



## MODELAMENTO DO DESMONTE DE ROCHAS DE UMA MINA DE MINÉRIO DE FERRO.

PORTO, P. H. E.<sup>1</sup>, MAZZINGHY, D.B.<sup>2</sup>, SILVA, L.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Vale S.A. e-mail: [pedro.porto@vale.com](mailto:pedro.porto@vale.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas.

e-mail: [dmazzinghy@demin.ufmg.br](mailto:dmazzinghy@demin.ufmg.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (CPGEM).

e-mail: [leandro.geotecnia@gmail.com](mailto:leandro.geotecnia@gmail.com)

### RESUMO

A abordagem de Integração Mina-Usina (Mine-to-Mill) apresenta uma visão sistêmica do processo de fragmentação, visando otimizá-lo desde as operações de perfuração e desmonte para reduzir os custos associados às etapas de fragmentação subsequentes no processo. Cunningham (1983) propôs um modelo matemático para previsão da fragmentação obtida pelo desmonte de rochas de acordo com os principais parâmetros de um plano de fogo, conhecido como Modelo de Kuz-Ram. Este trabalho objetiva utilizar tal modelo em um desmonte de rochas realizado em uma mina de minério de ferro, verificando o impacto de alterações em parâmetros do plano de fogo na fragmentação prevista. Cenários foram propostos e os resultados mostraram que o adensamento da malha e a diminuição do diâmetro dos furos pode ser o ideal do ponto de vista de diminuição da granulometria dos produtos do desmonte, havendo uma redução da ordem de 38% no  $P_{80}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Integração Mina-Usina, Cominuição, Modelamento Matemático, Simulação.

### ABSTRACT

The Mine-to-Mill approach presents a systemic view of the whole fragmentation process, seeking the optimization of the fragmentation obtained by rock blasting and therefore reducing the costs associated with the subsequent comminution processes. Cunningham (1983) proposed a mathematical model that predicts the fragmentation obtained by rock blasting according to its most common parameters, called Kuz-Ram Model. The objective of this paper is to apply Cunningham's model to a blast at an iron ore mine, evaluating the effect of the change of different blast design parameters on fragmentation. The results showed that the scenario that proposed reducing the spacing and the diameter of the charges could be ideal from the point of view of reducing the fragmentation obtained by the blasts, with a reduction on the  $P_{80}$  in the order of 38%.

**KEYWORDS:** Mine-to-Mill, Cominution, Mathematical Modeling, Simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

A fragmentação ou cominuição é definida como a operação, ou o conjunto de operações, que se caracteriza pela redução física de um dado conjunto de blocos ou partículas, através do rompimento de ligações estruturais (GALERY, VALADÃO, et al., 2012). É comumente aceito que as principais etapas de cominuição acontecem no processamento mineral, mais especificamente nas etapas de britagem e moagem. No entanto, é possível considerar que a primeira etapa de cominuição acontece no processo de desmonte de rochas, que tem como principal objetivo a fragmentação do material *in situ* para que o processo de carregamento e transporte seja realizado.

Em geral, as etapas de cominuição representam a etapa de maior consumo de energia de uma usina de beneficiamento mineral e, conseqüentemente, maior fonte de custos. Já na lavra, o processo de carregamento e transporte, seguido do de perfuração e desmonte, são os que geralmente apresentam os maiores custos. Dessa forma, considerando-se que o processo de cominuição se inicia na etapa de perfuração e desmonte, pode-se optar por uma abordagem que vise otimizar a fragmentação do material já nessa etapa, melhorando, como consequência, o desempenho dos processos de britagem e moagem. Tal abordagem, que apresenta uma visão sistêmica do processo produtivo, é denominada de Integração Mina-Usina, ou sem inglês, Mine-to-Mill. Essa abordagem é particularmente interessante uma vez que os seus objetivos são traçados de acordo com cada processo produtivo. Em alguns casos, o interesse pode ser a redução na geração de finos, ou ainda de blocos grandes, ao passo que em outros, pode ser de maior interesse a redução da granulometria do material gerado pelo desmonte de rochas.

