

**MATHEUS VELASCO FERRER ALMEIDA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PLANO DE FOGO  
PARA DESMONTE DE CALCÁRIO**

São Paulo

2019

**MATHEUS VELASCO FERRER ALMEIDA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PLANO DE FOGO  
PARA DESMONTE DE CALCÁRIO**

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. Wilson Siguemasa Iramina

São Paulo  
2019

2991824

TF-2019

AL64a

H2019e



Escola Politécnica - EPMI



31700002873

Catálogo-na-publicação

Almeida, Matheus Velasco Ferrer

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PLANO DE FOGO PARA  
DESMONTE DE CALCÁRIO / M. V. F. Almeida -- São Paulo, 2019.  
38 p.

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

1.Desmonte de rochas 2.Calcário (Pratápolis, MG) 3.Softwares (Uso)  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de  
Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

## RESUMO

O desmonte de rochas é uma técnica na mineração crucial para que o restante das operações funcione corretamente. A utilização de explosivos e cálculo de malha é importante nesse aspecto para gerar um tamanho ideal de partículas, representado por uma curva de distribuição que pode ser caracterizada tanto por métodos manuais quanto pela utilização de softwares leitores de imagens. Dentre os diversos aspectos que compõe um plano de fogo, existe um fator chamado consumo específico, que mede a quantidade de explosivos pelo volume do maciço a ser detonado. Em um contexto de constante avanço de processos e a otimização de resultados, esse trabalho surge como forma de se avaliar um desmonte típico que ocorre em minerações de fosfato, quando há a necessidade de se detonar grandes monolitos de calcário para acessar níveis inferiores na mineração. Para isso, realizou-se acompanhamento de um desmonte real recolhendo dados da malha utilizada e imagens da operação final. Utilizando o software Split-Desktop e literatura base para caracterizar os resultados obtidos, comprovou-se que o plano de fogo atual não atendia aos parâmetros ideais. Após isso, elaborou-se uma nova malha, com parâmetros justificados pela literatura e que atenderia às especificações otimizadas, entretanto, em virtude da falta de desmontes na mineração não foi testada em ensaios reais para que pudesse ser comprovado o aumento de eficiência.

**Palavras-Chave:** Plano de fogo. Desmonte de calcário. Otimização de malha.

## **ABSTRACT**

Rock blasting is a crucial mining technique for the remainder of properly functioning operations. The use of explosives and mesh calculation is important in this aspect to generate an optimal display size, represented by a distribution curve that can be characterized by both manual methods and the use of image reading software. Among the various aspects that make up a fire plan, there is a factor called specific consumption, which measures the amount of explosives by the volume of the mass to be detonated. In a context of constant process advancement and of results optimization, this work emerges as a way of evaluating a typical disassembly that occurs in phosphate mining, when it is necessary to detonate. For this, it made a real study case follow up by the collection of data from the mesh used and photos taken of the final operation. The use of Split-Desktop software and base literature to characterize the results proved that the current blasting plan did not meet the ideal parameters. After that, we elaborated a new mesh, with parameters justified by the literature and that would meet the optimized specifications, but that was not tested due to lack of disassembly in the mining and therefore the efficiency increase could not be proven.

**Key-Words:** Blasting plan. Limestone blasting. Mesh optimization.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DE IMAGEM DE PILHA DESMONTADA POR <i>SOFTWARE</i> DE ANÁLISE DE IMAGENS .....	13
FIGURA 2 - FOTOS E CURVA GRANULOMÉTRICA REFERENTES AO DESMONTE EM UMA MINERAÇÃO INDIANA.....	14
FIGURA 3 - PARÂMETROS DE UM DIAGRAMA DE FOGO PARA DESMONTES EM BANCADAS A CÉU ABERTO.....	15
FIGURA 4 - <i>ICEBERGS</i> OU MONÓLITOS DE CALCÁRIO .....	21
FIGURA 5 - USINA DE TRATAMENTO E MACIÇO ALVO DE DESMONTE.....	22
FIGURA 6 - VISTA AÉREA DO MONÓLITO DE CALCÁRIO .....	23
FIGURA 7 - ACOMPANHAMENTO DE PLANO DE FOGO .....	24
FIGURA 8 - CARACTERIZAÇÃO DE FUROS DE PLANO DE FOGO .....	24
FIGURA 9 - DADOS DO EXPLOSIVO UTILIZADO .....	25
FIGURA 10 - CARGA CALCULADA POR FURO .....	26
FIGURA 11 - VALORES DE RAZÃO DE CARGA ESTIMADA PARA O DESMONTE .....	27
FIGURA 13 – MATERIAIS USADOS DO DESMONTE.....	28
FIGURA 14 - SÉRIE DE FOTOS DO DESMONTE REALIZADO .....	28
FIGURA 15 - FOTOS DO DESMONTE REALIZADO .....	29
FIGURA 16 - ESTACA DE REFERÊNCIA DE 1 METRO DE COMPRIMENTO .....	30
FIGURA 17 - DESMONTE AVALIADO PELO SOFTWARE SPLIT DESKTOP .....	31
FIGURA 18 - MALHA OTIMIZADA DE DESMONTE .....	34
FIGURA 19 - MODELO DE ACIONAMENTO PROPOSTO PARA MALHA NOVA .....	34

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PERFURAÇÃO ESPECÍFICA PARA QUATRO CATEGORIAS DE ROCHAS .....	17
GRÁFICO 2 - DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DO DESMONTE EM POLEGADAS PELO <i>SOFTWARE</i> SPLIT DESKTOP .....	32

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE DESMONTE .....	16
TABELA 2 - VARIÁVEIS DE CÁLCULO DE P50 .....	17
TABELA 3 - FATORES DE ROCHA .....	18
TABELA 4 - PERFURAÇÃO ESPECÍFICA PARA QUATRO CATEGORIAS DE ROCHAS.....	18
TABELA 5 - % PASSANTE EM CENTÍMETROS EM DESMONTE DE CALCÁRIO OTIMIZADO .....	19
TABELA 6 - PROPRIEDADES DA MINERAÇÃO EM ESTUDO .....	21
TABELA 7 - QUANTIDADE DE EXPLOSIVOS CALCULADA PARA DESMONTE .....	26
TABELA 8 - DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS DO DESMONTE .....	322
TABELA 9 - VALORES DE CAMPO PARA FÓRMULA DE HUSTRULID .....	33
TABELA 10 - VARIAÇÃO DE MÉTODOS .....	33
TABELA 11 - RAZÃO DE CARGA DO MODELO ATUAL VERSUS O PROPOSTO .....	35
TABELA 12 - P50 DO MODELO ATUAL VERSUS O PROPOSTO .....	35

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.</b>	<b>Medições de performance de desmontes .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.</b>	<b>Softwares de reconhecimento de imagens .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.</b>	<b>Parâmetros de um plano de fogo .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4.</b>	<b>Métodos analíticos de se calcular resultados de desmonte .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.</b>	<b>Valores de desmonte de calcário .....</b>	<b>18</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.</b>	<b>Descrição da mineração e do desmonte avaliado .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.</b>	<b>Acompanhamento do Plano de fogo .....</b>	<b>23</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.</b>	<b>Desmonte real .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.</b>	<b>Modelo otimizado .....</b>	<b>33</b>
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Para que possam ser extraídos minerais de interesse do seu ambiente natural é necessário fragmentar a rocha hospedeira. A necessidade de se obter tais materiais surge quase que simultaneamente à origem do homem, com os primeiros relatos sendo de 40.000 A.C. com povos no sul da África que escavavam carvão de jazidas para poder utilizar como combustível de fogo (COULSON, 2012).

Na modernidade do século XXI, as maneiras de lavra evoluíram tecnicamente e o uso de tecnologias é cada vez mais importante para se obter um processo produtivo de mineração. Os explosivos na mineração correspondem a uma dessas maiores tecnologias, que está em constante pesquisa e progresso científico. Tal invenção, surgida no século XVII inovou na forma de fragmentar rochas, sendo um método novo, barato e que garantia a potência suficiente para separar minerais com durezas maiores, os quais o homem ainda tinha muita dificuldade de minerar.

