



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



**Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus de Poços de Caldas**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Mineral (CEEM)**

NYEMER PIVETTA COSTA

**Avaliação dos desmontes de minério de ferro da Mina Baratinha  
pelo modelo de fragmentação Kuz-Ram**

Poços de Caldas

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
*Campus Avançado de Poços de Caldas*  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Nyemer Pivetta Costa

## **Avaliação dos desmontes de minério de ferro da Mina Baratinha pelo modelo de fragmentação Kuz-Ram**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à  
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte  
dos requisitos para a integralização do curso de  
Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: LAVRA

Orientador: Prof. Dr. Osvail André Quaglio

Poços de Caldas

2023



## Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas Biblioteca Campus Poços de Caldas

Costa, Nyemer Pivetta.

Avaliação dos desmontes de minério de ferro da Mina Baratinha pelo modelo de fragmentação Kuz-Ram / Nyemer Pivetta Costa. - Poços de Caldas, MG, 2023.

48 f. : il. -

Orientador(a): Osvail André Quaglio.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.  
Bibliografia.

1. Desmonte de rocha. 2. Curva granulométrica. 3. Modelo Kuz-Ram. 4. Modelo KCO. 5. Wipfrag. I. Quaglio, Osvail André , orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.



Nyemer Pivetta Costa

## AVALIAÇÃO DOS DESMONTES DE MINÉRIO DE FERRO DA MINA BARATINHA PELO MODELO DE FRAGMENTAÇÃO KUZ-RAM

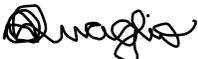
A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: LAVRA

Aprovada em: 04 de outubro de 2023

Orientador: Osvail André Quaglio

Instituição: Universidade Federa de Alfenas

Assinatura: 

Examinador 1: Vilson Carlesso dos Reis

Instituição: Grupo Bemisa

Assinatura:  Documento assinado digitalmente  
VILSON CARLESSO DOS REIS  
Data: 04/10/2023 21:17:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 2: Luiz Carlos Rusilo

Instituição: Universidade Federa de Alfenas

Assinatura: 





## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Osvail André Quaglio, pelos ensinamentos e por me orientar na confecção deste trabalho com paciência, atenção e dedicação.

À BEMISA HOLDING S.A., por disponibilizar os dados para a realização deste trabalho e proporcionar a oportunidade de adquirir novos conhecimentos.

Aos colegas da Mina Baratinha que me ajudaram com orientação, dados e apoio, em especial ao geólogo Vitor Hugo Rios Bernardes, ao supervisor de desmonte Fernando Gonçalves Pereira e toda a equipe de qualidade e topografia, aqui representados pelo técnico de qualidade Thales Victor Glória de Carvalho e o topógrafo Wagnei Geraldo Eustáquio Vital.

À Dinex Engenharia Mineral, unidade mina baratinha e seu supervisor de perfuração desmonte Claudinei Fernandes pelo conhecimento compartilhado.

Aos demais professores do curso de Especialização em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Alfenas que fizeram a diferença na minha formação.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e pela leitura do texto.

UNIFAL – Universidade Federal de Alfenas, por emprestar a licença do *Wipfrag*, para o desenvolvimento do trabalho.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
*Campus Avançado de Poços de Caldas*  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Dedico à minha amada esposa Uyara, que este trabalho de conclusão de curso seja uma pequena homenagem ao apoio incondicional que você tem me dado em todas as etapas da nossa jornada junto. Suas palavras de encorajamento, seu amor inabalável e sua presença constante têm sido minha fonte de força e inspiração



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da mina Horto Baratinha.	14
Figura 2 - Mapa geológico regional o qual exhibe a localização da área de estudo e distribuição das principais unidades geológicas portadoras de formação ferrífera bandada. Distribuição das unidades e Limite do Cráton do São Francisco.	16
Figura 3 - Conjunto de operações mineiras reunidas no processo de extração, beneficiamento do minério de ferro até à obtenção de Sinter feed.	18
Figura 4 - Exemplo de emulsão encartuchada – NitroMax, da Nitrosul (Austn Powder S.A.), utilizado na mina Baratinha.	22
Figura 5 - Parâmetros de um plano de fogo.	24
Figura 6 - Resumo dos mecanismos de ruptura da rocha durante a ação dos explosivos.	29
Figura 7 - Bancada de 10 m de altura em frente de lavra de minério de ferro da mina Baratinha.	36
Figura 8 - Banco de minério desmontado, com bolas de isopor de 250 mm de diâmetro para escala.	37
Figura 9 - Fotografia da pilha de material fragmentado durante o desmonte com explosivos mostrando o delineamento manual dos fragmentos através do software Wipfrag. Propriedade da imagem: câmera – Sony SLT-A37, Resolução: 1478 x 830.	38
Figura 10 - Gráfico da curva granulométrica geral gerada pelo WipFrag com os dados do plano de fogo gerados automaticamente pelo software do desmonte na mina Baratinha.	39
Figura 11 - Histograma do tamanho dos fragmentos de uma foto gerada pelo WipFrag com os percentuais passantes (D10, D20, D50, D80 e D90).	39
Figura 12 - Gráfico comparativo das curvas KCO (vermelho) x Real (azul), com os parâmetros geral dos desmontes e a distribuição granulométrica do banco desmontado de 5 metros de altura, indicando o P80 da curva.	41
Figura 13 - Gráfico comparativo das curvas KCO (vermelho) x Real (azul), geradas pelo programa Wipfrag com os parâmetros geral dos desmontes e a distribuição granulométrica do banco desmontado de 10 metros de altura, indicando o P80 da curva. É possível notar uma mudança no comportamento das curvas nas regiões dos finos e menos expressivo na região dos grossos.	42



---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição básica da emulsão encartuchada.	23
Tabela 2 - Parâmetros básicos dos desmontes da mina Baratinha.	36
Tabela 3 - Parâmetro dos planos de fogo para os desmontes de 5 e 10 m de altura, assim como diversos parâmetros preditivos dos respectivos desmontes. Além de malha e percentual de passante de fragmentos. O P80 é destacado em vermelho na tabela.	43



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2. OBJETIVO	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. LOCALIZAÇÃO	14
3.2. GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL	15
3.3. DESMONTE DE ROCHAS	18
3.3.1. Perfuração	19
3.3.1.1. Explosivos	19
3.3.1.2. Densidade	20
3.3.1.3. Velocidade de detonação (VOD)	20
3.3.1.4. Pressão de detonação	20
3.3.1.5. Balanço de oxigênio de um explosivo	21
3.3.1.6. Classificação dos explosivos	21
3.4. PARÂMETROS DO PLANO DE FOGO A CÉU ABERTO	23
3.4.1. Afastamento (B)	24
3.4.2. Espaçamento (E)	25
3.4.3. Subperfuração (M)	25
3.4.4. Profundidade do furo (L)	26
3.4.5. Tampão (O)	26
3.4.6. Carga de coluna (C) e Carga de fundo (D)	26
3.4.7. Ângulo de inclinação da bancada (A)	26
3.4.8. Diâmetro do furo (E)	27
3.4.9. Razão de Carga (RC)	27
3.5. Mecanismo De Fragmentação Do Explosivo	27



---

3.6. Efeitos Indesejáveis de um Desmonte De Rochas	29
3.7. Modelos de Fragmentação das Rochas por Explosivo	30
3.7.1. Modelo Kuz-Ram	31
3.7.2. Modelo KCO	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. Coleta de Dados	35
4.2. Captura de Imagens	36
4.3. Fotoanálise através de software (Estimativa da Curva Granulométrica)	37
4.4. Modelo De Fragmentação Utilizado	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. ANÁLISE DIGITAL DAS IMAGENS	41
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	45
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	46
8. BIBLIOGRAFIA	47
9. ANEXOS	48



## RESUMO

Visando otimizar a análise de um desmonte de rocha por explosivo, o uso de fotoanálise através de softwares específicos vem ganhando aceitação na mineração, devido as ferramentas embarcadas neste software. Neste trabalho foi utilizado o *Wipfrag*, com a utilização do modelo KCO, para comparação com os dados reais, neste contexto, o processamento das imagens capturadas durante os desmontes de rochas e sua subsequente análise de imagem possibilitam a comparação dos resultados da distribuição granulométrica do desmonte com as metas predefinidas, com o objetivo de encontrar a condição ótima que equilibre os desmontes de rochas com as etapas subsequentes de fragmentação, ou seja, britagem e moagem. O presente estudo tem como finalidade empregar o Modelo de Kuz-Ram, conforme proposto por Cunningham (1983), em desmontes de minério de ferro nas instalações da Mina de Baratinha, pertencente à empresa BEMISA HOLDING S.A. Analisando os resultados obtidos para os dois cenários distintos, de bancos de 5 e 10 m de altura, foi possível concluir que os desmontes de 10 m foram mais eficientes, se aproximando bastantes a curva real da teórica. É importante salientar a menor eficiência deste modelo para tratar finos.

**Palavras-chave:** Desmonte de rocha; curva granulométrica; modelo KCO, modelo Kuz-Ram



## ABSTRACT

Aiming to optimize the analysis of a rock blast using explosives, the use of photoanalysis through specific software has been gaining acceptance in mining, due to the tools embedded in this software. In this work, Wipfrag was used, using the KCO model, for comparison with real data, in this context, the processing of images captured during rock dismantling and their subsequent image analysis make it possible to compare the results of the granulometric distribution of the dismantling, with predefined goals, with the objective of finding the optimal condition that balances rock dismantling with the subsequent stages of fragmentation, that is, crushing and grinding. The present study aims to employ the Kuz-Ram Model, as proposed by Cunningham (1983), in iron ore dismantling at the Baratinha Mine facilities, belonging to the company BEMISA HOLDING S.A. Analyzing the results obtained for the two different scenarios, of 5 and 10 m high banks, it was possible to conclude that the 10 m blasts were more efficient, bringing the real curve very close to the theoretical one. It is important to highlight the lower efficiency of this model for treating fines.

**Keywords: Rock blasting; particle size distribution curve; KCO model; Kuz-Ram model.**



## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho foi desenvolvido na mina de minério de ferro de alto teor (>60% wt. Fe) Horto Baratinha, onde produz *Sínter Feed Premium* com alto teor de Fe (> 64%) e níveis reduzidos de contaminantes. Tendo como foco a forma em que se dá a extração do minério para a utilização na usina de beneficiamento, o estudo foi direcionado na etapa de desmonte com uso de explosivos, e sua respectiva análise fotográfica na tentativa de avaliar a qualidade dos desmontes e possíveis pontos de melhoria da fragmentação do maciço rochoso.

O desmonte de rocha por meio de explosivos é uma prática essencial no cenário da indústria de mineração, desempenhando um papel crítico na etapa inicial de extração e preparação do minério. Esta fase é caracterizada pela redução inicial das dimensões dos blocos de rocha, facilitando o subsequente processo de beneficiamento. A implementação de um desmonte controlado surge como um imperativo para otimizar esta etapa, visando minimizar os efeitos sobre a fragmentação da rocha e, por conseguinte, maximizar a eficiência da usina de beneficiamento.

No contexto do desmonte por explosivos apresenta notáveis vantagens em relação às técnicas de cominuição convencionais, como a britagem e a moagem, demonstrando menor custo operacional. Apesar da aparente elevação dos custos ao buscar uma fragmentação consistente, é crucial destacar que tal adaptação resulta em uma substancial melhoria na qualidade da fragmentação. Esta melhoria, por sua vez, tem o potencial de reduzir a quantidade de material encaminhado aos estágios de britagem e moagem, com subsequente diminuição dos custos associados a estas etapas.

Afim de otimizar o desmonte de rocha, têm surgido modelos de fragmentação que visam orientar a engenharia na etapa de planejamento. Estes modelos almejam prever com precisão a distribuição de tamanhos dos fragmentos resultantes do desmonte. Ao permitirem uma análise minuciosa dos efeitos das variações nos parâmetros do plano de fogo e nas características geotécnicas, com base na discretização do bloco a ser desmontado, esses modelos facultam ajustes no processo de desmonte de forma a atender às especificidades operacionais. Destarte, busca-se otimizar a relação custo-benefício na articulação entre a mina e a usina de beneficiamento, aprimorando globalmente a eficiência do processo.