Nielsen e Kristiansen (1996) investigaram como a otimização do desmonte de rochas por explosivos afeta as etapas subseqüentes de britagem e moagem. Os autores sugerem que os custos associados às etapas de fragmentação como um todo podem ser otimizados pelo aumento do consumo energético em operações de fragmentação com uso de explosivos (aumentando a quantidade de explosivos utilizados, utilizando explosivos de maior velocidade de detonação etc) buscando custos ótimos nas etapas de cominuição, conforme mostrado na Figura 1.

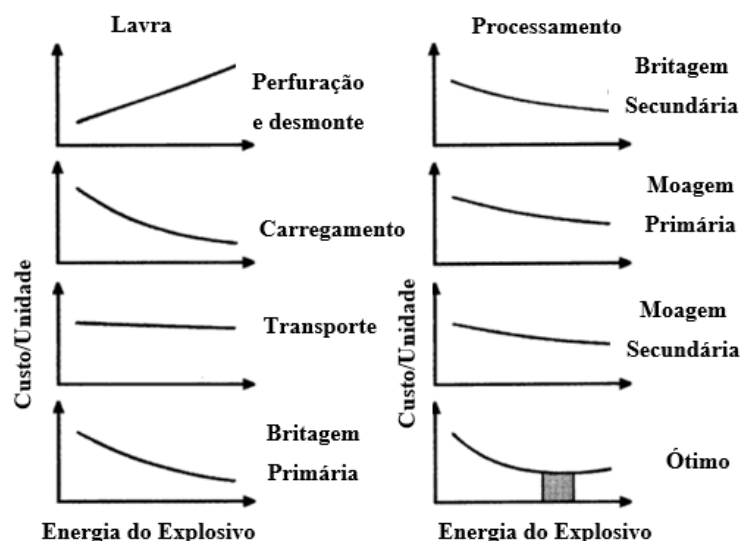


Figura 1: Otimização do desmonte de rochas por explosivos levando à minimização de custos (Nielsen e Kristiansen, 1996)

Cunningham (1983) propôs um modelo matemático de fragmentação de rochas por explosivos, combinando as equações de Kuznetsov e de Rosin-Rammler, conhecido como modelo de Kuz-Ram. A equação de Kuznetsov adaptada é como a Equação 1:

$$x_m = AK^{-0,8}Q^{\frac{1}{6}}\left(\frac{115}{RWS}\right)^{\frac{19}{20}} \quad (1)$$

Em que:  $x_m$  = tamanho médio de partícula (cm) – abertura que permite a passagem de 50% do material;  $A$  = fator de rocha;  $K$  = razão de carga (kg de explosivo/m<sup>3</sup> de rocha);  $Q$  = massa de explosivo no furo (kg);  $RWS$  = energia relativa por massa de ANFO.

O modelo utiliza a equação de Rosin-Rammler, supracitada, adaptada como na Equação 2:

$$P_x = 100 \left( 1 - e^{\left[ -0,693 \left( \frac{x}{x_m} \right)^n \right]} \right) \quad (2)$$

Em que:  $P_x$  = fração de massa passante na peneira de abertura  $x$  (%);  $n$  = índice de uniformidade;  $x$  = tamanho (abertura da peneira);  $x_m$  = tamanho médio. O índice de uniformidade pode ser determinado conforme a Equação 3 (CUNNINGHAM, 1983):

$$n = \left( 2,2 - \frac{14B}{d} \right) \sqrt{\left( \frac{1+S/B}{2} \right)} \left( 1 - \frac{W}{B} \right) \left[ \text{abs} \left( \frac{BCL-CCL}{L} \right) + 0,1 \right]^{0,1} \frac{L}{H} \quad (3)$$

Em que:  $B$  = afastamento (m);  $S$  = espaçamento (m);  $d$  = diâmetro do furo (mm);  $W$  = desvio padrão de perfuração (m);  $L$  = comprimento total de carga (m);  $BCL$  = comprimento da carga de fundo (m);  $CCL$  = comprimento da carga de coluna (m);  $H$  = altura da bancada (m);  $\text{abs}$  = valor absoluto de  $\left( \frac{BCL-CCL}{L} \right)$ .