O emprego de explosivos na mineração é chamado de desmonte e possui um papel fundamental para garantir que todas as outras sub-etapas associadas garantam um bom desempenho, isto é, operações de carregamento, transporte, britagem primária, moagem, flotação, entre outros. Os processos estão intrinsicamente atrelados ao tamanho de material. Quando pensamos em fatores como energia empregada, abertura de mandíbulas, manutenção de equipamentos e, até mesmo, quantidade de combustível de veículos, o desmonte de rochas é responsável pelo controle de tal tamanho.

No entanto, controlar a fragmentação através de modelos de malhas de explosivos é uma tarefa que envolve uma combinação extensa de variáveis associadas à lavra e aos explosivos escolhidos o que torna estudos na área cada vez mais importantes em um contexto onde a produtividade das minerações aumenta rapidamente.

Uma rocha resistente que requer o uso de explosivos em seu desmonte e que também é muito importante para a economia brasileira é o calcário. Ele é matéria prima para a indústria de fertilizantes e sua gênese, muitas vezes, está associada à formação de outro mineral tão importante quanto para a venda no mercado, o fosfato. O maior problema dessa característica geológica de gênese de ambos é que enquanto o fosfato pode ser lavrado mecanicamente, o

calcário precisa de muita energia para fragmentar. Isso faz com que, em minerações do gênero, a escavação opte por lavrar apenas o fosfato em volta e, com isso, surjam grandes monolitos de calcário na lavra, os quais atrapalham o acesso a níveis inferiores e a circulação dentro do sítio.

O objetivo desse estudo é avaliar as características atuais de um desmonte de rocha de calcário localizado em uma cava a céu aberto em Minas Gerais, Brasil para garantir acesso ao fosfato ao redor. Pretende-se estudar tais monolitos de calcário e simular o resultado do desmonte por meio de um software de leitura de imagem. Após isso, tem-se por objetivo indicar parâmetros de melhoras para novas operações no futuro visando um P50 aproximado que seja aproveitável para operações subsequentes de tratamento do minério.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Medições de performance de desmontes

A performance de um desmonte é medida após a execução do plano de fogo proposto. Para isso, avaliam-se os resultados de: fragmentação, tamanho e dispersão da pilha de fragmentos, grau de movimento, danos às estruturas, impacto ambiental, custo e resultados dos processos posteriores como britagem e moagem (JIMENO e CARCEDO, 1995).

A função primordial de se realizar um desmonte é fraturar a rocha em fragmentos que possam ser eficientemente transportados e tratados nas etapas subsequentes. As características específicas das rochas fazem com que o desmonte tenha uma natureza incerta com resultados relacionados ao tamanho final de fragmentos, gerando uma curva de distribuição granulométrica (JIMENO e CARCEDO, 1995) que pode ser medida manualmente ou com a utilização de softwares leitores de fotos de pilhas.

Como já citado, a distribuição de fragmentos afeta diretamente a produção das etapas subsequentes, sendo importante o controle do desmonte de forma a evitar finos excessivos ou fragmentos muito grandes (SCOTT et al., 1996). Em lavras a céu-aberto que utilizam majoritariamente desmonte de explosivos como meio de escavação, a eficácia global da operação depende diretamente do grau de otimização dos parâmetros de perfuração e desmonte.

Um desmonte que utiliza pouca carga de energia para fraturar as rochas gera partículas classificadas como *oversize*. Isso significa que após a operação de fogo muitos fragmentos estão com o tamanho acima do limite, tanto para transporte quanto para tratamento. Esses fragmentos devem ser desmontados numa operação secundária por meios mecânicos ou por meio de um segundo desmonte. Uma operação de desmonte secundária consome tempo, capital e, potencialmente, apresenta mais riscos do que um desmonte rotineiro de produção.

Por outro lado, um desmonte que utiliza muita carga e energia gera uma fragmentação excessiva de uma proporção significativa do material. Embora a geração de finos não tenha muito impacto na operação de desmonte, ela pode gerar grande impacto no processamento e um impacto direto e negativo na produção (SCOTT et al., 1996).

Avaliando tais parâmetros e relacionando a melhora de performance com o resultado gerado pelo desmonte é possível inferir sua eficiência, além de alterar variáveis de forma a deixá-la ainda maior.

Do ponto de vista da influência na fragmentação de rochas, existem dois fatores. O primeiro fator são as propriedades específicas da rocha, parâmetros que identificam o comportamento do maciço e que não podem ser controlados. O segundo fator são os parâmetros no desenvolvimento do plano de fogo, os quais são variáveis e, além de serem controláveis, podem também serem otimizados (SINGH et al., 2016).

Em relação ao primeiro fator, as principais características a serem estudadas são: tipos de rocha; resistência à tensão uniaxial; densidade; módulo de Poisson; módulo de Young (SINGH et al., 2016).

Para o segundo fator, os principais parâmetros de estudos são: número de furos; diâmetro do furo; espaçamento de furos; afastamento de furos; profundidade de furos; tipo de explosivo; tamanho de subfuração; sistema de iniciação (JIMENO et al., 1995).

Muitas operações utilizam como indicador de eficiência de desmonte a quantidade de desmontes secundários ou a performance do britador primário ao lidar com os fragmentos gerados (SCOTT et al., 1996). Existem dois meios para se calcular a eficiência:

- Um meio indireto é por meio do monitoramento do britador. Determinam-se, dessa forma: energia consumida pelo britador; tipo, resistência e tamanho do material; tamanho dos produtos britados; taxa de britagem (HUSTRULID, 1999);
- Outro meio mais direto e quantitativo funciona mediante a utilização de um software de reconhecimento de imagens. Ressalta-se que esse método consiste em uma aproximação gerada por uma foto do desmonte. Para se calcular com exata precisão, seria necessário analisar toda a massa desmontada, ou uma parte representativa utilizando a fórmula de Pierre Gy. Como essa etapa de desmonte é uma etapa inicial do processo, para grandes operações isso se torna um processo custoso, demandando muito tempo e esforço do time de operação para avaliar a curva granulométrica manualmente.

Por isso, a necessidade de um programa. Existem várias opções atualmente e, no caso desse estudo, utilizaremos o software Split-Desktop desenvolvido pela Hexagon.

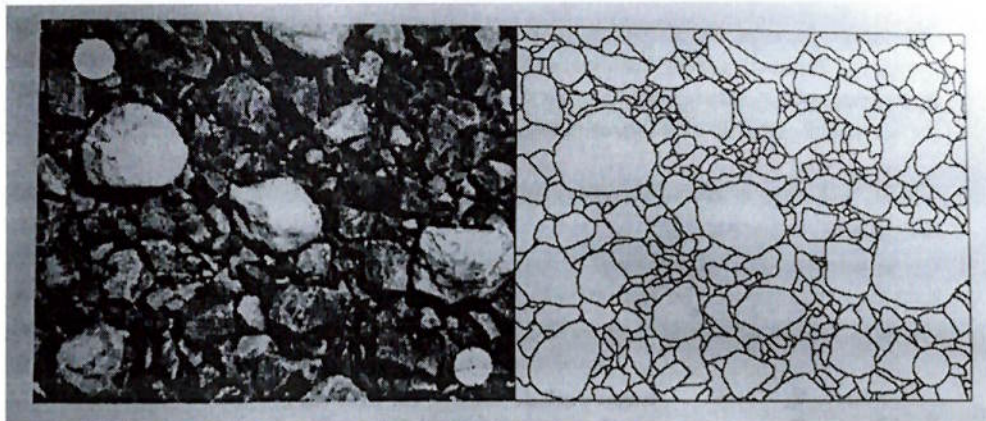
## 2.2. Softwares de reconhecimento de imagens

Como já elencado, os softwares para reconhecimento de imagem são muito importantes para otimizar a coleta de dados de desmonte. Citam-se como benefícios desses métodos:

- Simplicidade do método – necessária apenas uma foto;
- Velocidade – além de não atrasar na operação é o método mais rápido de avaliação;
- Escalabilidade de análises – por ser um método rápido ele também permite um grande nível de amostragens feitas por foto para poder comparar um mesmo desmonte.