Neste contexto, o presente estudo concentrou-se na avaliação da eficiência dos procedimentos de desmonte realizados na mina Baratinha, com o objetivo de analisar a distribuição



granulométrica P80, conforme previsto na curva Kuz-Ram, obtida por meio da análise fotográfica dos desmontes em bancos de 5 e 10 metros de altura, de minério de natureza heterogênea localizados nas frentes de lavra. O estudo investiga de que maneira a implementação de técnicas de desmonte controlado contribui para a obtenção de minério com granulometria mais adequada ao processo de beneficiamento, gerando impactos positivos na operação da usina. Além disso, este trabalho enfatiza a importância dos modelos de fragmentação na tomada de decisões precisas durante o planejamento do desmonte, visando à otimização dos recursos disponíveis e à maximização da eficiência operacional.

## 2. OBJETIVO

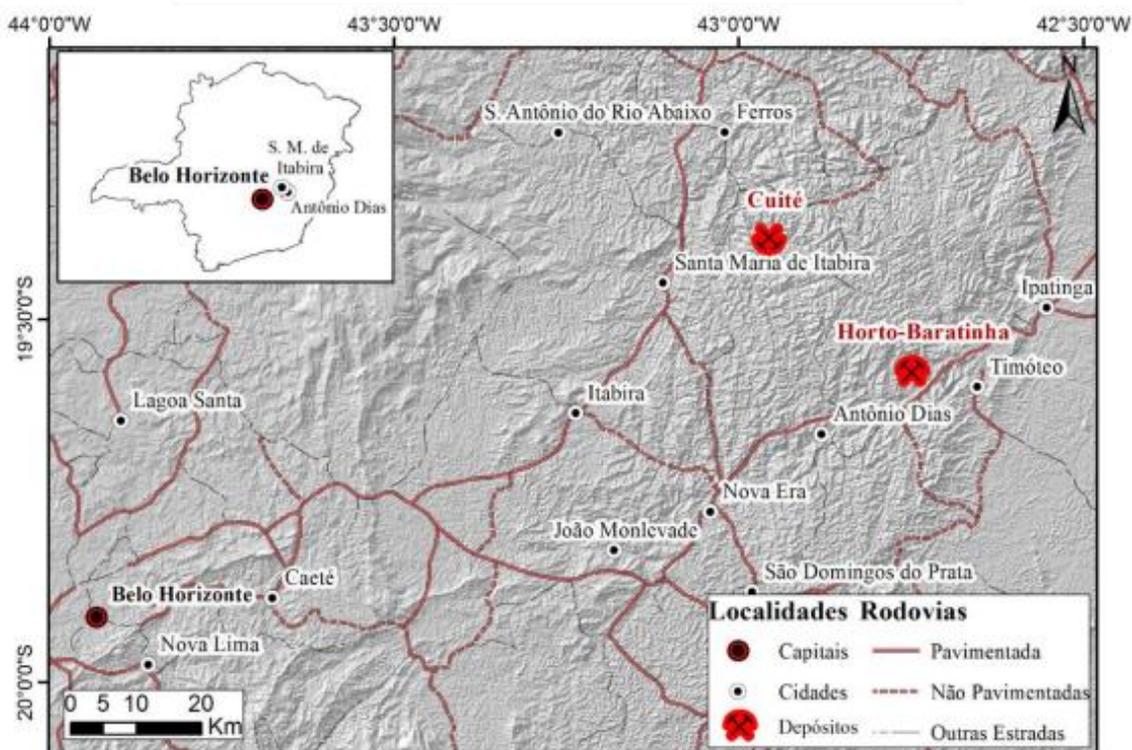
O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo que avalie a eficiência dos desmontes de minério de ferro, da mina Horto Baratinha através da aplicação do modelo matemático de Kuz-Ram por meio de Foto-análise com o *software Wipfrag* e indicar possíveis pontos de melhoria.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. LOCALIZAÇÃO

A mina de ferro Horto Baratinha está localizada na porção leste do Estado de Minas Gerais, região do Vale do Aço, no município de Antônio Dias, vale do rio Piracicaba (Figura 1).

*Figura 1 - Localização da mina Horto Baratinha.*



Fonte: Braga, 2019.

### 3.2. GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

A área da mina Baratinha está inserida em unidades proterozóicas, representantes do embasamento do cráton do São Francisco, e em granitóides da suíte Borrachudos, unidades estas retrabalhadas no orógeno Araçuaí do Neoproterozóico (Figura 2). Segundo Braga (2019), as unidades do embasamento do cráton do São Francisco encontram-se expostas no domínio externo (oeste) e interno (leste) deste orógeno. O domínio externo compreende o cinturão de dobramentos e cavalgamentos (fold thrust belt), de baixo grau metamórfico, que bordejando o cráton, sendo representado pelas rochas do Supergrupo Espinhaço. No domínio interno, representado pelas rochas do complexo Guanhões e suíte Borrachudos, estão expostos os volumosos corpos granitóides relacionados às diversas etapas evolutivas do orógeno, onde o metamorfismo atingiu a fácies granulito e ocorreu extensa anatexia. Este posicionamento em setores distintos do orógeno fez com que fosse variável a intensidade do retrabalhamento tectônico durante a orogênese Brasileira.

As formações ferríferas da região, constituintes das sequências metassedimentares, foram associadas aos grupos Serra da Serpentina e Serra de São José, sendo depositadas entre



---

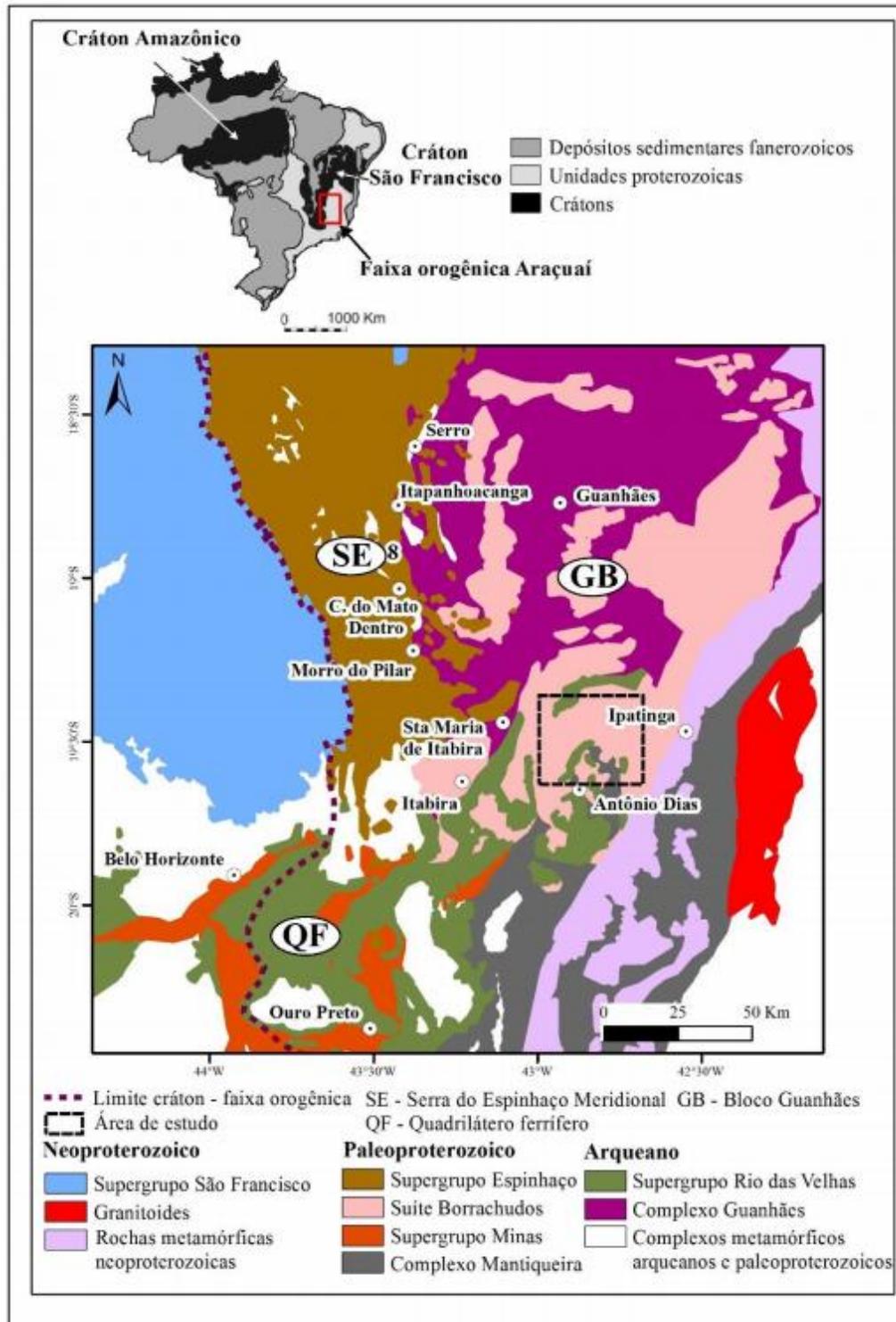
os períodos Orosiriano e Estateriano (Braga, 2019)

Conforme Braga (2019) os corpos de minério de ferro da mina Baratinha estão hospedados em itabirito associado com mica xistos e anfibólio xistos, paraderivados, de fácies anfibolito e com idade máxima de deposição estateriana (1,8 a 1,6 Ga), cercados por granitóides da suíte Borrachudos e gnaisses neoarqueanos do complexo Guanhões.

Figura 2 - Mapa geológico regional o qual exhibe a localização da área de estudo e



distribuição das principais unidades geológicas portadoras de formação ferrífera bandada.

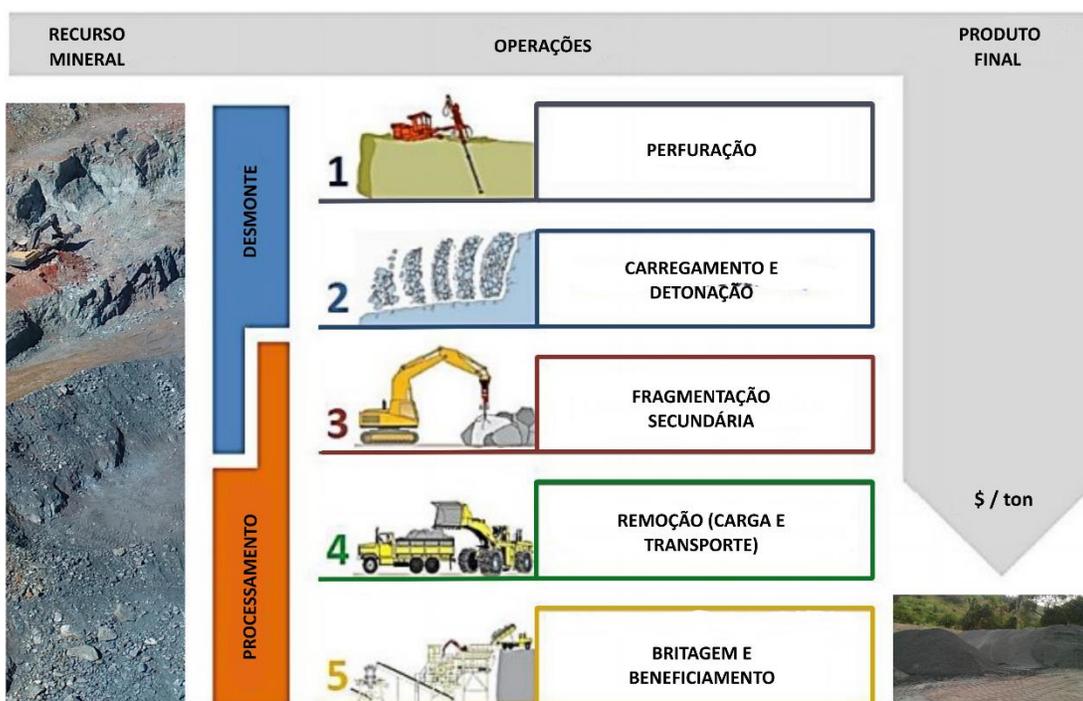


Fonte: Distribuição das unidades modificado de Pinto e Silva (2014). Limite do Cráton do São Francisco baseado em Alkmim et al. (2006) apud. Braga, 2019, p.18.