Não obstante os avanços científicos e tecnológicos, é ainda prática comum em empresas de mineração que etapas subsequentes do processo produtivo sejam tratadas de maneira distinta, como por exemplo o processo de fragmentação de rochas. Os objetivos deste artigo são realizar e avaliar o modelamento matemático do desmonte de rochas de uma litologia em uma mina de minério de ferro, de acordo com o método explicitado por Mazzinghy (2018). Cenários serão propostos e analisados a fim de se investigar o impacto na fragmentação alterando-se diferentes variáveis do plano de fogo.

Espera-se que, com este estudo, a aplicabilidade do Modelo de Kuz-Ram como ferramenta de auxílio às operações de perfuração e desmonte seja validada especificamente para o caso objeto dos estudos descritos. Uma vez validado, o modelo poderá ser útil previsão de fragmentação de rochas gerada por detonações de explosivos, possibilitando assim a otimização dos planos de fogo para melhor atendimento das operações subsequentes de cominuição e conseqüente redução global de custos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para calibração da equação de Kuz-Ram, selecionou-se um desmonte padrão da mina selecionada para determinação dos respectivos parâmetros. Os furos foram realizados por uma perfuratriz Caterpillar® MD6290, perfurando furos de 203 mm (8"). A taxa de penetração média foi de 0,6 m/min. Os parâmetros do plano de fogo, exemplificados na Figura 2, foram determinados pelo *blaster* da mina, conforme Tabela 1.

**Tabela 1: Parâmetros utilizados no plano de fogo.**

Parâmetro	Valor	Unidade
Altura bancada ( <i>H</i> )	10,0	m
Diâmetro do Furo( <i>d</i> )	203	mm
Explosivo	ANFO	-
Densidade Explosivo	0,85	g/cc
RWS	100	%
Tampão	6,0	m
Afastamento ( <i>B</i> )	3,0	m
Espaçamento ( <i>S</i> )	5,0	m
Subfuração	0	mm
Desvio Furo ( <i>W</i> )	0,1	m
Coluna Explosivos ( <i>CCL+BCL</i> )	4,0	m
Quantidade Explosivos ( <i>Q</i> )	110	kg/furo
Razão de Carga ( <i>K</i> )	0,74	kg/m <sup>3</sup>
Volume Desmontado	12.000	m <sup>3</sup>
Massa Desmontada	35.280	t
<i>A</i> (Fator de Rocha)	5,69	-

O fator de rocha (*A*) foi determinado em campo, de acordo com as características de dureza, densidade e da presença e orientação (direção e mergulho) de descontinuidades da rocha na bancada desmontada. De posse de todos esses dados, simulou-se a fragmentação esperada do desmonte e propôs-se cenários que serão discutidos a seguir.