Entretanto, por ser um método aproximado tais softwares estão sujeitos a uma taxa de erros muito alta, principalmente pelos fatores de interpretação computacional das imagens (Figura 1):

Figura 1 - Representação de imagem de pilha desmontada por *software* de análise de imagens



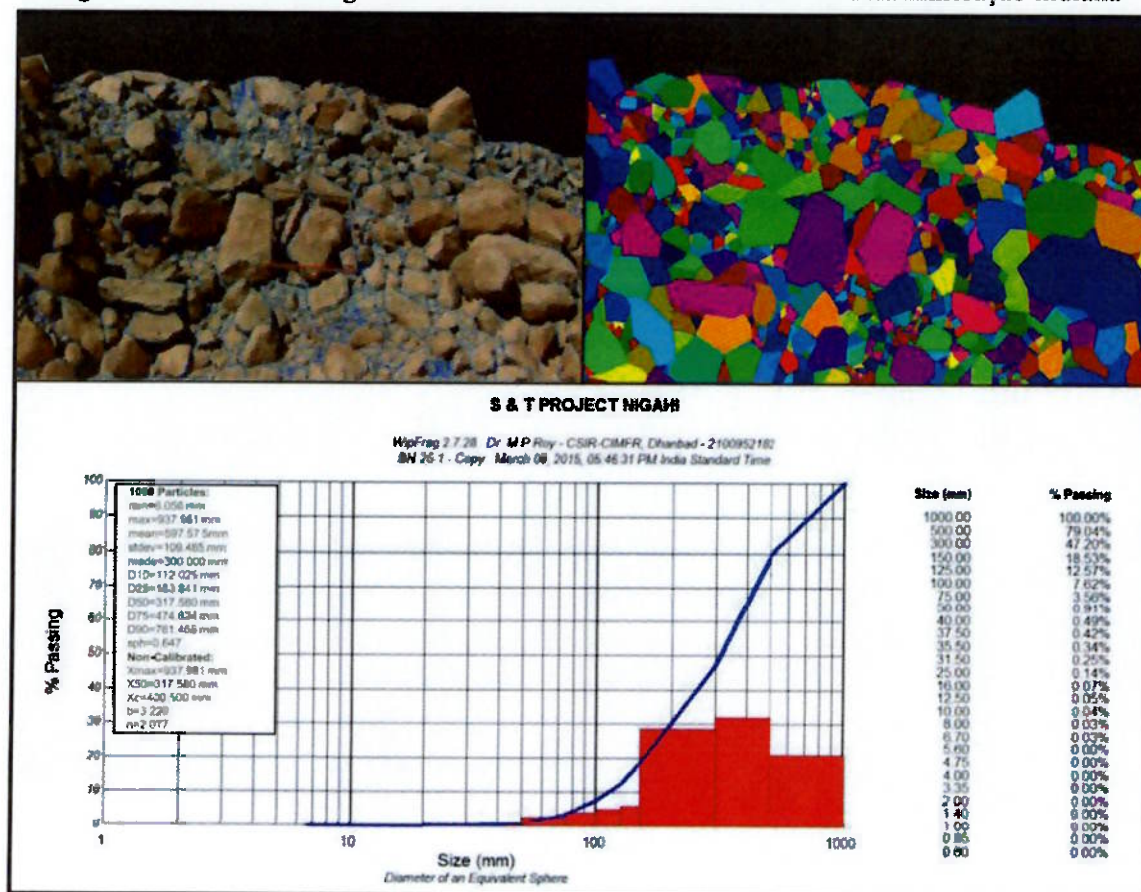
Fonte: Scott et al., (1996).

O que sugere-se para atenuar esse fato é a realização de uma calibragem manual do processamento das imagens, mas ainda assim não será um método tão preciso quanto um manuseio manual.

O funcionamento do software é feito a partir da digitalização das partículas para formas, como ilustrado na Figura 1. Para isso, e cumprindo com as especificidades do software é necessário que antes de se tirar uma foto seja medido um objeto a ser colocado junto a pilha para que o software possa calcular o tamanho das partículas com base no tamanho desse objeto. Também

recomenda-se que seja utilizado um objeto em formato esférico ou que se assemelhe ao máximo ao perfil dos fragmentos. Na Figura 2, é possível observar a utilização do software WipFrag, mas que funciona da mesma forma para qualquer outro programa do gênero:

Figura 2 - Fotos e curva granulométrica referentes ao desmonte em uma mineração indiana



Fonte: Singh et al. (2016).

O software, após interpretar os tamanhos permite que o usuário realize uma operação de criação de curva granulométrica, a qual pode ser aproximada para representativa do desmonte como um todo, assim como ilustrado na Figura 3.

A interpretação da curva é relativa ao processo atual de cada mineração. Não existe, portanto, um método ideal, mas como já elencado existem comprovações teóricas de que uma quantidade exuberante de finos ou de partículas muito grandes é maléfico para minerações usuais.

Dessa forma, juntando tal informação com os dados do britador na mineração, pode-se inferir o tamanho ideal de *Size* garantindo que a maior concentração de partículas fique em torno dele.

A assertividade dos próximos resultados de desmonte do software com tal valor pré-estipulado configura, portanto, uma melhoria no desmonte.

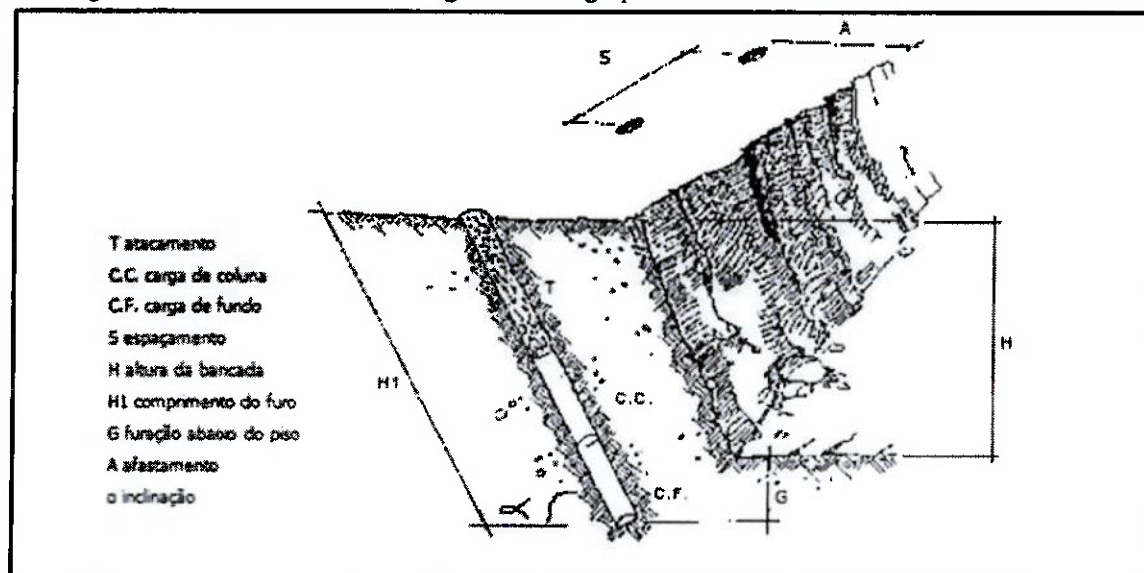
A melhoria de desmonte pode inclusive ser simulada em softwares de reconhecimento, variando os valores iniciais e simulando para a mesma imagem cenários diferentes. Dessa forma, é possível simular diferentes planos de fogo.

### 2.3. Parâmetros de um plano de fogo

Um plano de fogo, como exemplificado na Figura 3, significa a posição e acionamento específicos que os explosivos serão posicionados para realizar um desmonte. Para o cálculo, podemos dividir os principais parâmetros em três grupos:

- Geométricos (diâmetro de furo, afastamento, espaçamento, altura da bancada, subfuração, inclinação, tamanho do furo, tamanho do tampão);
- Físico-químicos (tipo de explosivos);
- Temporais (tempo de iniciação entre furos) (C. JIMENO, E. JIMENO and CARCEDO, 1995).

Figura 3 - Parâmetros de um diagrama de fogo para desmontes em bancadas a céu aberto



Fonte: adaptado de (IGM, 1999).