### 3.3. DESMONTE DE ROCHAS

A mineração a céu aberto é uma complexa atividade usada para explorar normalmente depósitos minerais mais superficiais, onde sua viabilidade econômica pode ser estabelecida. Requer um substancial aporte de capital inicial e nos dias de hoje, onde a demanda é limitada e a oferta abundante, é de primordial importância otimizar ao máximo cada etapa componente do ciclo de exploração do recurso mineral. A exploração do minério de ferro é um somatório de várias operações que assim constituem um ciclo (Figura 3): perfuração, desmorte, carga, transporte e fragmentação/britagem e beneficiamento (Machado, 2016).

Figura 3 - Conjunto de operações mineiras reunidas no processo de extração, beneficiamento do minério de ferro até à obtenção de *Sinter feed*.



Fonte: Adaptação, Machado, 2016.

A perfuração é uma das etapas essenciais à fragmentação de rochas. A condução precisa dessa fase contribuirá para um aprimoramento subsequente das operações, notadamente no que concerne à carga, detonação, obtenção da melhor granulometria após desmorte, fragmentação secundária, carga e transporte, assim como britagem e beneficiamento. Diante da atual exigência



de redução de custos de produção, é imprescindível analisar todos os fatores econômicos envolvidos, sendo a fragmentação um dos elementos mais relevantes para otimizar os custos de produção. Isso se deve principalmente aos impactos diretos nos gastos relacionados à perfuração e detonação, além das demais operações.

A eficiência do desmonte de rocha, obtendo uma melhor fragmentação, é resultado de diversos fatores e parâmetros, os quais serão apresentados abaixo.

### **3.3.1. Perfuração**

Segundo Silva (2009), o processo de desmonte de rocha tem sua etapa inicial na perfuração das rochas, a qual tem como objetivo criar furos com uma disposição e geometria apropriadas nos maciços rochosos. Esses furos são destinados a receber cargas de explosivos e dispositivos iniciadores.

São três os principais métodos de perfuração utilizados em desmonte de rochas:

- ✓ perfuração rotativa com brocas tricônicas (Holler Bit);
- ✓ martelo de superfície (Top-Hammer, método roto-percussivo);
- ✓ martelo de fundo de furo ou furo abaixo (Down the Hole, método roto-percussivo).

As perfuratrizes utilizadas são basicamente de dois tipos: Pneumáticas e Hidráulicas, onde se diferenciam essencialmente na utilização do uso de ar comprimido, que na sonda pneumática é produzido por um compressor acionado por um motor a diesel ou elétrico, para o acionamento do motor de rotação e a geração do movimento alternativo do pistão do martelo. Já a perfuratriz hidráulica adota um conjunto de bombas para impulsionar esses componentes mecânicos.

#### **3.3.1.1. Explosivos**

O melhor desenvolvimento operacional da mina e da planta de beneficiamento de minérios depende amplamente da melhor fragmentação do maciço rochoso. Silva, 2019, definiu explosivos como substâncias ou misturas em qualquer estado físico que, ao serem expostas a uma causa térmica ou mecânica intensa (como calor, atrito, impacto, etc.), passam a se converter, total ou parcialmente, em gases, resultando em um súbito aumento de pressão em um período de tempo extremamente curto, liberando uma considerável quantidade de calor. Os explosivos apresentam as seguintes propriedades principais que influenciam na detonação que são apresentados abaixo.



### 3.3.1.2. Densidade

A densidade de um explosivo ( $\rho$ ), expressa em  $\text{g/cm}^3$ , representa a relação entre a massa e o volume desse explosivo. A densidade dos explosivos disponíveis comercialmente varia dentro da faixa de  $0,6 \text{ g/cm}^3$  a  $1,45 \text{ g/cm}^3$ , desempenhando um papel fundamental na seleção dos mesmos. Explosivos com densidade igual ou inferior a 1 não devem ser empregados em perfurações que contenham água, a fim de prevenir sua flutuação. Em situações que demandam detonações difíceis, com o objetivo de obter fragmentação fina, é aconselhável optar por explosivos de alta densidade. Por outro lado, quando se trata de rochas já fragmentadas no local, ou quando não é necessária uma fragmentação excessiva, explosivos de baixa densidade serão suficientes (Silva, 2019).

### 3.3.1.3. Velocidade de detonação (VOD)

Segundo Jimeno (2003), é a velocidade com que a onda de detonação se propaga pelo explosivo e, portanto, é o parâmetro que define a taxa de liberação de energia. Os fatores que afetam o VOD são: a densidade da carga, o diâmetro, o confinamento, a iniciação e o envelhecimento do explosivo. Para os três primeiros, à medida que esses parâmetros aumentam, o VOD com relação à iniciação, se não for suficientemente energética, pode fazer com que o regime de detonação comece com baixa velocidade.

### 3.3.1.4. Pressão de detonação

A pressão de detonação é a pressão existente na frente de detonação, isto é, a pressão gerada pela onda de detonação à medida que percorre a carga explosiva. Essa pressão desempenha um papel central na criação de uma onda de choque na rocha que envolve a carga explosiva. A intensidade dessa onda de choque reflete a energia de choque do explosivo, e é o seu efeito que provoca a fratura da rocha (Morais, 2004).

A pressão de detonação é uma função da densidade do explosivo e da velocidade de detonação. A equação empírica usualmente aceita para o cálculo da pressão de detonação ( $P_d$ ), em MPa (Morais 2004):

$$P_d = 0.25 \times \rho \times (VOD)^2$$

Em que  $\rho$  é a densidade do explosivo ( $\text{kg/m}^3$ ) e VOD é a velocidade de detonação do explosivo ( $\text{km/s}$ ).



### **3.3.1.5. Balanço de oxigênio de um explosivo**

Os principais componentes dos explosivos são o oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e carbono. Segundo Jimeno (2003) a maioria dos explosivos são deficientes em oxigênio, contendo oxigênio insuficiente para converter cada átomo de carbono e hidrogênio presente na molécula explosiva em dióxido de carbono e água. Normalmente, um explosivo não usa oxigênio atmosférico durante o processo de detonação. Portanto, o calor gerado pela explosão de um produto deficiente em oxigênio é menor do que o gerado em condições de oxidação completa. O balanço de oxigênio é expresso como uma porcentagem igual à diferença entre 100% e a porcentagem calculada (oxigênio presente-oxigênio necessário). No caso de deficiência de oxigênio, o saldo é dado com sinal negativo. Em muitos explosivos, a sensibilidade, a potência e o poder de ruptura aumentam à medida que o balanço de oxigênio aumenta, atingindo um máximo no ponto de equilíbrio.

### **3.3.1.6. Classificação dos explosivos**

Os resultados do desmonte dependem do tipo de explosivo utilizado, além da malha de perfuração e sistema de iniciação, devido às características individuais de cada explosivo (Quaglio, 2020).

Neste estudo, serão abordados apenas a análise exclusiva do ANFO e da emulsão, devido à sua ampla utilização na indústria mineradora do Brasil. Cabe ressaltar que na mina Baratinha, a prática predominante é a utilização da emulsão encartuchada para os processos de desmonte.

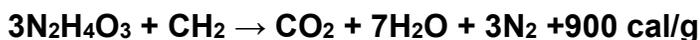
As propriedades de cada grupo de explosivos também permitem prever quais serão os resultados mais prováveis de fragmentação, deslocamento e vibração. As características mais importantes são: potência e energia desenvolvidas, velocidade de detonação, densidade, pressão de detonação, resistência à água e sensibilidade. Outras propriedades que afetam o uso de explosivos e que devem ser levadas em consideração são: fumaça, resistência a baixas e altas temperaturas, dessensibilização por ações externas, etc.

Silva (2019) classifica os explosivos em altos e baixos. Altos explosivos são caracterizados pela elevada velocidade de reação, que está entre 1.500 a 9.000 m/s e alta taxa de pressão, variando de 50.000 a 4.000.000 psi (344,74 a 27.579,03 MPa), onde alguns exemplos de altos explosivos são TNT, dinamites e gelatinas. Já baixos explosivos ou deflagrantes são caracterizados pela baixa velocidade de reação, abaixo de 1.500 m/s e pressões de no máximo



345,00 MPa. Como exemplo, podem ser citados a pólvora e os explosivos permissíveis.

No contexto deste trabalho é necessário um breve relato sobre os explosivos mais comuns. O tipo ANFO (Ammonium Nitrate and Fuel Oil), que segundo Silva, 2019, são explosivos granulados, onde mais o conhecido é formado pela mistura pura e simples de nitrato de amônio ( $N_2H_4O_3$  – 94,5%) e óleo diesel ( $CH_2$  – 5,5%). As proporções acima, consideradas ideais, foram determinadas pelos americanos Lee e Akre, em 1955. As maiores vantagens do ANFO são: ocupar inteiramente o volume do furo, grande insensibilidade aos choques, poucos gases tóxicos e redução do preço global do explosivo. Contudo, possuem as seguintes desvantagens: falta de resistência à água, baixa densidade ( $0,85 \text{ g/cm}^3$ ) e necessidade de um iniciador especial. A reação ideal quando o balanço de oxigênio é zero, pode ser expressa pela seguinte equação empírica (Silva, 2019):



No mercado, estão disponíveis outros explosivos granulados que apresentam formulações semelhantes ao ANFO. Estas formulações incluem a incorporação de elementos como explosivos, sensibilizantes, agentes combustíveis, oxidantes e substâncias absorventes (Silva, 2019).

A emulsão encartuchada é o tipo de explosivo utilizado nos desmontes na mina Baratinha. Atualmente emulsões são explosivos bastante disseminados no mercado da mineração, conhecidos como do tipo “água-em-óleo” (water-in-oil), eles consistem de microgotículas de solução oxidante supersaturada dentro de uma matriz de óleo. Conforme descrito por Silva, 2019, o componente oxidante na composição é o nitrato de amônio, buscando otimizar tanto os custos de fabricação e comercialização quanto a eficiência energética. Do ponto de vista químico, a emulsão é caracterizada como uma dispersão estável de um líquido imiscível em outro, mediada por agentes emulsificantes e uma conexão mecânica robusta (Silva, 2019). Porém, Moraes (2004), mostra que a emulsão possui restrição a baixas temperaturas, onde as características atrativas da emulsão podem se transformar em uma estrutura cristalina, resultando em uma perda de estrutura irreversível. Abaixo é possível observar exemplo de emulsão encartuchada (Figura 4) além de sua composição básica na tabela 1.

Figura 4 - Exemplo de emulsão encartuchada – NitroMax, da Nitrosul (Austin Powder S.A.),



utilizado na mina Baratinha.



Fonte: Internet

Tabela 1 - Composição básica da emulsão encartuchada.

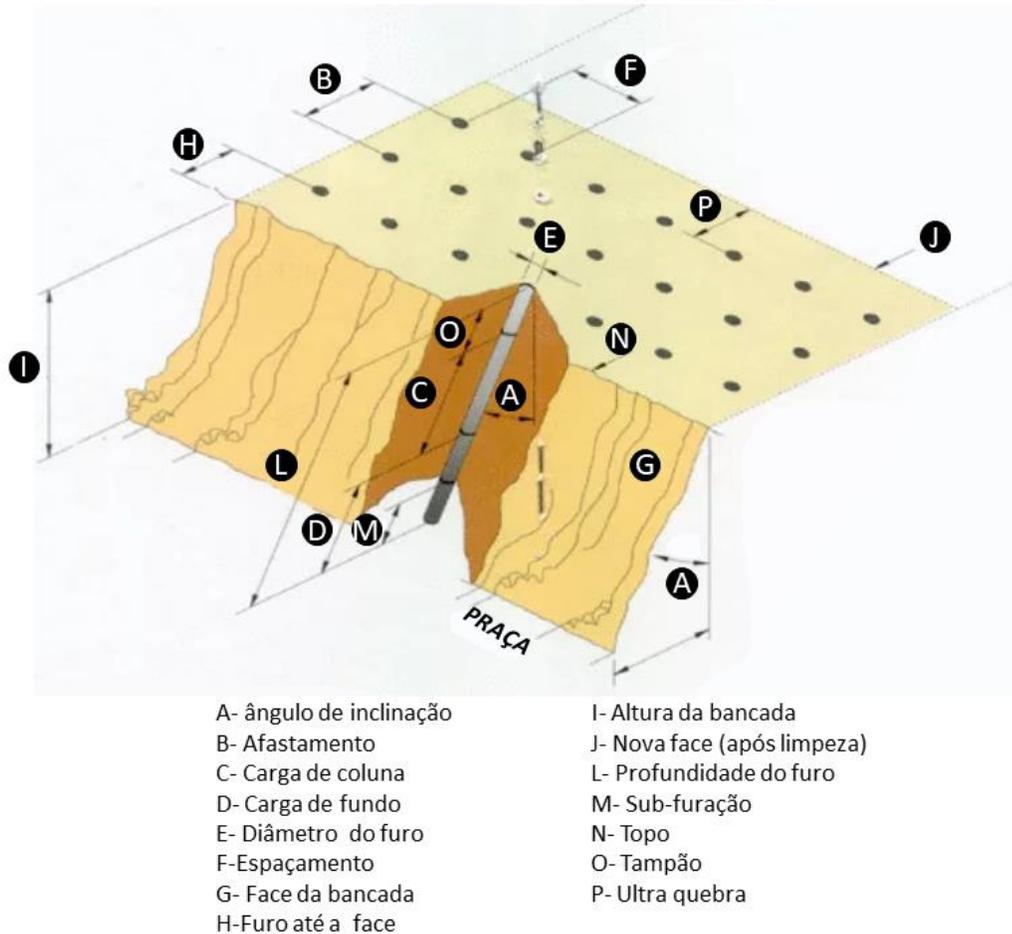
INGREDIENTE	PERCENTAGEM EM MASSA (%)
Nitrato de Amônio	77,3
Água	16,7
Óleo diesel	4,9
Agente Emulsificante: Oleato de sódio ou Monoleato de ezorbitol	1,1

Fonte: Silva (2019).