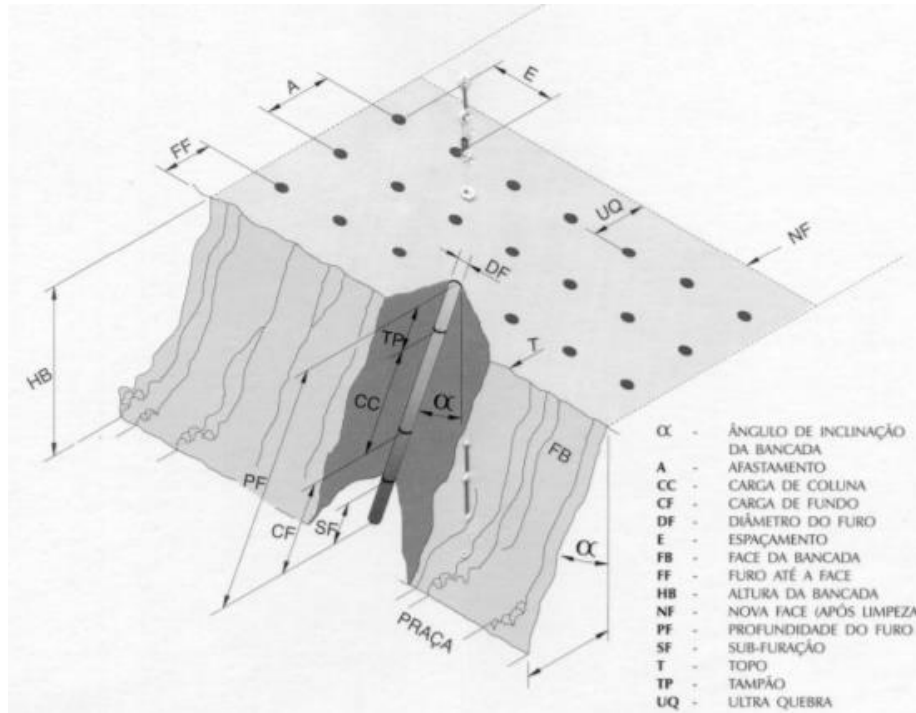


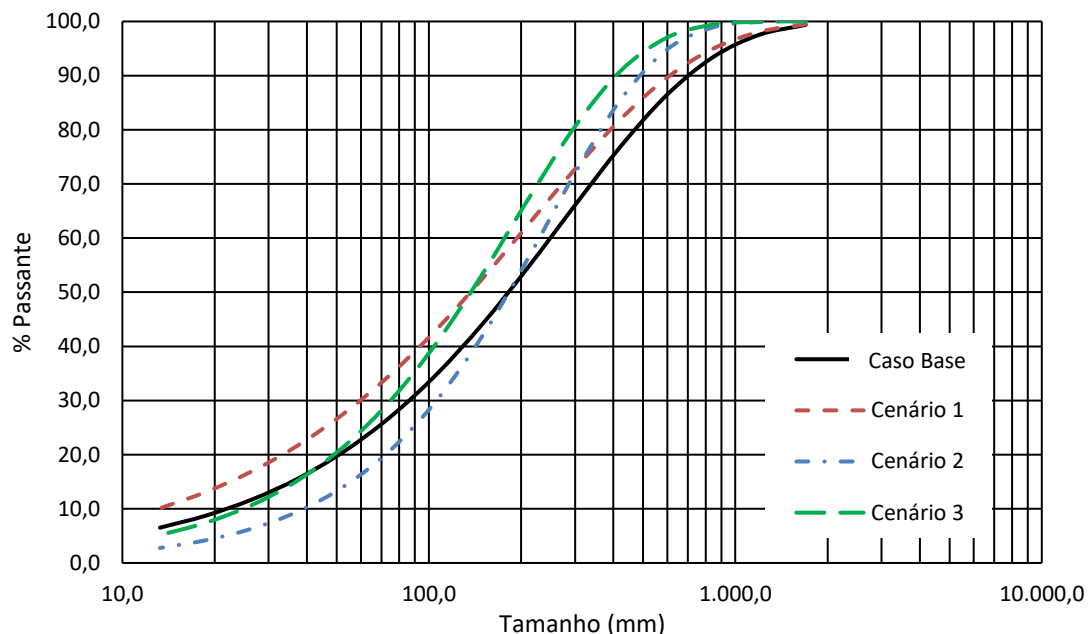
Figura 2: Principais parâmetros de um plano de fogo (Costa e Silva, 2014).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse da equação calibrada de Kuz-Ram especificamente para o caso estudado, plotou-se a curva granulométrica de acordo com a Equação de Rosin-Rammler adaptada (Eq. 2). Na sequência foram realizadas simulações com o modelo calibrado, de forma a verificar o efeito de parâmetros individuais e combinados na granulometria do produto do desmonte de rochas. Optou-se por não propor alterações na quantidade de carga utilizada nos desmontes dada a criticidade das operações devido à proximidade entre a mina e a comunidade. Três cenários foram propostos:

- Cenário 1: Adensamento da malha de perfuração, reduzindo o espaçamento de 5,0 m para 3,5 m, ou seja, uma redução na ordem de 30%;
- Cenário 2: Redução do diâmetro de perfuração, de 203,20 mm (8") para 171,45 mm (6 <sup>3</sup>/<sub>4</sub>"), ou seja, redução do diâmetro dos furos em 16%;
- Cenário 3: Redução do diâmetro e adensamento da malha de perfuração, combinando-se os cenários 1 e 2.