O grupo dos geométricos é o grupo diz respeito a maior quantidade de variáveis e também é o principal meio de se afetar na produtividade de um desmonte. Além disso, para utilização dos softwares preditivos de curva de fragmentação os valores que podem ser manipulados são os do grupo dos geométricos.

Para aproximação de parâmetros geométricos podemos utilizar o dimensionamento de diagramas segundo Ash (JIMENO e CARCEDO, 1995), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensionamento de malha de desmonte

Parâmetros	Expressão	Constantes empíricas	Intervalos de variação	Características de aplicação
Afastamento	$A = K_a \cdot \phi_f$	$K_a$	$25 \leq K_a \leq 40$	Densidades do explosivo e do maciço rochoso
Espaçamento	$S = K_s \cdot A$	$K_s$	$1,25 \leq K_s \leq 5$	Simultaneidade do disparo
Altura da Bancada	$H = K_H \cdot A$	$K_H$	$1,5 \leq K_H \leq 4$	Produção (em volume)
Atacamento	$T = K_t \cdot A$	$K_t$	$0,5 \leq K_t \leq 1$	Preocupação Ambiental
Furação abaixo do piso	$G = K_G \cdot G$	$K_G$	$0,2 \leq K_G \leq 0,5$	Correcção de Repés

Fonte: Jimeno e Carcedo (1995).

Para o cálculo estimado do diâmetro de furo, Jimeno e Carcedo (1995) propõem uma fórmula que considera a perfuração específico (PS). Esta é definida pelo volume total de furo perfurado pelo volume unitário da unidade de rocha. Para calcular o PS temos:

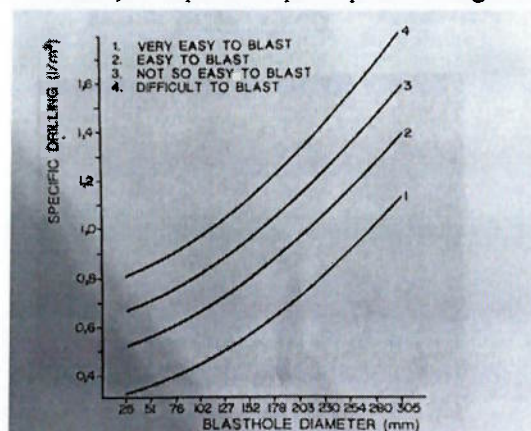
$$PS = \frac{\left(\frac{H}{\cos\beta} + J\right)}{\frac{\beta}{\cos(\beta)} \times S \times H}$$

Onde:

- H: altura da bancada (metros)
- J: Subfuração (metros)
- B: Distanciamento (metros)
- S: Espaçamento (metros)
- $\beta$ : Inclinação do furo (graus)

Por fim, após definir o nível de dificuldade de se desmontar a rocha, pode-se calcular o valor estimado de diâmetro de perfuração através do definido por Jimeno e Carcedo (1995):

Gráfico 1 - Perfuração específica para quatro categorias de rochas



Fonte: Jimeno e Carcedo (1995).

É válido ressaltar que a teoria, embora embasada em fatores reais de desmonte, deve ser ponderada com os fatores específicos de cada caso e, por isso, em diversas situações é possível adaptar as fórmulas teóricas.

#### 2.4. Métodos analíticos de se calcular resultados de desmonte

Além do método pelo uso de softwares para cálculo da curva de tamanho de partículas existem fórmulas definidas por autores como Hustrulid (1999) e Cunningham (1983,1987). Tais especialistas propõe uma forma de cálculo do P50 ou X para utilização de explosivos através da seguinte fórmula:

$$X = A \left( \frac{V_o}{Qe} \right)^{0.8} Qe^{1/6} \left( \frac{S_{explosivo}}{115} \right)^{-19/30}$$

Onde temos as seguintes fórmulas:

Tabela 2 - Variáveis de cálculo de P50

Variável	Descrição	Unidade
X	Média de tamanho de fragmentação	cm
A	Fator de rocha	-
Vo	Volume de rocha	m³
Qt	Massa de explosivo por furo	Kg

Fonte: Hustrulid (1999).

Além disso, o valor de A é variável a depender do tipo de rocha. Hustrulid (1999) define da seguinte forma:

Tabela 3 - Fatores de rocha

<i>Tipo de rocha</i>	<i>Valor de A</i>
Resistência média	7
Resistência alta com muitas fissuras	10
Resistência alta sem fissuras	13

Fonte: Hustrulid (1999).

Como o calcário pode ser considerado uma rocha resistente (CARVALHO, MANUPPELLA e MOURA, 2000) para o estudo serão adotados somente os valores de 10 ou 13, a depender do estado *in situ*.

## 2.5. Valores de desmonte de calcário

Existem diversos fatores para se calcular um desmonte ideal. Uma forma usual é pela razão de quantidade de explosivo por volume de rocha desmontada. Podemos utilizar a literatura para aproximar tais valores, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Perfuração específica para quatro categorias de rochas

<b>Tipo de Maciço</b>	<b>Consumo específico (kg/m³)</b>
Muito competente e resistente	0,6-1,5
Resistência média	0,3-0,6
Brando ou muito fracturado	0,1-0,3

Fonte: Jimeno (1995).

Como já elencado anteriormente, pelo calcário ser uma rocha com resistência competente, um cenário mínimo de carga seria em torno de 0,6 kg de explosivo por m³ de rocha desmontada.

Além disso, após um desmonte podemos comparar os resultados com um modelo de desmonte de calcário otimizado proposto por Cardoso (2015, p. 92):

Tabela 5 - % Passante em centímetros em desmonte de calcário otimizado

<b>% Passante</b>	<b>Desmonte 1</b>	<b>Desmonte 2</b>	<b>Desmonte 3</b>	<b>Desmonte 4</b>	<b>Desmonte 5</b>	<b>Desmonte 5</b>
P10	4,56	4,13	8,77	5,19	2,04	6,28
P20	9,13	7,96	18,77	9,59	4,69	10,40
P30	13,35	11,89	26,81	13,96	8,09	14,01
P40	16,90	15,34	35,54	17,81	10,96	16,73
P50	20,47	10,70	42,20	21,57	19,99	19,80
P60	24,52	22,15	48,40	25,60	15,82	22,15
P70	29,50	25,67	54,06	30,03	18,50	25,40
P80	36,47	29,72	59,78	36,30	21,81	29,75
P90	49,70	34,69	66,36	47,47	27,14	36,45
Top Size	74,74	47,58	74,93	67,42	38,19	54,42

Fonte: Cardoso (2015).

Com isso, podemos inferir que um desmonte otimizado terá seu P50 em média 23cm com maior valor possível sendo de 42cm.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

No intuito de avaliar uma razão de carga de explosivos ideal para os monólitos de calcário na mineração de fosfato será feita uma análise de um desmonte real em uma operação a fim de coletar dados e avaliar a fragmentação obtida.

O plano de fogo utilizado atualmente na mineração será apenas avaliado de maneira inicial, porém a amarração dos explosivos será inferida durante o acompanhamento da operação. Para o recolhimento dos dados após o desmonte serão utilizadas uma câmera fotográfica e uma estaca de um metro de comprimento, que será a legenda de tamanho.

Após isso, em uma segunda etapa serão avaliados os dados e resultados do desmonte, observando a curva granulométrica a ser projetada pelas fotos e estimada através do software Split Desktop, com licença provisória concedida para o estudo em questão.

Após isso, e com informações de outras pesquisas sobre fatores de P50 ideais para operações subsequentes será feita uma análise de plano de fogo ideal e de quantidade a ser utilizada para o desmonte, visando obter através de fórmulas empíricas um valor melhor.

Com isso, irá se obter um novo plano de fogo e uma razão de carga otimizadas que poderão ser testadas futuramente em novas operações e otimizadas da mesma maneira criando-se um processo de revisão e melhoria de tal etapa tão importante para o processo de mineração

#### **3.1. Descrição da mineração e do desmonte avaliado**

A mineração em estudo localiza-se na região sul de Minas Gerais. Ela atualmente desenvolve a atividade de lavra a céu aberto sem tratamento e também com tratamento a seco do mineral fosfato. Por motivos de confidencialidade não será citado o nome da mineração.