### 3.4. PARÂMETROS DO PLANO DE FOGO A CÉU ABERTO

Quaglio, 2020, mostra que o processo de criação de um plano de detonação inclui a identificação de diversos parâmetros, os quais devem ser considerados nos modelos de fragmentação causados por explosivos. Esta seção aborda a definição desses parâmetros e como eles impactam a fragmentação resultante das detonações. Abaixo serão descritos os principais parâmetros de um plano de fogo.

Figura 5 - Parâmetros de um plano de fogo.



Fonte: Silva, 2019

### 3.4.1. Afastamento (B)

O afastamento é definido como a menor distância entre o furo e a face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra. Dentre todos os parâmetros do plano de fogo esse é o mais crítico. Se for pequeno demais, a rocha é lançada a uma considerável distância da face; os níveis de pulsos de ar são altos e a fragmentação poderá ser excessivamente fina. Contudo, se o afastamento for muito grande a sobreescavação (backbreak) na parede é muito severa. Quando o afastamento é excessivo há grande emissão de gases dos furos contribui para



a ocorrência de ultralanchamentos dos fragmentos rochosos a distâncias consideráveis, podendo gerar crateras verticais, alto nível de onda aérea e vibração do terreno; a fragmentação da rocha pode ser extremamente grosseira e problemas no pé da bancada podem ocorrer (Silva, 2019).

As demais variáveis do plano de fogo possuem mais flexibilidade e não produzirão efeitos drásticos nos resultados tais como os produzidos pelo erro na estimativa da dimensão do afastamento. O afastamento varia em relação ao diâmetro dos furos, às propriedades das rochas e aos tipos de explosivos empregados, podendo oscilar entre 33 e 39 vezes o diâmetro do furo, dependendo da resistência da rocha e da altura da carga de fundo (Silva, 2019). Uma equação empírica extremamente útil para determinar o afastamento é apresentada abaixo:

$$A = 0,0123[2(\rho_e / \rho_r) + 1,5] \times D_e$$

Em que:  $\rho_e$  = densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>);  $\rho_r$  = densidade da rocha (g/cm<sup>3</sup>) e  $D_e$  = diâmetro do explosivo (mm) (Silva, 2019).

### 3.4.2. Espaçamento (E)

O espaçamento é a distância entre dois furos de uma mesma linha. E possui dois casos específicos, onde são empregadas fórmulas empíricas e distintas de acordo com a altura das bancadas. Se a bancada for baixa ( $H_b/A < 4$ ) e os furos de uma linha são iniciados instantaneamente, a expressão usada pode ser:

$$E = 0,33(H_b + 2A)$$

Porém se os furos são detonados com retardos, expressão abaixo pode ser usada:

$$E = (H_b + 7A) / 8$$

Contudo em bancadas altas ( $H_b / A > 4$ ), pode ser usado as fórmulas abaixo, dependendo do tempo de detonação, quando iniciados instantaneamente, a expressão usada pode ser:

$$E = 2 \times A$$

Já no caso dos furos detonados com retardos, a seguinte expressão pode ser usada:

$$E = 1,4 \times A$$

Assim, o espaçamento jamais deve ser menor que o afastamento, senão o número de matacões será excessivo (Silva, 2019).

### 3.4.3. Subperfuração (M)



É o comprimento perfurado abaixo da praça no pé da bancada ou da linha de nível a se atingir. A subperfuração é utilizada de forma a prever a não formação de repés, devido ao engastamento da rocha no pé da bancada, uma vez que a resistência abaixo da linha de nível não permite a retirada da rocha desmontada com a face à 90°, impossibilitando a construção de praças horizontais.

Com a subperfuração apropriada, é possível obter o rompimento da rocha pela cota do piso, uma boa fragmentação e um empilhamento adequado para que a operação de remoção da pilha tenha maior rendimento. A subperfuração pode ser calculada pela seguinte fórmula empírica:

$$S = 0.3 \times A$$

#### 3.4.4. Profundidade do furo (L)

É o comprimento total de um furo, considerando os ângulos de perfuração e a subperfuração, sendo, na maioria dos casos, maior que a altura da bancada. Onde pode ser calculado com a seguinte fórmula empírica:

$$H_f = \frac{H_b}{\cos \alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) * S$$

#### 3.4.5. Tampão (O)

É a porção superior do furo onde não é carregado com explosivo e sim com material inerte ou tampões industriais a fim de se confinar o explosivo e os gases dentro do furo.

#### 3.4.6. Carga de coluna (C) e Carga de fundo (D)

Para Jimeno et al. (2003) são necessárias diferentes energias para se quebrar a rocha no fundo e no meio do furo. Para que isso ocorra devem ser utilizados explosivos de grande densidade e força na carga de fundo, onde é mais difícil de se deslocar a rocha, e explosivos de força média e baixa densidade na carga de coluna, onde é mais fácil a retirada.

#### 3.4.7. Ângulo de inclinação da bancada (A)

De acordo com Morais (2004), em operações de desmonte de produção em minas a céu aberto, é comum que os furos sejam dispostos na vertical, e isso se justifica por diversos motivos:



- ✓ **Complexidade na Execução de Furos Inclinados:** Furos inclinados são mais difíceis de serem realizados.
- ✓ **Limitações de Equipamentos:** Algumas perfuratrizes não possuem a capacidade técnica necessária para realizar perfurações inclinadas de maneira eficiente.
- ✓ **Maior Precisão na Perfuração:** A execução de furos verticais tende a ser mais precisa, o que é essencial para o sucesso das operações de desmonte.

Contudo, Jimeno, 2003, mostra as vantagens dos furos inclinados, onde proporcionam melhor distribuição do explosivo no maciço rochoso, aumentando a fragmentação no pé da bancada e reduzindo o “back-break” (quebra para trás). Furos inclinados também resultam em melhor deslocamento e liberação das pilhas. A melhor fragmentação é obtida em razão de sua maior eficiência no uso da energia do explosivo, conforme ilustrado na figura 5.

#### 3.4.8. Diâmetro do furo (E)

Silva (2019) revela que existem vários fatores que influenciam na escolha do diâmetro dos furos, dentre eles estão o tamanho desejado dos fragmentos, o tipo de explosivo utilizado, a vibração permitida do terreno, etc.

#### 3.4.9. Razão de Carga (RC)

Conforme Jimeno et al. (2003), a razão de carregamento pode ser entendida como a quantidade de explosivo necessária para fragmentar 1m<sup>3</sup> de rocha, sendo comumente expressa em g/m<sup>3</sup> ou g/t. A razão de carga pode ser calculada conforme as expressões empíricas abaixo:

$$R_c = \frac{1000 \times Q_e}{B \times S \times H}, \text{ em } g/m^3$$

$$R_c = \frac{1000 \times Q_e}{B \times S \times H \times d}, \text{ em } g/t$$

Em que  $Q_e$  é a massa de explosivo por furo (kg); B é o afastamento (m); S é o espaçamento (m); H é a altura do banco (m) e d é a densidade da rocha (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.5. Mecanismo De Fragmentação Do Explosivo

A principal finalidade do processo de desmonte por explosivos é transformar a rocha fragmentando no menor tamanho possível, viabilizando assim sua escavação, transporte e



subsequente britagem por meio dos equipamentos disponíveis. Para atingir com sucesso esse objetivo, é fundamental considerar quatro elementos essenciais:

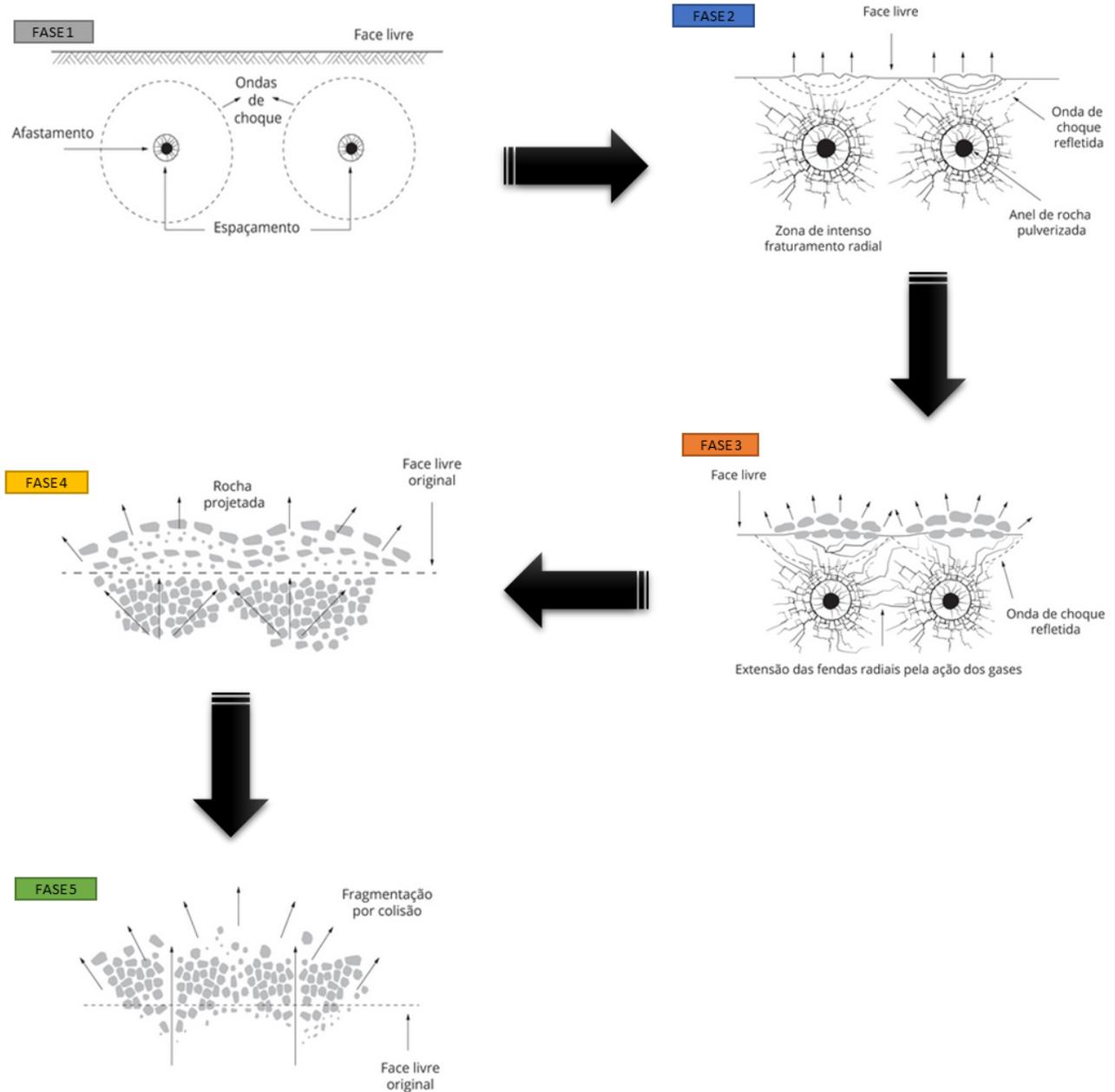
- I. **Fragmentação Adequada:** Garantir que a rocha seja fragmentada em tamanhos apropriados para os procedimentos de manipulação e processamento subsequentes.
- II. **Mobilidade, Transporte e Descarga Eficientes:** Assegurar que os fragmentos sejam deslocados, movimentados e lançados de maneira eficaz, permitindo sua posterior manipulação.
- III. **Mitigação de Impactos Ambientais:** Minimizar os efeitos adversos sobre o ambiente durante o processo de desmonte, reduzindo possíveis danos meio ambiente circundante.
- IV. **Preservação do Maciço Remanescente:** Limitar ao máximo os danos causados ao maciço rochoso remanescente, de forma a manter a integridade estrutural da área circundante.