Salienta-se que, exceto as mudanças propostas em cada cenário, todos os demais parâmetros do plano de fogo se mantiveram iguais ao original. A Figura 3 compara a curva granulométrica obtida para o desmonte original (Caso Base), com aquelas resultantes dos demais três cenários simulados. Ressalta-se que a distribuição granulométrica do Caso Base é também uma simulação obtida a partir da Equação 2 e da Equação 3. Recomenda-se que a aplicação do método seja baseada em um trabalho inicial de calibração do modelo, o que inclui compara a distribuição granulométrica medida com aquela prevista pelo modelo, de forma a estabelecer um caso base para ser empregado em comparações posteriores.



**Figura 3: Curvas granulométricas do Caso Base e comparativa.**

De acordo com o gráfico da Figura 3, o Cenário 3 foi o que apresentou maior fragmentação das frações mais grosseiras da distribuição, seguido pelo Cenário 2, que não apresentou diferenças muito significativas nas frações intermediárias. O Cenário 1, apesar de não haver mostrado grandes reduções na fração grosseira, apresentou reduções significativas nas frações intermediárias e finas. Importante frisar que, como salientado por Cunningham (2005), a modelagem das frações finas é uma das principais limitações do Modelo de Kuz-Ram, e, por conseguinte, as análises em tais frações devem ser feitas com critério e cautela. A Tabela 3 compara os principais fatores de tamanho das curvas granulométricas do desmorte original com os cenários propostos.

**Tabela 2: Comparação entre tamanhos.**

Fator	Caso Base (mm)	Cenário 1 (mm)	Diferença (%)	Cenário 2 (mm)	Diferença (%)	Cenário 3 (mm)	Diferença (%)
d99	1584	1512	-4,6	871	-45,0	798	-49,6
d90	716	614	-14,3	501	-30,0	411	-42,6
d80	475	394	-17,0	370	-22,1	295	-37,8
d50	182	137	-24,8	183	0,2	137	-24,7
d20	51	33	-34,5	72	41,6	49	-3,8

Os resultados encontrados evidenciam que configurações de malhas de perfuração têm um profundo impacto na fragmentação gerada pelo desmorte de rochas. Malhas muito espaçadas, não obstante o menor custo e maior produtividade, geralmente tendem a gerar fragmentos maiores, a depender, obviamente, do material. Tais fragmentos, de modo geral, geram custos como a necessidade de realizar desmontes secundários ou utilizar um equipamento específico – como um rompedor hidráulico – para romper os blocos, e aumento dos custos de manutenção dos equipamentos. Além disso, geram atrasos como maior tempo de carregamento dos equipamentos, possíveis engaiolamentos do

equipamento de britagem, necessidade de mobilização da equipe para realização de desmontes secundários, estreitamentos de vias devido a repés entre outros. Malhas muito fechadas, em contrapartida, podem gerar finos em excesso, que também são refletidos em custos, dada a dificuldade ou até mesmo incapacidade de beneficiá-los e a consequente necessidade de barragens e/ou complexos sistemas de filtragem. Em cada caso específico deve-se buscar uma malha de perfuração que não gere muitos finos, mas que também não gere blocos acima do tamanho máximo permitido pelos equipamentos de carregamento e transporte ou da britagem primária, por exemplo. Geralmente a experiência das equipes de perfuração e desmonte de cada operação define as malhas de perfuração de modo a gerar um produto de desmonte aceitável e respeitando, principalmente, as restrições de vibrações, ruído, ultralaçamentos etc. Idealmente, cada malha deveria ser definida de acordo com as características da rocha e do banco a ser desmontado. Nesse cenário, o Modelo de Kuz-Ram – assim como argumentou Cunningham (2005) – se mostra como uma ferramenta prática no auxílio da melhoria contínua da perfuração e desmonte de cada operação, dada a facilidade de implementação em planilhas eletrônicas e, principalmente, os resultados e tendências por ele fornecidos.