O calcário na geologia local é a rocha encaixante e na produção é tido como subproduto. Além disso, a produção média mensal é de 15.000 toneladas de fosfato por mês. A área da cava possui as seguintes características, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades da mineração em estudo

<i>Parâmetros da mineração</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Área aproximada	2.65	hectares
Altura máxima	45	metros
Inclinação rampa	10	percentual
Tipo de lavra	Frente de Lavra	-
Altura taludes	5	metros
Ângulo de talude	60	graus
Minério de interesse	fosfita	-
Tipo de desmonte	Mecânico	-

Fonte: elaboração própria.

Como já elencado o estudo visa observar o desmonte que tem por objetivo a remoção de um monólito de calcário para garantir acesso ao fosfato ao seu redor. Visualmente pela Figura 4 é possível observar as rochas diferentes. A coloração branca mais clara representa maior a presença de calcário enquanto que uma cor com tonalidade marrom escura é um indicativo visual de concentração de fosfato.

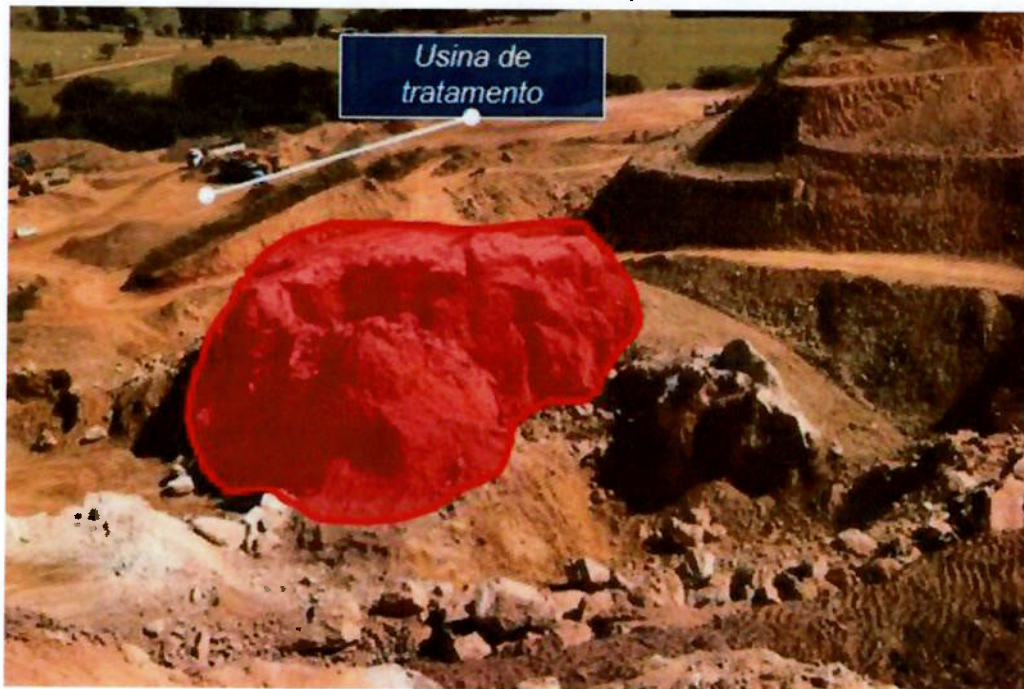
Figura 4 - *Icebergs* ou monólitos de calcário

Fonte: elaboração própria.

Ressalta-se que a mineração não possui um número grande de desmontes em seu histórico e por isso a operação de fogo foi realizada por uma empresa terceira. Além desse fator, soma-se o fato da usina de tratamento estar localizada próxima a área de desmonte como pode ser visto

na Figura 5. Isso dado em conjunto aumenta a necessidade de não haver ultra lançamentos e de se realizar um desmonte com baixa carga.

Figura 5 - Usina de tratamento e maciço alvo de desmonte



Fonte: elaboração própria.

Dados os devidos motivos o plano de fogo foi ajustado, principalmente na malha e nas cargas por furo, de tal forma que o maciço fosse projetado na direção oposta da usina sem que ocorra ultra lançamentos, mas caso ocorra, não prejudiquem os equipamentos.

Após tais considerações deu-se início ao desenvolvimento do plano de fogo, para isso podemos observar por uma foto feita com drone o maciço de calcário na Figura 6.

Figura 6 - Vista aérea do monólito de calcário



Fonte: elaboração própria.

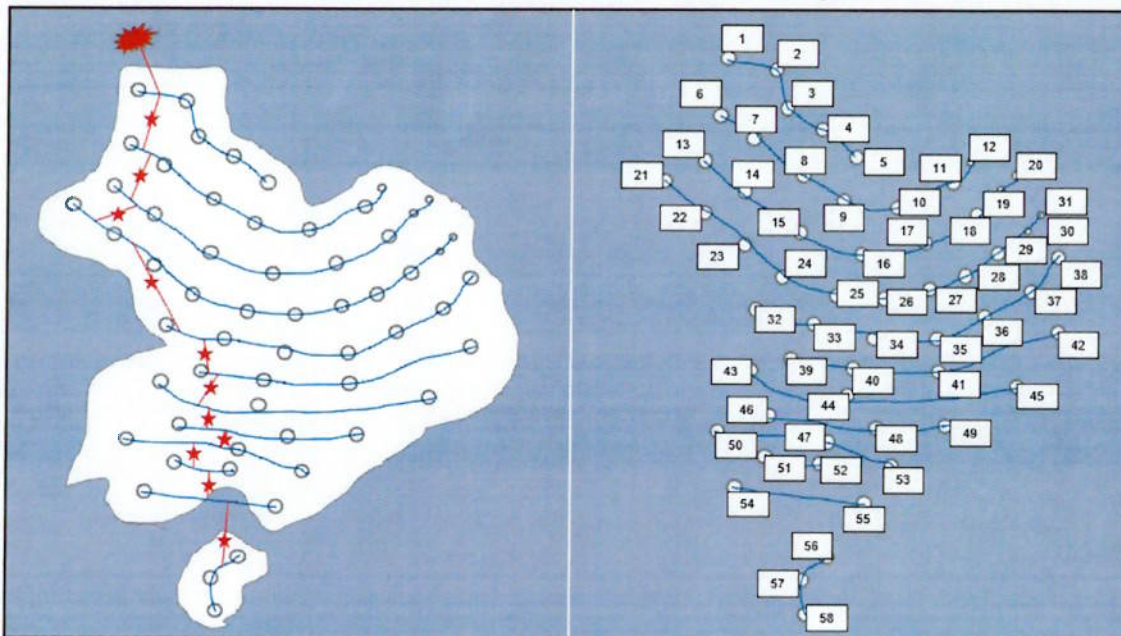
Dessa forma, após ter um traço do maciço foi possível desenvolver uma malha de elaboração própria para acompanhamento de carga utilizada e para o desenvolvimento da amarração do plano de fogo.

Tais fatores são importantes para que seja possível identificar exatamente quais os parâmetros utilizados no fogo, obtendo-se os dados base que serão trabalhos para futura otimização.

### 3.2. Acompanhamento do Plano de fogo

Além de acompanhar a perfuração foi feito um modelo de acompanhamento do desmonte por identificação de furos com números. E, levando-se em conta a necessidade de projetar o maciço para o lado oposto à usina de beneficiamento foi projetada uma primeira versão de malha de acionamento, representada na Figura 7.