A Figura 6 apresenta as distintas etapas de fragmentação da rocha após a detonação do explosivo, sendo descrito por Silva, 2019, a seguir. Inicialmente, a Fase 1, também denominada de Fase Dinâmica no processo de fragmentação, é caracterizada pela influência das ondas de choque. Essas ondas têm origem na deflagração da reação química do explosivo, o qual é termodinamicamente instável. Essa fase culmina com o gradual surgimento de fraturas tangenciais, iniciando assim a Fase 2.

A propagação da onda de tensão em torno do furo cria um estado de tensão semi-estático, representando a Fase 2. Essa etapa se relaciona com a pressão exercida pelos gases de detonação enquanto percorrem as fissuras e microfissuras geradas na Fase Dinâmica. À medida que esses gases são liberados, eles expandem essas fissuras, resultando no desprendimento de blocos de rocha, caracterizando a efetiva fragmentação da rocha.

Quando a onda de choque compressiva possui energia suficiente para atingir a face livre da rocha e retornar com uma amplitude de tensão que excede a resistência à tração do maciço rochoso, entra-se na Fase 3, resultando na fragmentação da rocha na Fase 4. Durante essa etapa, os fragmentos de rocha projetados em direção à face livre colidem entre si, promovendo a chamada fragmentação secundária na Fase 5 (Silva, 2009).

Figura 6 - Resumo dos mecanismos de ruptura da rocha durante a ação dos explosivos.



Fonte: Silva, 2019

### 3.6. Efeitos Indesejáveis de um Desmonte De Rochas

Um desmonte de rochas mau executado, pode trazer prejuízos na operação mineira, vários efeitos indesejáveis podem ser gerados durante o desmonte, dentre eles destacam-se a



sobrescavação e a subescavação, além de que, ultralançamentos, poeiras, vibrações, ruídos, dentre outros. Esses efeitos podem ser limitados através da seleção de um método de lavra subterrânea e um plano de fogo bem elaborado.

A eficiência da lavra é obtida através da comparação do projeto piloto com o levantamento topográfico do avanço executado. Assim, pode-se verificar o que foi projetado para a lavra e que não foi recuperado e a sobrescavação acima do limite do projetado.

### **3.7. Modelos de Fragmentação das Rochas por Explosivo**

A extração mineral é uma fase intrinsecamente complexa, na qual a obtenção de uma fragmentação adequada do material resultante do desmonte com explosivos é influenciada por uma interação significativa de diversos fatores. Estes fatores estão intimamente relacionados às propriedades da rocha, ao planejamento da detonação e às características do explosivo utilizado.

De acordo com Quaglio (2020), ao longo das últimas três décadas, ocorreu um notável avanço no desenvolvimento de tecnologias voltadas para aplicações de detonação. Essas tecnologias incluem modelos computacionais cada vez mais sofisticados para o planejamento e previsão do desempenho das operações de desmonte de rochas. A fragmentação das rochas é afetada por uma miríade de fatores, como as propriedades da massa rochosa, a geologia do local, os parâmetros de detonação *in situ* e as variáveis do plano de explosão. Portanto, ainda não existe uma solução teórica completa para prever essa fragmentação. No entanto, têm sido desenvolvidos e aprimorados modelos empíricos para estimar a distribuição de tamanhos dos fragmentos resultantes do processo de desmonte de rochas.

De acordo com Cunningham (2005), ao longo dos anos, vários modelos foram apresentados na tentativa de prever a distribuição resultante de tamanhos, especialmente em projetos de explosão. Essas abordagens podem ser classificadas em dois principais campos: modelos empíricos e modelagem mecânica.

Os modelos empíricos, para todos os propósitos práticos, são empregados no planejamento diário de explosões e resultam em uma fragmentação fina com um maior consumo de energia. Por outro lado, a modelagem mecânica supervisiona a física da detonação e o processo de transferência precisa de energia na rocha, sendo adaptada para layouts específicos de explosão. A partir disso, uma ampla gama de resultados de detonação é derivada (Cunningham, 2005).



### 3.7.1. Modelo Kuz-Ram

O modelo Kuz-Ram foi desenvolvido para desmontes de rocha em minas à céu aberto, portanto (Ouchterlony, 2005). É um modelo determinístico que não leva em consideração o tempo de retardo entre furos, que tem influência na fragmentação da rocha e não possui a capacidade de prever a quantidade de finos da pilha.

As propriedades das rochas, as propriedades dos explosivos e as variáveis geométricas do plano de fogo são combinadas usando cinco equações que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram.

O modelo Kuz-Ram é a combinação de 5 equações que unem as propriedades das rochas, dos explosivos e as características geométricas do plano de fogo.

#### 3.7.1.1. Equação de Kuznetsov

Kuznetsov (1973) desenvolveu uma equação representada pela correlação entre o tamanho médio do fragmento e a energia de detonação aplicada por unidade de volume de rocha (razão de carga) como uma função do tipo de rocha. Cunningham (1983) modificou essa equação empírica e é dada por:

$$X_{50} = A \times k^{-0.8} \times Q^{1/6} \times \left( \frac{115}{RWS} \right)^{19/30}$$

Em que:

$X_{50}$  é o tamanho médio de partícula (cm).

A é o fator da rocha.

K é a razão de carga ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Q é a massa do explosivo utilizado (kg).

RWS representa a energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO (ANFO=100).

#### 3.7.1.2. Equação de Rosin-Rammler

De acordo com essa equação empírica, é possível definir uma curva granulométrica que permite visualizar o tamanho das partículas do desmonte, com base no tamanho médio. Sendo expressa a seguir.

$$R_{(x)} = e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n}$$

Em que:



X é o tamanho da malha da peneira;

X<sub>50</sub> é o tamanho médio de partícula;

R<sub>(X)</sub> é a porcentagem de material passante na peneira de tamanho X;

n é o índice de uniformidade;

### 3.7.1.3. Equação do Índice de uniformidade

Essa expressão empírica foi desenvolvida através de testes de campo por Cunningham (1987). Ela correlaciona todos os parâmetros geométricos do plano de fogo, como segue:

$$= 2.2 - 14 \times \left(\frac{B}{D}\right) \times \left[\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right]^{0.5} \times \left(1 - \frac{W}{B}\right) \times \left(\frac{|L_B - L_C|}{L} + 0.1\right)^{0.1} \times \frac{L}{H}$$

Em que:

B é o afastamento (m).

S é o espaçamento (m).

D é o diâmetro do furo (mm).

W é o desvio da perfuração (m).

L é o comprimento total de carga (m).

H é a altura do banco (m).

### 3.7.2. Modelo KCO

O modelo Kuz-Ram segundo Ouchterlony (2005) não é eficiente para definir as frações granulométricas finas e grosseiras. A fraca capacidade do modelo proposto por Cunningham para descrever finos foi um dos principais motivos para o desenvolvimento de dois modelos, o Two-Component-Model (1999) e o Crush Zone Model (1999). Ambos combinam duas distribuições ou componentes Rosin-Rammler, uma para a parte grosseira da curva e outra principalmente para os finos.

Ouchterlony criou o modelo KCO, com a utilização de uma nova abordagem simultânea ao TCM e CZM. Neste modelo o tamanho médio do fragmento e o índice de uniformidade são calculados pela equação proposta por Cunningham (1987) e ocorre a substituição da equação Rosin-Ramler pela equação Swebrec.

#### 3.7.2.1. Equação SWEBREC



Esta equação empírica utiliza o valor de 50% dos passantes  $X_{50}$  como o parâmetro central, assim como a equação Rosin-Rammler, mas adiciona um valor limite máximo para o tamanho de fragmentação  $X_{max}$ , o terceiro parâmetro  $b$  é um parâmetro calculado que define a ondulação da curva. (Ouchterlony, 2005)

$$P_{(X)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\ln\left(\frac{X_{max}}{X}\right)}{\ln\left(\frac{X_{max}}{X_{50}}\right)} \right)^b}$$

Em que:

$P_{(x)}$  - Representa a porcentagem de material passante em uma peneira de tamanho "X" (%).

$X$  - Tamanho da malha corresponde a peneira (mm);

$X_{50}$  - Abertura da peneira onde 50% do material fragmentado é passante (mm).

$b$  - Parâmetro de ondulação;

$X_{máx.}$  - Valor máximo do bloco que será gerado. Geralmente é o mín. ( $\cdot$ ,  $+$ ), (mm).

Para o cálculo do tamanho de fragmentos com 50% de passantes,  $X_{50}$  é calculado pela equação empírica a seguir:

$$x_{50} = \left[ \frac{g(n) \times A \times Q^{\frac{1}{6}} \times \left( \frac{115}{S_{ANFO}} \right)}{q^{0.8}} \right]$$

O parâmetro  $b$ , denominado de expoente de ondulação ou algumas vezes de expoente de característica natural de quebra (Ouchterlony, 2009a), com a equação empírica.

$$n = \frac{(2.2 - 0.0148B)}{\phi_h} \times \left( \frac{1 - SD}{B} \right) \times \sqrt{\left[ \frac{\left(1 - \frac{S}{B}\right)}{2} \right]} \times \left[ \frac{|L_b - L_c|}{L_{tot} + 0.1} \right]^{0.1} \times \left( \frac{L_{tot}}{H} \right)$$

A equação Swebrec, faz com que o modelo KCO tenha três grandes parâmetros e permite obter um ótimo ajuste para diferentes tipos de dados de fragmentação com coeficientes de correlação de pelo menos 0,997 ou melhores ( $r^2 > 0,995$ ) para uma variedade de tamanhos de fragmentos de duas a três ordens de magnitude. Este modelo tem a capacidade de atingir uma previsão do tamanho dos finos de forma muito eficaz. (Ouchterlony et.al., 2019).

### 3.8. WIPFRAG



O programa *Wipfrag*, segundo Morais (2004), foi desenvolvido a fim de fazer um estudo granulométrico através de fotoanálise, criado pelos técnicos John Franklin e Norbert Maerz, pesquisadores da Universidade de Waterloo, com a colaboração da indústria mineira.

Este programa é uma plataforma que roda em um notebook ou tablet, onde é possível delimitar o tamanho dos fragmentos presentes na imagem, capturada através de fotos, com alta resolução, conseguindo gerar uma estatística dos dados do tamanho dos fragmentos, além de diversos parâmetros pertinentes ao desmonte de rocha.

Para a utilização deste programa neste trabalho, foi utilizada uma licença da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-CEEM).

O primeiro passo para a análise das imagens, é o delineamento dos fragmentos e das bolas de isopor utilizadas como escala, para tanto foram selecionadas as fotos com melhor detalhamento, para que seja mais prático desenhar os contornos manualmente dos fragmentos dos desmontes, pois, os contornos automáticos, mostraram-se ineficientes e irreais.

As figuras geradas a partir do processamento de imagens por fotoanálise com o uso do *software Wipfrag* levando em consideração os parâmetros do plano de fogo a ser analisado e imputado, mostrará o resultado das análises das imagens representadas em gráficos do tipo histogramas das faixas granulométricas e esfericidade dos fragmentos avaliados e a curva da distribuição granulométrica real e a preditiva pelo modelo KCO, da imagem analisada.

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

O desenvolvimento das pesquisas foi realizado na Mina Horto Baratinha, em Antônio Dias – MG, onde foram adquiridas as imagens dos desmontes utilizados neste trabalho.

Os desmontes na mina Baratinha, são realizados pela empresa DINEX Engenharia Mineral, que é responsável pelo plano de fogo, perfuração, carregamento e detonação dos desmontes programados pela equipe de planejamento de curto prazo da BEMISA HOLDING S.A.