Quanto à redução de diâmetro de perfuração, sabe-se que diâmetros menores distribuem melhor a carga explosiva no banco a ser desmontado, explorando melhor as descontinuidades e características intrínsecas das rochas ao longo do banco. Além disso, diâmetros menores apresentam taxas de penetração maiores quando comparados à diâmetros maiores na mesma rocha, aumentando a produtividade da operação de perfuração. A redução do diâmetro é justificada caso haja grandes variações nas características das rochas (e.g. descontinuidades, contatos, diferenças de resistência ao longo do furo etc.) de um mesmo banco desmontado, no intuito de minimizar o efeito de tais variações na fragmentação obtida no desmonte. Outra razão seria alguma restrição da quantidade de carga explosiva nos furos, como por exemplo vibração do solo, ultra lançamento etc. Em diâmetros grandes, restrições de carga podem significar que a carga explosiva não será bem distribuída ao longo do furo, havendo a concentração da carga no fundo e a falta de carga nas partes superficiais do furo. Nessa situação, uma solução seria o escalonamento de cargas ou a redução do diâmetro. De qualquer modo, deve-se sempre lembrar de que a alteração da coluna de perfuração de uma perfuratriz pode ser uma atividade dispendiosa de tempo e recursos.

Cenário 3 foi aqui considerado aquele que apresentou melhores resultados, pois melhor combinou diminuições significativas de frações grosseira e intermediária, com geração de finos próxima ao Caso Base. A diminuição de material contido em frações grosseiras tem potencial de diminuição do número de maticões gerados, uma vez que no Cenário 3 o d99 foi de cerca de 0,8 m, enquanto que no Caso Base o d99 foi de cerca de 1,5 m, portanto, uma grande mudança. Já nas frações intermediárias houve uma redução do P80 de 475 mm para 296 mm, respectivamente do Caso Base e do Cenário 3, que assim representa uma maior adequação da fragmentação para a britagem primária. Em relação aos finos, aqui avaliados através do parâmetro d20, o resultado obtido a partir da simulação Cenário 3 não apresentou variação significativa em relação ao Caso Base. Em operações de minério de ferro, obter uma quantidade de finos muito grande pode ser potencialmente prejudicial ao processo como um todo, devido a dificuldades de concentração e a impactos ambientais como geração de material particulado e necessidade de barragens de rejeitos.

O Modelo de Kuz-Ram, portanto, se mostra como uma ferramenta útil para se buscar a otimização de custos de cominuição. Como demonstrado, a simulação da granulometria dos produtos de desmonte de rochas por explosivos pode ser empregada para estabelecimento de cenários de produtos mais adequados do desmonte para operações subsequentes de cominuição.

#### **4. CONCLUSÕES**

O presente trabalho teve como objetivo aplicar o Modelo de Kuz-Ram em uma operação de mina a céu aberto de minério de ferro e avaliar os potenciais de melhoria na distribuição granulométrica do material desmontado. Propôs-se três cenários alternativos à simulação denominada Caso Base. As conclusões foram as seguintes: 1) O modelo Kuz-Ram se mostrou como uma ferramenta interessante para simulação de cenários de produtos gerados por desmonte de rocha. A partir de simulações, é possível avaliar de maneira objetiva os efeitos relativos que mudanças em variáveis do plano de fogo ocasionarão na fragmentação obtida; 2) Entre os cenários avaliados, o Cenário 3 (adensamento da malha e diminuição do diâmetro de perfuração) foi o que apresentou reduções em granulometria mais expressivas em faixas de tamanho grosseiras e intermediárias, quando comparadas ao Caso Base.

Como recomendações, ressalta-se que apesar da praticidade e dos resultados obtidos pela utilização do modelo de Kuz-Ram, deve-se definir qual a granulometria esperada de cada desmonte a fim de se otimizar as operações de carregamento e transporte e, principalmente, de britagem. Além disso, a implementação do modelo de Kuz-Ram às rotinas de perfuração e desmonte com objetivo de integração e otimização de processos de fragmentação pode ser uma importante ferramenta para a redução global de custos operacionais.

#### **5. REFERÊNCIAS**

- Costa e Silva, V. Curso MIN 112 - Operações Mineiras. [S.l.]. 2014.
- Cunningham, C. V. B. The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting. First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Lulea. 1983.
- Cunningham, C. V. B. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. African Explosives Limited. Modderfontein. 2005.
- Galéry, R. et al. Fragmentação. In: Valadão, G. E. S.; Araujo, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Cap. 5, p. 234.
- Mazzinghy, D.B. EMN043 - Integração Mina-Usina: Notas de Aula. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.
- Nielsen, K.; Kristiansen, J. Blasting – crushing - grinding: Optimization of an integrated comminution system. In: MOHANTY, B. Rock Fragmentation by Blasting. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. p. 269-277.