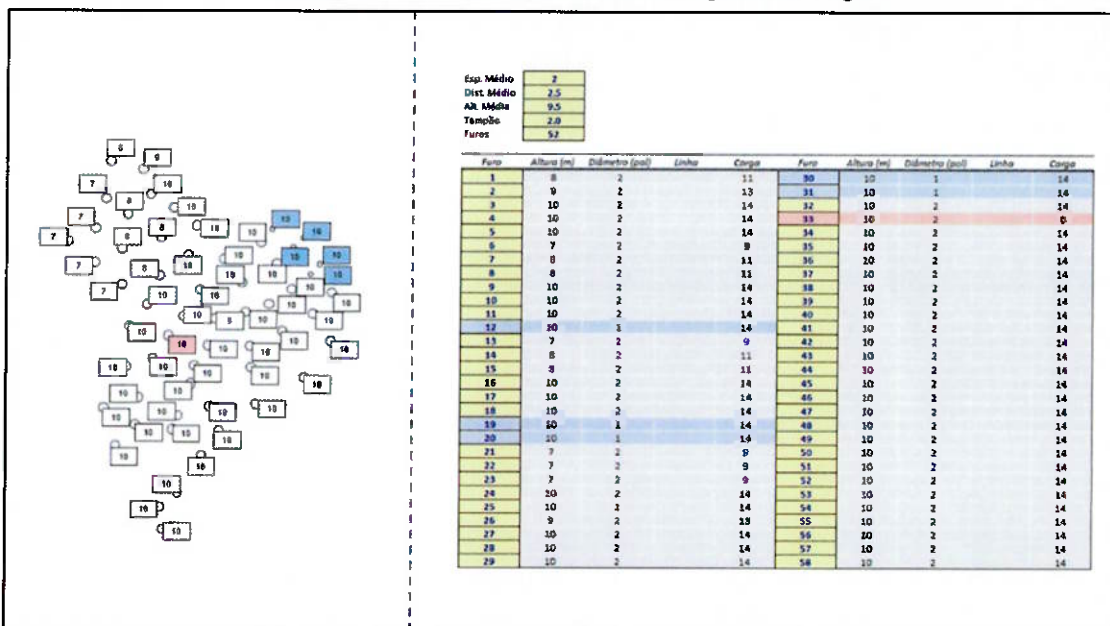
Figura 7 - Acompanhamento de plano de fogo



Fonte: elaboração própria.

Com isso, pode-se caracterizar todos os 58 furos de sondagem em termo de alturas, distanciamento e afastamento médio, diâmetro e tamanho de tampão (Figura 8):

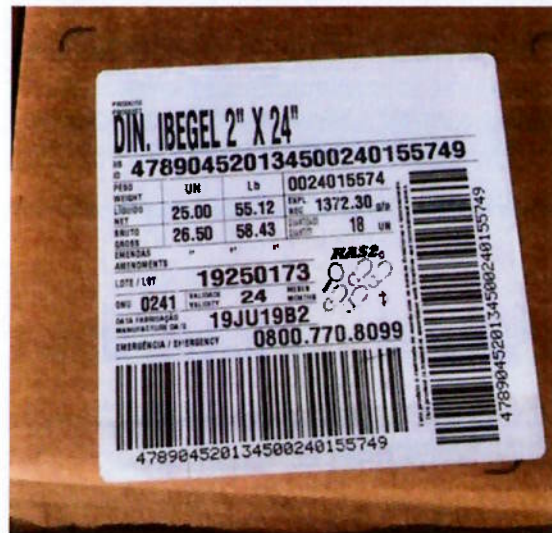
Figura 8 - Caracterização de furos de plano de fogo



Fonte: elaboração própria.

Após isso, foi possível modelar a quantidade empregada de carga para cada furo. Isso foi feito adotando-se os valores referentes do fabricante, como comprimento do furo, presentes na Figura 9.

Figura 9 - Dados do explosivo utilizado



Fonte: elaboração própria.

Figura 10 - Carga calculada por furo

Esp. Médio	2
Dist. Médio	2.5
Alt. Média	9.5
Tampão	2.0
Furos	52

Furo	Altura (m)	Diâmetro (pol)	Linha	Carga	Furo	Altura (m)	Diâmetro (pol)	Linha	Carga
1	8	2	1	11	30	10	1	4	14
2	9	2	1	13	31	10	1	4	14
3	10	2	1	14	32	10	2	5	14
4	10	2	1	14	33	10	2	5	0
5	10	2	1	14	34	10	2	5	14
6	7	2	2	9	35	10	2	5	14
7	8	2	2	11	36	10	2	5	14
8	8	2	2	11	37	10	2	5	14
9	10	2	2	14	38	10	2	5	14
10	10	2	2	14	39	10	2	6	14
11	10	2	2	14	40	10	2	6	14
12	10	1	2	14	41	10	2	6	14
13	7	2	3	9	42	10	2	6	14
14	8	2	3	11	43	10	2	7	14
15	8	2	3	11	44	10	2	7	14
16	10	2	3	14	45	10	2	7	14
17	10	2	3	14	46	10	2	8	14
18	10	2	3	14	47	10	2	9	14
19	10	1	3	14	48	10	2	8	14
20	10	1	3	14	49	10	2	8	14
21	7	2	4	9	50	10	2	9	14
22	7	2	4	9	51	10	2	10	14
23	7	2	4	9	52	10	2	10	14
24	10	2	4	14	53	10	2	9	14
25	10	2	4	14	54	10	2	11	14
26	9	2	4	13	55	10	2	11	14
27	10	2	4	14	56	10	2	12	14
28	10	2	4	14	57	10	2	12	14
29	10	2	4	14	58	10	2	12	14

Fonte: elaboração própria.

É importante frisar parâmetros importantes como os diâmetros diferentes (em azul na Figura 10) e o furo que foi preenchido erroneamente (em vermelho na Figura 10), o qual não foi utilizado no desmonte.

Após isso, e utilizando de informações do fornecedor, pode-se calcular quantas caixas de emulsão foram utilizadas e o volume total de explosivos empregado no desmonte (Tabela 7).

Tabela 7 - Quantidade de explosivos calculada para desmonte

# caixas	# unidades/caixa	caixa (kg)	unidade (kg)	total
38	18	25	1.39	950
1	71	25	0.35	25

Fonte: elaboração própria.

E com isso, pode-se calcular valores médios do desmonte (Figura 11).

Figura 11 - Valores de Razão de carga estimada para o desmonte

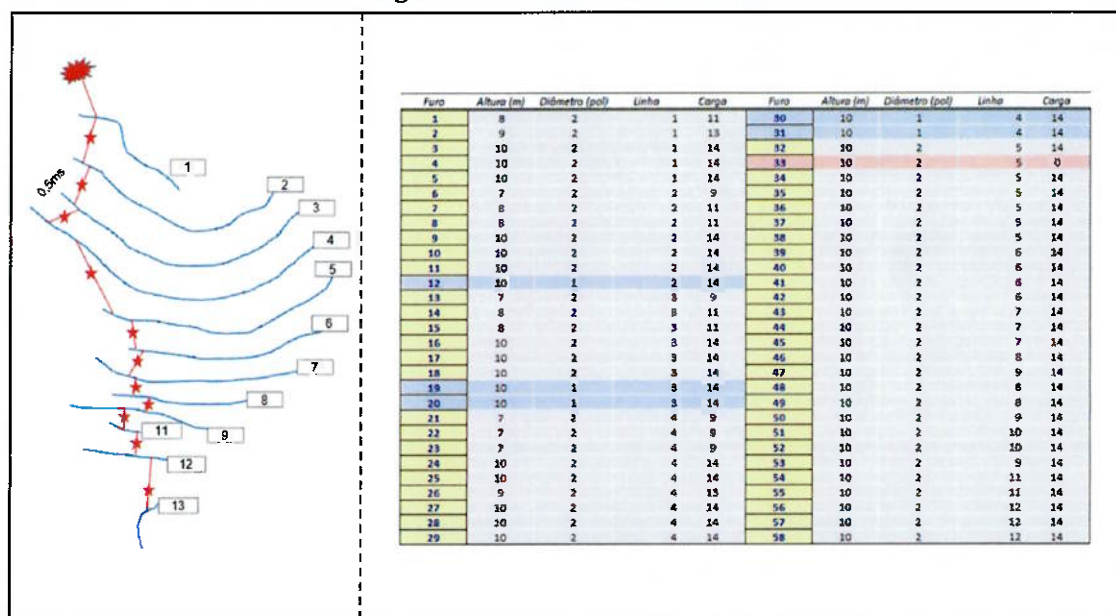
Carga total do desmonte (kg)	975
Volume médio desmontado (m <sup>3</sup> )	2470
Razão de Carga (kg/m <sup>3</sup> )	0.395

Fonte: elaboração própria.

Ressalta-se o principal fator desse desmonte, a razão de carga que quando comparado com o parâmetro usual definido na Tabela 4 deveria ser de 0,6 kg/m<sup>3</sup>. Sabe-se, portanto, que ela é baixa, porém devido aos fatores de precaução tanto por ter sido o primeiro desmonte do gênero na mineração quanto por ser muito próximo à unidade de beneficiamento entende-se a escolha.