Os materiais e métodos aqui apresentados foram abordados de forma a servir também como um roteiro de campo. Apesar de estarem interligados ao projeto, as coletas de dados e elaboração dos cálculos puderam ser feitas de maneira independente.

Os materiais e métodos expostos neste trabalho foram tratados de modo a seguir uma



cronologia de procedimentos para a obtenção do resultado da pesquisa desenvolvida.

Primeiramente são definidas áreas de desmonte de acordo com a qualidade do minério necessário para alimentar a usina pela equipe de curto prazo da mina Baratinha, com a definição das áreas, seus limites são enviados a DINIEX, para posterior construção do plano de fogo de cada desmonte e sua realização, seguindo as melhores práticas de execução e segurança.

Com os desmontes realizados, inicia-se os trabalhos de capturas das imagens dos desmontes para posterior análise com o *software Wipfrag 3.0*.

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, adotou os passos a seguir, conforme ordem de execução abaixo.

- i. Escolha dos bancos desmontados para estudo;
- ii. Seleção dos modelos de fragmentação a serem utilizados na análise;
- iii. Obtenção dos parâmetros do plano de fogo e imagens do desmonte;
- iv. Realização da análise das imagens para obtenção das curvas preditivas e realizadas com o *software Wipfrag 3*.
- vi. Análise dos resultados obtidos e apresentação na forma de TCC.

Os dados utilizados para conduzir este estudo foram adquiridos durante operações de desmonte em bancadas para a extração de minério de ferro. Além disso, foi realizado um levantamento bibliográfico abordando temas relacionados à pesquisa, a fim de fornecer suporte tanto para a elaboração do trabalho quanto para a compreensão dos resultados obtidos após o tratamento dos dados.

#### **4.1. Coleta de Dados**

Os dados coletados foram referentes aos bancos de minério desmontados, sendo diferenciados pela altura dos bancos de 5 e 10 metros, onde possuem parâmetros de plano de fogo com diferenças pontuais.

Assim para o desenvolvimento da pesquisa, foram capturadas imagens de 6 desmontes distintos, sendo quatro em bancos de 5m e dois em bancos de 10 m, com parâmetros básicos dos planos de fogo apresentado na tabela abaixo (Tabela 02).



Tabela 2 - Parâmetros básicos dos desmontes da mina Baratinha.

Desmontes	Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Tampão (m)	Profundidade (m)	Diâmetro do furo (mm)	RC (g/m <sup>3</sup> )
4 bancos 5 m	2.30	3.00	1.50	5.00	88.90	0,725
2 bancos 10 m	2.30	3.30	1.50	10.00	88.90	0.823

Fonte: Autor (2023)

O explosivo utilizado é a emulsão encartuchada da Nitrosul Explosivos, fabricada pela empresa Austin Powder S.A.

Figura 7 - Bancada de 10 m de altura em frente de lavra de minério de ferro da mina Baratinha.



Fonte: Autor, 2023.

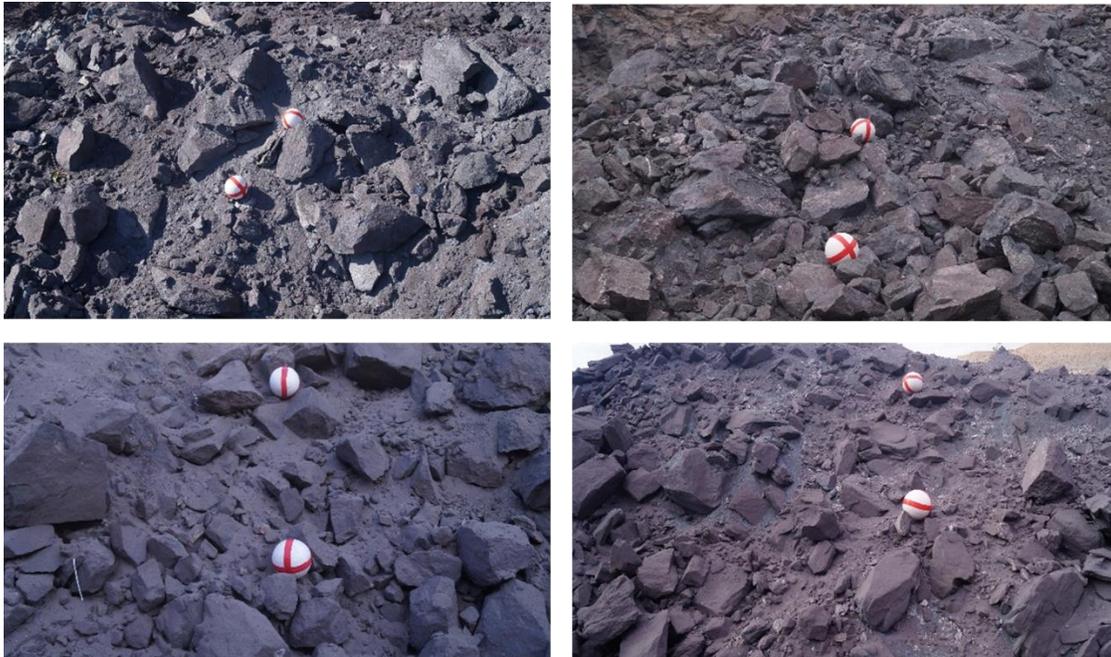
#### 4.2. Captura de Imagens

A aquisição das imagens, foram realizadas nos bancos desmontados, na parte superficial e frontal das pilhas de fragmentos geradas, com o uso de câmera fotográfica digital SONY SLT  $\alpha$ -37, buscando sempre encontrar ângulos de melhor representatividade. Em todas as fotografias duas bolas de isopor, com diâmetro de 250 mm, foram usadas como escala, para se estimar a dimensão dos fragmentos. Com o avanço da lavra dos bancos desmontados mais imagens eram



capturadas visando a formação de um banco de dados fotográficos que representassem como um todo o perfil da pilha do material desmontado, conforme ilustrado na figura 8.

Figura 8 - Banco de minério desmontado, com bolas de isopor de 250 mm de diâmetro para escala.



Fonte: Autor (2023).

#### 4.3. Fotoanálise através de *software* (Estimativa da Curva Granulométrica)

Conforme Quaglio (2020), a fotoanálise desempenha um papel fundamental nas avaliações da fragmentação resultante dos desmontes de rochas por explosivo, sendo empregada como um ponto de referência para comparar a modelos matemático de fragmentação com os fragmentos reais produzidos.

Através das imagens fotográficas obtidas nos desmontes estudados, foi possível avaliar o tamanho dos fragmentos dos materiais desmontados. Para tal, foi utilizado o *software Wipfrag 3*, com a licença da UNIFAL, que é usado tanto para qualificar quanto quantificar o fragmento.

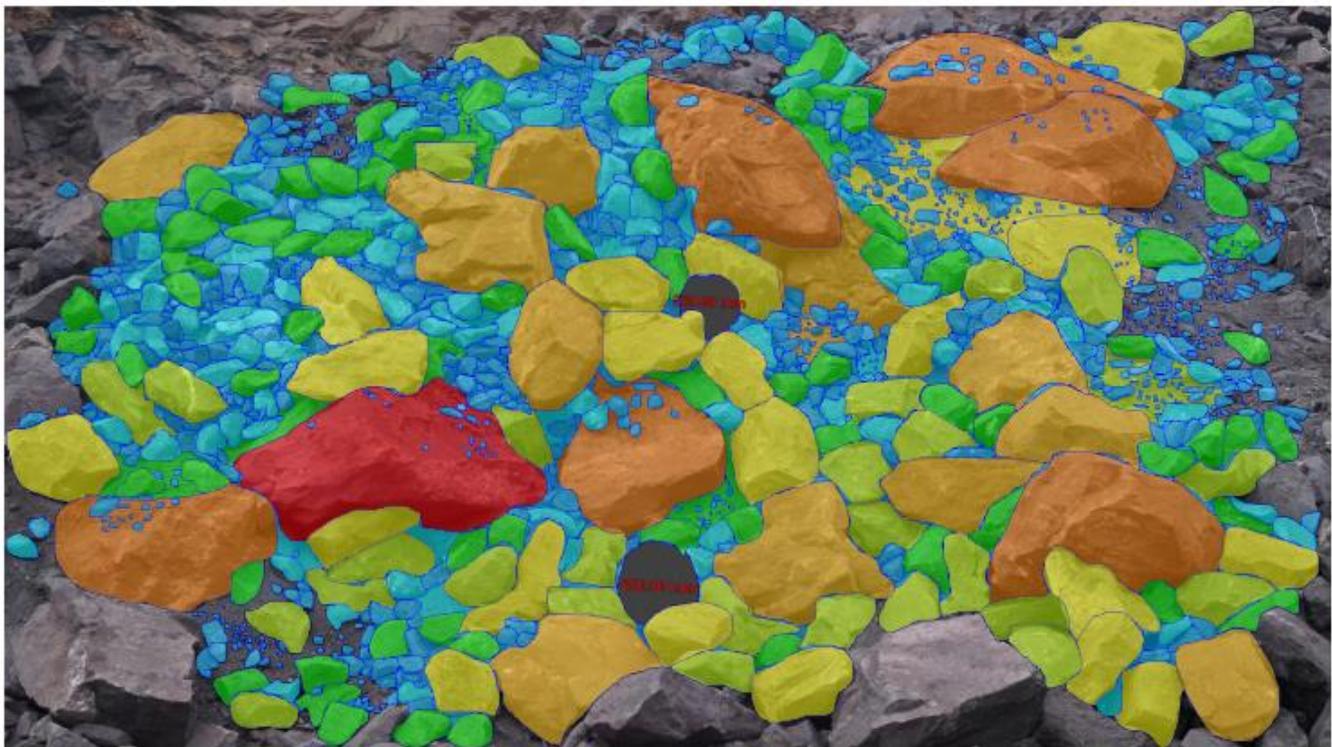
A análise entrega como resposta analítica gráficos que representam as curvas granulométricas de fragmentação dos desmontes, demonstrando a eficiência do desmonte e a média dessa fragmentação correspondente aos finos, grossos e fragmentação total. Abaixo, a



figuras 9 demonstra a delimitação dos fragmentos e o resultado gráfico na forma de curva granulométrica (Figura 10) e histograma (Figura 11) de distribuição granulométrica juntamente com o resultado da distribuição granulométrica, de uma foto analisada.

Estes gráficos de curva granulométrica são gerados, apresentando sempre um quadro de tamanho cumulativo de partículas (série de peneiras, com valores editáveis e seus percentuais passantes), à direita da imagem, e variando a apresentação de dados à esquerda entre valores de tamanhos de percentual passante em 5 peneiras diferentes, Figura 11, que apresenta os percentuais passantes D01, D20, D50, D80 e D99 e, em um segundo gráfico, os parâmetros de plano de fogo proposto com a predição dos valores de  $X_{max}$ ,  $X_{50}$ , e  $b$  semelhantes ao modelo KCO, conforme Figuras 10 e 11. Os valores apresentados são editáveis de acordo com a necessidade de informação.

Figura 9 - Fotografia da pilha de material fragmentado durante o desmonte com explosivos mostrando o delineamento manual dos fragmentos através do software Wipfrag. Propriedade da imagem: câmera – Sony SLT-A37, Resolução: 1478 x 830.



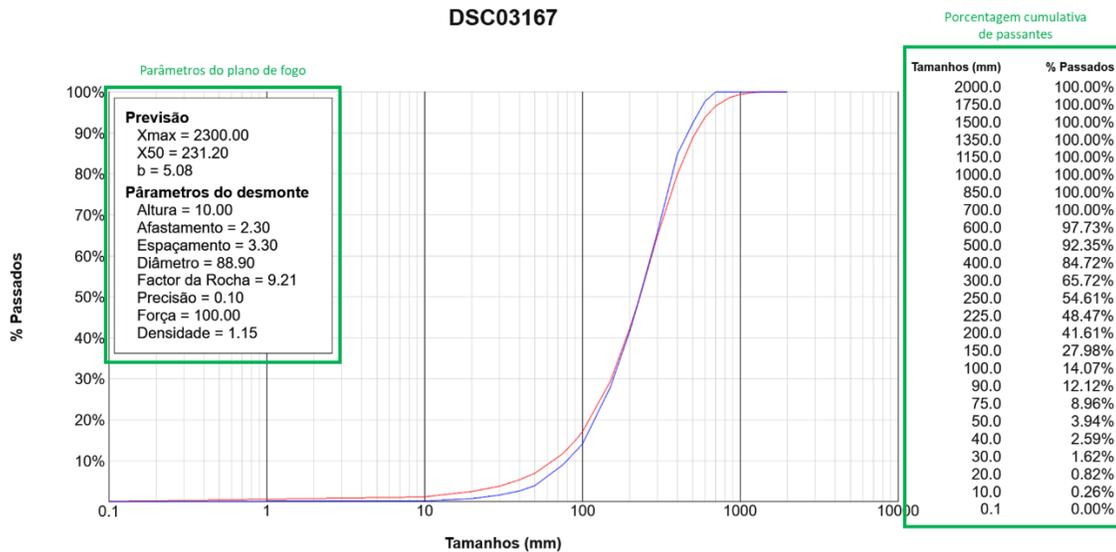
Fonte: Wipfrag 3.0, o Autor (2023)

Os dados do plano de fogo gerados pelo *Wipfrag*, a exemplo da Figura 10 correspondem



seus valores à realidade do plano de fogo executado, sendo atribuídos valores teóricos de acordo com a equação empírica *Swebec* de cálculo do *software*, para alguns parâmetros.

