2007.
- ELORANTA, J. **Selection of powder factor in large diameter blastholes**, EXPLO 95 Conference, AusIMM, Brisbane, September, 1995. PP 25-28.
- HETTINGER, M. R. **The effects of short delay times on rock fragmentation in bench blasts**. Masters theses. Missouri University of Science and Technology, 2015.
- INFOMINE. **Fragmentation section - Breaking News**. Improving fragmentation means better mining and can cut costs in many areas of the process. 2008.
- IRAMINA, W. S. **Aula 4: Operações unitárias – Desmonte de rochas por explosivos**. Material dado em aula da disciplina PMI2842 (Perfuração e Desmonte de Rochas) do curso de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. Agosto, 2016.

IRAMINA, W. S. **Aula 5: Plano de Fogo. Material dado em aula da disciplina PMI2842 (Perfuração e Desmonte de Rochas)** do curso de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. Agosto, 2016.

KOJOVIC T, KANCHIBOTLA S S, POETSCHKA N, CHAPMAN J. **The effect of blast design on the lump:fines ratio at Marandoo iron ore operations**, Proc. Mine-Mill Conf., Brisbane, 1998.

KOJOVIC, T. AND WEDMAIR, R. **Prediction of fragmentation and the lump / fines ratio from drill core samples at Yandicoogina**, JKMRC Internal report, 1995.

KOJOVIC, T., MICHAUX, S. AND MCKENZIE, C. **Impact of blast fragmentation on crushing and screening operations in quarrying**, EXPLO 95 Conference, AusIMM, Brisbane, September, 1995, PP 427- 436.

MARTINS, C. F. V. **Redução da razão linear de carregamento para aumento da granulometria do material desmontado em rochas alteradas**. DNPM/MG, s.d.

MOHAMED, F.; HAFSAOUI, A.; TALHI, K; MENACER, K. **Study of the powder factor in surface bench blasting**. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium, 2015.

MURR, D.; WORKMAN, L.; ELORANTA, J.; KATSABANIS, P. **Blasting influence on comminution**. SAG Conference, Vancouver, 2015.

NIELSEN, K. AND KRISTIANSEN, J. **Blasting and grinding – An integrated comminution system**. EXPLO 95 Conference, AusIMM, Brisbane, September, 1995, PP 427-436.

ORICA, 2016. Improving mill productivity - How effective blasting can reduce energy consumption and total mining costs.

ORICA, S.D. **Case study: Improving crusher and mil throughput and recovery by improving fragmentation**. Sons of Gwalia's Greenbushes Mine, Australia. Document reference: 100023.

SCOTT, A. AND MCKEE, D. J. **The inter-dependence of mining and mineral beneficiation processes on the performance of mining projects**, AusIMM Annual Conference, Darwin, August, 1994, PP 303-308.

SILVA, V. C. **Curso de Min 210 - Operações Mineiras**. Material dado em aula do curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP. Março, 2009.

SIMKUS, R AND DANCE, A. **Measuring and monitoring the ROM properties at Highland valley copper**, Proc. Mine-Mill Conf., Brisbane, 1998.

SINGH P. K., ROY M.P., PASWAN R.K., SARIM MD., KUMAR S., JHA R. R. **Rock fragmentation control in opencast blasting**. Dhanbad, India. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8, 2016.

SMITH, M.L., PRISBERY, K.A AND BARRON, C.L. **Blasting design for increased SAG mill productivity**, AIME, SME Annual Meeting, Prepint, 1993, p. 93-115.

STRELEC, S.; GAZDEK, M.; MESEC J. **Blasting design for obtaining desired fragmentation**. Technical Gazette, 2011, p. 79-86.