Em seguida, por elaboração própria foi definida a malha e ordem de acionamento, conforme a numeração já indicada anteriormente, utilizando retardo de 0,5 ms e ordem exposta na Figura 12.

Figura 12 - Malha de acionamento



Fonte: elaboração própria.

Ao mesmo tempo, com auxílio de técnicos foram carregados os furos com os equipamentos presentes da Figura 13. Temos respectivamente: Emulsão encartuchada de 2 polegadas de

diâmetro, caixas de emulsão encartuchada, retardos de 5 ms, furos de desmonte, emulsão encartuchada de 1 polegada, cordel detonante.

Figura 13 – Materiais usados no desmonte



Fonte: elaboração própria.

Por fim, foi feito o desmonte, o qual foi gravado para verificar se nenhum ultralançamento atingiria a usina de beneficiamento.

Figura 14 - Série de fotos do desmonte realizado



Fonte: elaboração própria.

Após o desmonte e verificação de que nenhum ultralançamento atingiu a usina, foram feitas as fotos finais do resultado, apresentadas na Figura 15:

Figura 15 - Fotos do desmonte realizado



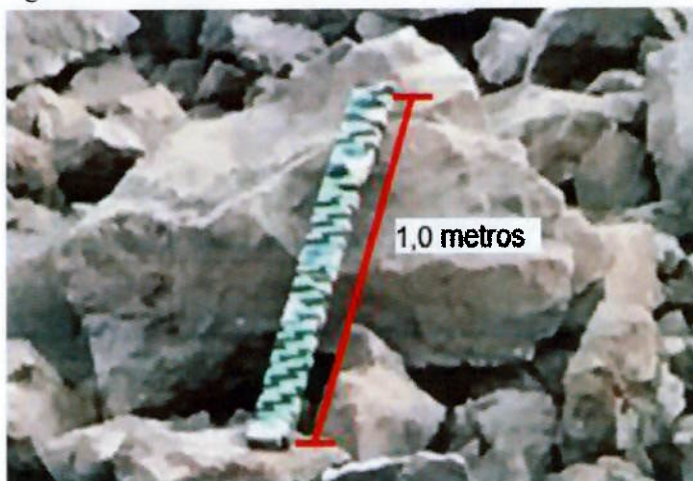
Fonte: elaboração própria.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Desmonte real

Logo após a conclusão do fogo procedeu-se para a zona de desmonte no intuito de verificar a eficiência do mesmo. Para isso, foi confeccionado caseiramente uma estaca de referência de um metro de comprimento, apresentada na Figura 16.

Figura 16 - Estaca de referência de 1 metro de comprimento

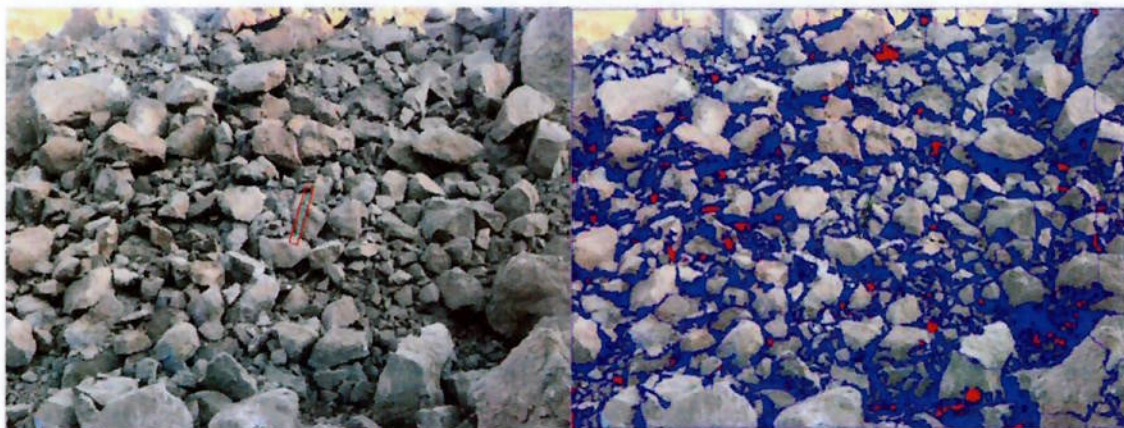


Fonte: elaboração própria.

Optou-se por utilizar uma estaca de cores distintas das rochas brancas de mármore para que ela ficasse visível em imagens e fosse a principal régua para comparação de tamanhos.

Como já explicado na revisão bibliográfica existem formas analíticas e visuais para estimar tamanho médio de partícula, porém uma das metodologias mais comuns é o emprego de softwares de visualização, como o Split Desktop, o qual foi utilizado conforme a Figura 17 (referenciado pela régua da Figura 16):

Figura 17 - Desmante avaliado pelo software Split Desktop

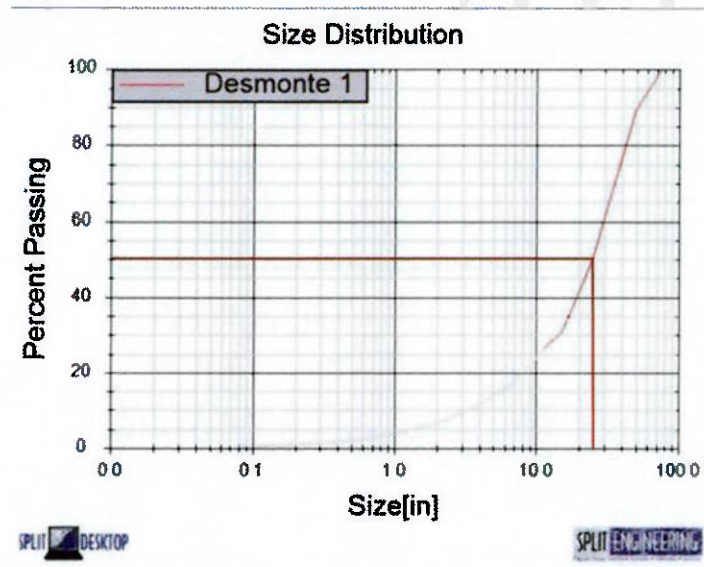


Fonte: elaboração própria.

Após o reconhecimento da imagem pelo software foram feitos ajustes como por exemplo a delimitação de finos, representados em vermelho do lado direito da foto e também a escala de referência na qual foi utilizada uma estaca de um metro de madeira, presente na Figura 16 e na Figura 17.

Outros ajustes foram feitos na imagem, no entanto vale ressaltar que a fim de garantir resultados ainda melhores o ideal seria utilizar uma referência esférica, como bola de basquete, e uma foto perpendicular ao desmante, que esteja isenta de erros de profundidade das rochas.

Por fim, o software apresenta o Gráfico 2 de distribuição de partículas:

Gráfico 2 - Distribuição de tamanhos do desmorte em polegadas pelo *software* Split Desktop

Fonte: elaboração própria.

Com o gráfico foi possível também montar a Tabela 8 e, com isso, definir o P50 real do desmorte:

Tabela 8 - Distribuição de partículas do desmorte

Passante	Tamanho (cm)
P20	20.3
P10	35.6
P40	48.3
P50	61.0
P60	76.2
P70	86.4
P80	106.7
P90	127.0

Fonte: elaboração própria.

Um segundo método de cálculo de P50 é pela literatura como proposto por Hustrulid (1999) que propõe a seguinte fórmula para o uso de explosivos:

$$P50 = A \left( \frac{Vo}{Qe} \right)^{0.8} Qe^{1/6} \left( \frac{S_{explosivo}}{115} \right)^{-19/30}$$

Podemos então calcular o valor de P50 utilizando os seguintes dados obtidos de campo para o desmorte em questão (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores de campo para fórmula de Hustrulid

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Qe (massa de explosivo)	18,8
Sexplosivo	100,0
A (fator de rocha)	13,0
Vo (volume por furo)	47,5

Fonte: elaboração própria.