Figura 10 - Gráfico da curva granulométrica geral gerada pelo *Wipfrag* com os dados do plano de fogo gerados automaticamente pelo software do desmorte na mina Baratinha.

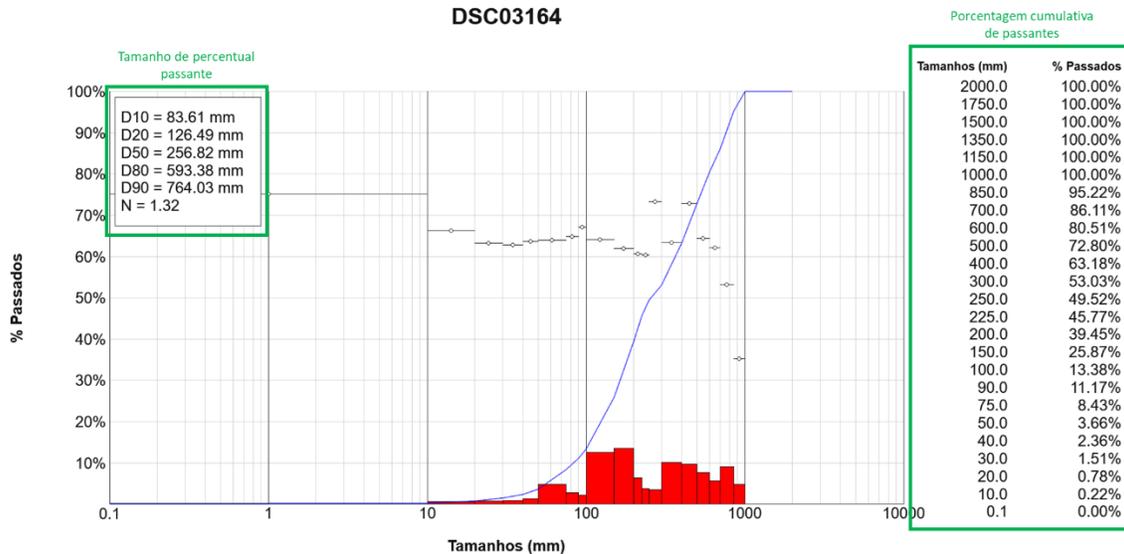


Fonte: *Wipfrag*, Autor, 2023

Figura 11 - Histograma do tamanho dos fragmentos de uma foto gerada pelo *Wipfrag* com



os percentuais passantes (D10, D20, D50, D80 e D90).



Fonte: *Wipfrag*, Autor, 2023

#### 4.4. Modelo De Fragmentação Utilizado

Para avaliar a configuração da fragmentação do material após o desmorte, foram aplicadas as cinco equações inter-relacionadas que constituem o modelo de Kuz-Ram, conforme detalhado no subcapítulo 3.7.1, que trata do modelo de fragmentação Kuz-Ram.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens foram analisadas de forma independente de acordo com a altura do banco desmontado, onde foram analisadas 17 imagens de 4 desmontes de 5 metros e 8 imagens de 2 desmontes de 10 metros, comparando com o modelo KCO, no *software Wipfrag 3.0*, onde foi possível ver a distribuição granulométrica dos desmontes de uma forma geral.

Tomando como referência para análise o *Top Size* do britador primário da usina de beneficiamento da mina Baratinha que possui abertura máxima de 560 mm, sendo este o valor que será referência para o desenvolvimento deste trabalho.

A elaboração dos resultados e a subsequente análise foram conduzidas com fundamentação nos dados das características dos parâmetros dos desmontes no minério de ferro, bem como na previsão da distribuição granulométrica do material desmontado. Posteriormente, esses resultados foram comparados com os dados reais, com o objetivo de

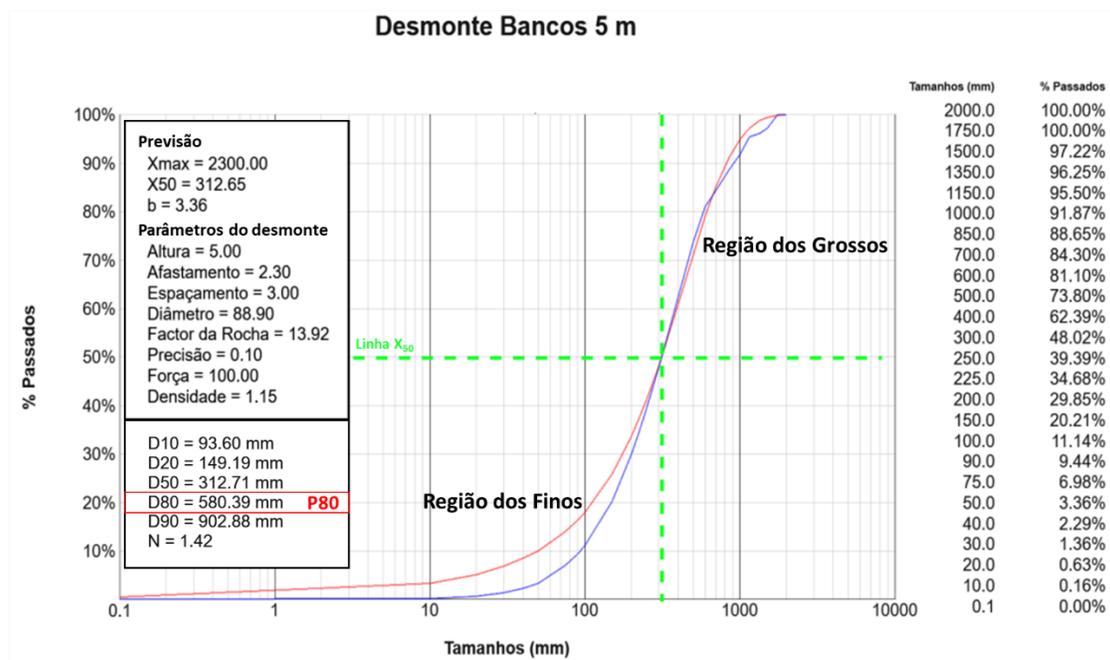


observar possíveis desvios e pontos de melhoria, se necessário. Objetivando a eficiência do processo de fragmentação e, por conseguinte, a padronização da dimensão do material resultante.

## 5.1. ANÁLISE DIGITAL DAS IMAGENS

Após a interpretação de todas as imagens analisadas pelo Wipfrag, foram estudados preliminarmente dois cenários diferentes, em bancos de 5 m e de 10m onde seus parâmetros são distintos exibidos na tabela 2 acima. O produto das análises das imagens foram representadas nas curvas granulométricas das figuras 12 e 13, apresentadas abaixo, além dos histogramas gerados durante a fotoanálise, que está em anexo, representando os dois cenários, anexo 1 com bancos de 5 m e o anexo 2 com bancos de 10 m.

Figura 12 - Gráfico comparativo das curvas KCO (vermelho) x Real (azul), com os parâmetros geral dos desmontes e a distribuição granulométrica do banco desmontado de 5 metros de altura, indicando o P80 da curva.



Fonte: Wipfrag, Autor, 2023

Após a análise individual de cada foto, foi realizado a integração dos resultados das



imagens, gerando um gráfico geral para o desmonte de 5 m, que corresponde aos parâmetros e características gerais dos desmontes e distribuição granulométrica, com variação de 0 a 1750 mm de tamanho.

O gráfico da figura 12, mostra a curva da distribuição granulométrica global das imagens processadas pelo Wipfrag, sendo geradas duas curvas, uma em azul (dados reais), e outra em vermelho (dados teóricos) mostrando a distribuição granulométrica calculada pelo modelo KCO de fragmentação.

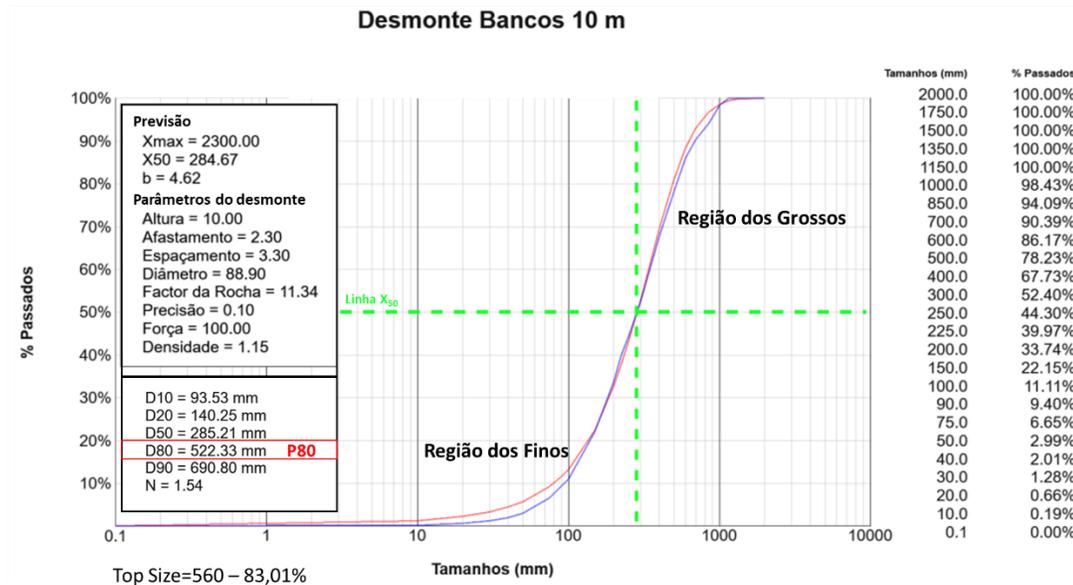
A partir do  $X_{50}$ , foi possível separar a área do gráfico em duas regiões distintas, a dos finos e a dos grossos, neste contexto é possível verificar que há uma boa aderência das duas linhas na região dos grossos, contudo menos uniformes, já na região dos finos, verifica-se um distanciamento entre as duas linhas a partir de fragmentos menores que 20 cm. Este fato ocorre principalmente porque o modelo Kuz-Ram, possui uma limitação em fazer a leitura de finos e até mesmo fazer essa delimitação automática ou manual.

Sendo o *Top Size* do britador primário de 560 mm, é possível afirmar que 78.61% do material desmontado está dentro dos limites do tamanho aceitável para alimentar a usina e que 21.39% necessitarão de fragmentação secundária para ser enviado ao britador. O P80 dos desmontes em bancadas de 5 m é de 580.39 mm, 3,51% acima do valor do *top size* do britador primário.

Figura 13 - Gráfico comparativo das curvas KCO (vermelho) x Real (azul), geradas pelo programa Wipfrag com os parâmetros geral dos desmontes e a distribuição granulométrica do banco desmontado de 10 metros de altura, indicando o P80 da curva. É possível notar uma mudança no comportamento das curvas nas regiões dos finos e menos expressivo na região dos



grossos.



Fonte: Wipfrag, Autor, 2023.

Para os desmorte em bancadas de 10m (Figura 13) foi observado uma boa correlação entre as curvas real em azul e a teórica em vermelho, contudo vale destacar a baixa capacidade de avaliação dos finos com o modelo Kuz-Ram.

Os fragmentos variam de 0 a 1150 mm de tamanho, mostrando que segundo o *Top Size* de 560 mm, cerca de 83.01% do material avaliado está dentro das especificações para o britador primário, e o P80 neste caso é de 522.33 mm.