Após isso, chegamos no valor de P50, dado por:

$$P50 = 48,6 \text{ cm}$$

Com isso podemos utilizar a comparação do valor literário com o real obtido pelo software para classificar uma variação, a qual seria o erro entre os métodos, definida na Tabela 10:

Tabela 10 - Variação de métodos

<b>Método</b>	<b>P50 (cm)</b>
Split Desktop	61.0
Jimeno	48.6
<b>Variação</b>	<b>25.4%</b>

Fonte: elaboração própria.

#### 4.2. Modelo otimizado

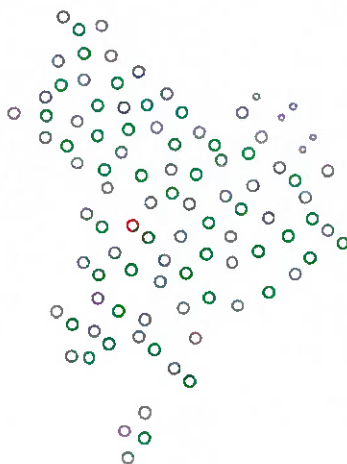
Para o modelo otimizado, primeiramente consultou-se a mineração sobre os equipamentos de cominuição utilizados.

Foi informado que normalmente utilizam-se britadores para um P50 aproximado de 40 cm, logo, afim de se utilizar os mesmos equipamentos para o calcário, utilizara-se esse dado como uma importante base comparativa.

Além disso, pelo estudo de Cardoso (2015, p. 92), uma versão otimizada de desmonte de calcário teria um P50 variando de 11 cm-42 cm, com valor médio de 23 cm.

Por fim, para alterar o modelo, utilizou-se a razão de carga definida por Jimeno (1995) de  $0,6 \text{ kg/m}^3$  e com isso sugeriu-se uma nova malha para o mesmo desmonte feito, representada na Figura 18:

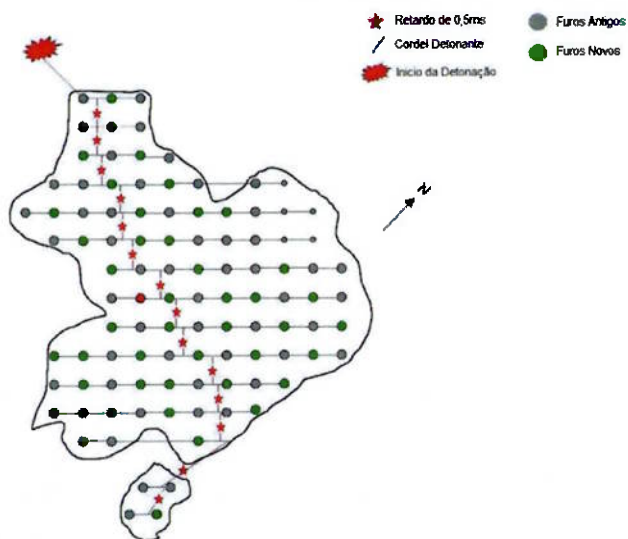
Figura 18 - Malha otimizada de desmonte



Fonte: elaboração própria.

Também foi desenvolvido um novo modelo de acionamento com o auxílio *do software SketchUp* (versão 2017), seguindo as características do antigo, elencado na Figura 19:

Figura 19 - Modelo de acionamento proposto para malha nova



Fonte: elaboração própria.

No modelo novo proposto haveria um incremento de 43 furos a malha atual, teríamos um novo espaçamento x distância de 1,5 m por 2,0 m mantendo a altura média de 9,5 m de comprimento. Com isso, as novas variáveis são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Razão de carga do modelo atual versus o proposto

<i>Parâmetros</i>	<i>Modelo Atual</i>	<i>Modelo Proposto</i>
<b>Carga total do desmonte (kg)</b>	975	1482
<b>Volume médio desmontado (m³)</b>	2470	2470
<b>Razão de Carga (kg/m³)</b>	0.39	0.60

Fonte: elaboração própria.

Utilizando a fórmula de Hustrulid (1999) novamente para cálculo do P50 ou X médio do novo modelo teríamos um valor de 32 cm, porém como foi comprovado no experimento real uma diferença de 25% entre a fórmula e o software iremos admitir tal variação, obtendo-se um X médio real de aproximadamente 40 cm, como elencado na Tabela 12.

Tabela 12 – P50 do modelo atual versus o proposto

<i>Parâmetros</i>	<i>Modelo Atual</i>	<i>Modelo Proposto</i>
<b>Qe (massa de explosivo kg)</b>	18.8	19.12
<b>Sanfo</b>	100	100
<b>A (fator de rocha)</b>	13	13
<b>Vo (volume por furo m³)</b>	47.5	28.5
<b>X médio calculado (cm)</b>	49	32
<b>X médio real (cm)</b>	60.8	39.9

Fonte: elaboração própria.

## 5. DISCUSSÃO

A diferença entre o valor calculado e o obtido pelo software embora seja expressiva pode ser explicada pelos fatores já elencados de preparo de imagem. Em um cenário futuro a utilização de um parâmetro esférico e um ângulo melhor posicionado poderiam garantir uma precisão maior do método. No entanto, o uso de razão de carga baixo, também já ponderado pelo motivo de precaução, comprova o fato do X médio real do experimento ser de 61 cm, um valor alto quando comparado à literatura.

Quando feito o estudo para uma razão de carga de acordo com a literatura o valor obtido pelo modelo proposto, mesmo após a aplicação da diferença de 25% atende as duas condições elencadas, ou seja, além de estar de acordo com o valor que a mineração está acostumada a trabalhar também está dentro da régua de estudos otimizados de desmonte de calcário. Além disso, a amarração mais próxima e o aumento de furos proposto na nova malha de detonação é justificada conforme a Figura 19.

## 6. CONCLUSÃO

Como conclusão, os resultados obtidos por fórmulas da literatura e ponderados pelas condições particulares da mina, mesmo em resultados extremos, indicam que a alteração proposta de malha atenderia aos padrões estimados ideais. Dessa forma, caracteriza-se uma melhora expressiva do plano de fogo.

Contudo, para comprovar tal tese, torna-se evidente a necessidade de replicar os desmontes para obter mais dados e refinar as análises, um experimento prático que não foi possível ser feito durante o estudo devido à falta de desmontes no local.

Além disso, para que se possa inferir se realmente o modelo proposto de otimização de malha, com base no aumento de razão de carga para valores típicos da literatura é otimizado, há a necessidade de se comparar os antigos resultados com outros novos e não somente a aproximação e modelagem feitas no estudo.

Dito isso, comprova-se, no entanto, que utilizar como teste o modelo proposto de 101 furos ao invés de 58 é importante para estudos futuros. Justifica-se tal tese pela avaliação do modelo atual com razão de carga de  $0,39 \text{ kg/m}^3$ , onde comprovadamente os resultados do P50 estão cerca de 45% acima dos parâmetros otimizados apontados pela literatura de base que supõe um valor máximo de 42 cm.

## REFERÊNCIAS

CARDOSO, J. **Estudo comparativo entre diversas técnicas de desmonte para otimização económica e ambiental**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2015.

CARVALHO, J.; MANUPPELLA, G.; MOURA, A. Calcários Ornamentais Portugueses. **Boletim de Minas**, Instituto Geológico e Mineiro, [S.l.], volume 37, páginas 223-232, 2000.

COULSON, M. **The history of mining: the events, technology and people involved in the industry that forged the modern world**. Petersfield, Hampshire, Great Britain: Harriman House, 2012.

HUSTRULID, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining: volume 1 - general design concepts**. Rotterdam: Balkema, 1999.

JIMENO, C.; JIMENO, E.; CARCEDO, F. **Drilling and Blasting of Rocks**. Geomining Technological Institute of Spain, 1995.

SCOTT, A. et al. **Open pit blast Design, Analysis and Optimisation: volume 1 - general design concepts**. [S.l.]: 1996.

SINGH, P. et al. Rock fragmentation control in opencast blasting. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, Dhanbad, India, volume 8, issue 2, pages 225-237, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.005>

IGM, **Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto**, Espanha, volume 2 página 140, 1999. <https://scribd.com/document/3333938236/Manual-de-Arranque-Carga-y-Transport-en-Mineria-a-cielo-abierto-pdf>.

CUNNINGHAM, J. **The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting** volume 1, páginas 439-453, 1983.