Tabela 3 - Parâmetro dos planos de fogo para os desmorte de 5 e 10 m de altura, assim como diversos parâmetros preditivos dos respectivos desmorte. Além de malha e percentual de



passante de fragmentos. O P80 é destacado em vermelho na tabela.

Parâmetros manuais	BANCADAS	
Afastamento (m)	2.30	2.30
Espaçamento (m)	3.00	3.30
Tampão (m)	1.50	1.50
Altura (m)	5	10
Diâmetro do furo (mm)	88.90	88.90
Densidade Explosivo(g/cm <sup>3</sup> )	1.15	1.15
RC (g/m <sup>3</sup> )	0,725	0.823
Parâmetros preditivos		
X <sub>max</sub> (mm)	2300	2300
X <sub>50</sub> (mm)	312.65	285.67
n	1.42	1,54
b	3.36	4.62
Fator de Rocha	13.92	11.34
PASSANTE (%)		
Tamanho dos fragmentos (mm)		
D01	25.05	25.50
D20	148.85	140.25
D50	313.75	285.21
D80 (P80)	584.91	522.33
D99	1660.23	1054.44
SPH	0.71	0.70

Fonte: Autor, 2023.

Com os dados dos parâmetros dos desmontes apresentados acima (Tabela 3) juntamente com as curvas da distribuição granulométrica das figuras 12 e 13, é possível extrair informações preliminares para melhoria dos desmontes, a fim de ajustar a curva real à teórica do modelo KCO.

São vários os fatores que podem ser apontados como contribuintes para a deficiência do desmonte primário entre eles estão o desvio de perfuração, a altura da bancada, o afastamento excessivo, o espaçamento, o tamponamento, entre outros, conforme afirmado por Silva (2019) Em virtude da significativa heterogeneidade das rochas, o método de cálculo do plano de fogo deve ser fundamentado em um processo contínuo de ensaios e análises, constituindo-se como um ajuste por tentativa, com o objetivo de proporcionar resultados mais favoráveis nas operações de desmonte.

A grande variação granulométrica das partículas resultantes dos métodos utilizados é evidente, e essa desigualdade é atribuída a um plano de fogo menos eficiente, adaptado às



características da rocha a ser desmontada.

Contudo vale lembrar que a geologia da mina Baratinha é muito complexa para que ocorra desmonte em litologias específicas, assim a melhoria dos desmontes, seria possível com alterações em alguns parâmetros do plano de fogo.

Embora o modelo possa identificar algumas questões problemáticas, uma de suas limitações é a incapacidade de estimar de forma eficaz a presença de material muito fino, principalmente abaixo de 10 mm. Porém a questão dos finos, é menos relevante para alimentação da usina, que a geração excessiva de matacões maiores que o *top size* da usina de beneficiamento.

## 6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O Objetivo deste trabalho foi avaliar preliminarmente a eficiência da aplicabilidade do modelo Kuz-Ram, com fotoanálise dos desmonte em minério de ferro da mina Baratinha, a fim de conseguir verificar a granulometria geral dos desmontes.

De um modo geral, os resultados obtidos no decorrer desta pesquisa foram satisfatórios, onde foi possível avaliar os dois cenários estudados, os desmontes em bancadas de 5 e 10 m de altura, chegando à algumas conclusões.

Primeiramente é possível observar que os desmontes em bancadas de 10 m, foram mais eficientes que nas bancadas de 5 m, onde a variação granulométrica foi de 0 a 1150 mm, para 10 m e de 0 a 1750 mm, para 5 m.

Outro dado interessante obtido neste trabalho, foi que levando-se em consideração *top size* do britador primário de 560 mm, observou-se que o P80 de 10 m e menor que o de 5 m, sendo 522.33 mm. e 580.39 mm, respectivamente, assim sendo, 78.61% do material desmontado é passante no britador primário nos desmontes de 5m e 83.01% do material avaliado está dentro das especificações para o britador primário em desmontes de 10 m.

A pesquisa desenvolvida sobre o modelo Kuz-Ram, mostrou que é fácil de ser aplicado devido à praticidade de sua implementação com o *software Wipfrag*, sendo uma excelente ferramenta de análise para a previsão dos produtos resultantes de operações de desmonte de rochas em mina a céu aberto, este instrumento possibilita a avaliação de forma acessível e intuitiva dos impactos que alterações nas variáveis do plano de fogo acarretarão na fragmentação alcançada.

O modelo Kuz-Ram, aplicado nesta pesquisa, apontou que os desmontes da mina



Horto Baratinha, possui uma eficiência satisfatória, contudo observando a curva preditiva, é possível indicar melhorias em alguns parâmetros nos planos de fogo, afim de melhorar os desmontes de minério de ferro.

Mesmo que a utilização do modelo de Kuz-Ram tenha confirmado uma faixa granulométrica do desmonte adequada na alimentação do britador primário da usina, possui como desvantagem a impossibilidade de estimar tamanho de fragmentos finos, o que acaba limitando uma melhor avaliação sobre o desmonte.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

A necessidade de aplicação de outros modelos de avaliação que apresentem resultados mais satisfatórios sobre o desmonte desse tipo de maciço rochoso. A fim de mensurar melhor os finos.

Conduzir pesquisas acerca da mecânica das rochas e suas propriedades, as quais têm pertinência no contexto do planejamento de desmonte por explosivos, viabiliza a precisa determinação da malha ótima com custo mínimo, mediante a utilização de simulações que reproduzam o processo de desmonte de rochas com elevado grau de precisão.

Realizar investigações sobre a influência da substituição do material de tampão nos resultados de fragmentação da rocha, uma vez que a utilização de "pó de perfuratriz" não assegura o devido confinamento da carga explosiva, resultando na perda de energia útil durante o processo de detonação.



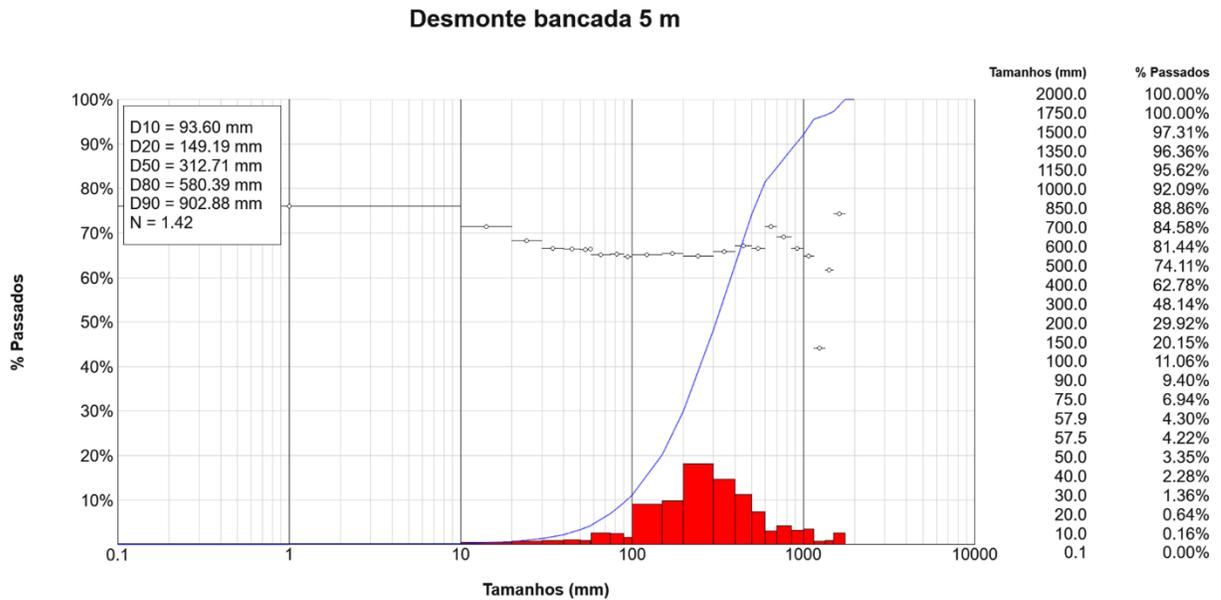
## 8. BIBLIOGRAFIA

- BRAGA, F. C. S. **Gênese e controle dos depósitos hematíticos-magnetíticos encaixados no Complexo Guanhães** Tese, UFMG. – 2019.
- CUNNINGHAN, C.V.B. **Fragmentation Estimations and The Kuz-Ram Model** – Four Years On. In Proceedings 2nd Int. Symp on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, 1987. p. 475 – 487.
- JIMENO, C. L. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas**. Ingeopress Espanha, 2003.
- KUZNETSOV, V.M. **The mean diameter of the fragments formed by blasting rock**. Soviet Mining Science, 1973. p. 144-148. <https://doi.org/10.1007/BF02506177>
- MACHADO, F. H. C. 2016. **Desmonte de rocha: Influência da orientação das frentes de trabalho no desempenho da fragmentação**. ISEP - DM – Engenharia Geotécnica e Geoambiente, 134 f.
- MORAIS, J. L. **Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos**. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- QUAGLIO, O. A., **Adequação do índice de blastibilidade de modelos de fragmentação ao desmonte de rochas em pedreiras de brita**. UFOP- Ouro Preto. 211 f., 2020.
- SILVA, V C. **Desmonte de rochas** São Paulo :Oficina de Textos, 2019.
- WIPWARE. **Sampling and Analysis Guide**. Versão 1, Ontario, 2017. 40p. Disponível em <http://wipware.com/wp-content/uploads/2018/01/Sampling-and-Analysis-Guide.pdf>. Acesso em: 13 Mai 2023.



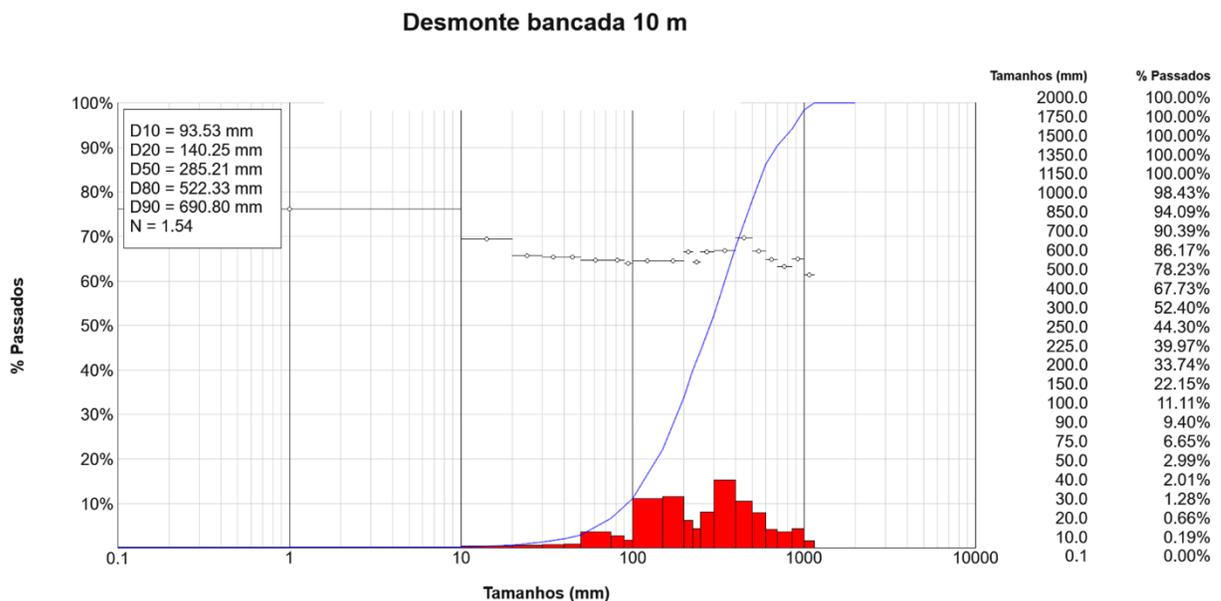
## 9. ANEXOS

Anexo 1 - Histograma do tamanho dos fragmentos da fotoanálise para desmontes em bancadas de 5 m, mostrando a curva calculada Swebec calculada.



Fonte: Wipfrag, Autor, 2023.

Anexo 2 - Histograma do tamanho dos fragmentos da fotoanálise para desmontes em bancadas de 10 m, mostrando a curva calculada Swebec calculada.



Fonte: Wipfrag, Autor, 2023.