



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Trabalho de Fim de Curso de Engenharia de Minas apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciada em Engenharia de Minas

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE DESMONTE DE ROCHA COM
EXPLOSIVO, AFIM DE EVITAR MATAÇÕES.**

Autora: Séphora Graça Caluseviko

Estudante N°123062

Luanda, 2023



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Trabalho de Fim de Curso de Engenharia de Minas apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciada em Engenharia de Minas

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE DESMONTE DE ROCHA COM
EXPLOSIVO, AFIM DE EVITAR MATAÇÕES.**

Autora: Séphora Graça Caluseviko
Estudante N°123062

Orientador: Ph.D. António Pedro Alexandre

Coorientadora: Eng. Ema Glória Cachimbombo

Luanda, 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à querida Família Kaluseviko, cuja presença constante e apoio inabalável foram fundamentais em cada passo desta jornada acadêmica. Seu carinho, incentivo e compreensão tornaram possíveis todas as realizações e superações. À comunidade científica, cujo comprometimento com a busca do conhecimento e aprimoramento contínuo inspirou cada linha deste estudo. Que este trabalho contribua, mesmo que modestamente, para o avanço do saber e para a construção de um futuro mais esclarecido.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos. Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis. Ao meu orientador em especial, Professor Doutor António Alexandre, a Co-Orientadora Eng^o Ema Cachimbombo e aos Engenheiros Miguel M. R. Domingos e José A. J. Marcos pelo incansável contributo. Aos amigos, colegas de curso e todos que directa ou indirectamente contribuíram para a concretização deste trabalho. Este projeto não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de muitos indivíduos que generosamente compartilharam seu tempo, conhecimento e recursos. Á todos muito obrigado.

RESUMO

Este estudo visa abordar sobre uma proposta de dimensionamento de plano de fogo para o desmonte de rochas com explosivos no kimberlito Luele, com ênfase na otimização da fragmentação rochosa e na prevenção de matacões. A abordagem envolve uma análise geológica detalhada do maciço rochoso, determinação de um plano de fogo, a escolha criteriosa de explosivos, implementação de sequência de detonação. O objetivo deste trabalho é criar uma análise, através do qual se considere a densidade do explosivo, diâmetro e inclinação da perfuração, resistência à compressão da rocha e dimensões da bancada. Para o dimensionamento do plano de fogo é necessário realizar alguns cálculos matemáticos e levar em consideração diversas variáveis importantes que condicionam a operação de perfuração e desmonte, tais como: altura da bancada, afastamento, espaçamento, carga do furo, número de furos, factor de carga, entre outros. Desenvolver estratégias que possibilitem maximizar a eficiência operacional, assegurar a segurança dos trabalhadores e reduzir o impacto ambiental durante o processo de desmonte de rochas.

Palavras-chave: Maciço rochoso, Plano de Fogo, Explosivos, Detonação, Eficiência Operacional.

ABSTRACT

This study aims to address a proposal for sizing a fire plan for the dismantling of rocks with explosives in the Luele kimberlite, with an emphasis on optimizing rock fragmentation and preventing boulders. The approach involves a detailed geological analysis of the rock mass, determination of a fire plan, careful choice of explosives, implementation of a detonation sequence. The objective of this work is to create an analysis, through which the density of the explosive, diameter and inclination of the drilling, compressive strength of the rock and dimensions of the bench are considered. To design the fire plan, it is necessary to carry out some mathematical calculations and take into account several important variables that affect the drilling and blasting operation, such as: bench height, clearance, spacing, hole load, number of holes, cargo, among others. Develop strategies that make it possible to maximize operational efficiency, ensure worker safety and reduce environmental impact during the rock dismantling process.

Keywords: Rock massif, Blasting Plan, Explosives, Detonation, Operational Efficiency, .

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado das Propriedades Físico-Mecânicas do Gnaisse	19
Tabela 2 - Módulo de elasticidade de rochas	20
Tabela 3 - Critérios de seleção de explosivos	26
Tabela 4 - Comparação entre substâncias explosivas, mais comuns para escavação de maciços rochosos	27
Tabela 5 - Variáveis geométricas de um plano de fogo.	34
Tabela 6 - Tipos de equipamentos de perfuração	37
Tabela 7 - Razão de carga consoante o tipo de rocha	38
Tabela 8 - Razão linear de carga	42
Tabela 9 - Característica da SE HEF-100	53
Tabela 10 - Características do Riogel Kupula	54
Tabela 11 - Índice adiabático dos produtos da explosão	56
Tabela 12 - Parâmetros das ondas de detonação e choque refractadas no maciço rochoso com cargas compactas	59
Tabela 13 - Característica do explosivo	60
Tabela 14 - Variáveis do plano de fogo	60
Tabela 15 - Calculo do Afastamento ,Espaçamento e malha.	60
Tabela 16 - Calculo do Tampão ,Volume e subfuração	61
Tabela 17 - Calculo da Profundidade do furo, hf e hc	61
Tabela 18 - Parâmetros do plano de fogo	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Classificação dos explosivos	21
Figura 2 : Carregamento (Emulsão e Anfo)	28
Figura 3 : Cordel detonante	29
Figura 4 : Espoleta nº8	29
Figura 5 : Espoleta elétrica instantânea	30
Figura 6 : Retardos bidirecionais para cordéis	30
Figura 7 : Não elétricos de coluna (esquerda) e amarração (direita)	31
Figura 8 : Ligação sequencial para duas filas de furo	31
Figura 9 : Ligação com direcionamento lateral do lançamento da pilha	32
Figura 10 : Variáveis geométricas de um plano de fogo.	33
Figura 11 : (a) Malha quadrada (b) Malha retangular (c) Malha estagiada	36
Figura 12 : Kimberlito de Luele	43
Figura 13 : Participação societária do Kimberlito de Luele	44
Figura 14 : Mapa de Angola, Imagem satélite da Mina de Luele	47
Figura 15 : Imagem satélite da mina de Luele e mina de Catoca.	47
Figura 16 : Mapa de curvas de níveis de Luele	48
Figura 17 : Condições meteorológicas por mês de Saurimo	49
Figura 18 : Mapa de NDVI de Luele	49
Figura 19 : Mapa de NDWI de Luele	50
Figura 20: Deslocamento de material: gases em expansão e blocos acelerados ...	55
Figura 21 : Esquema de ligação	62

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURA

γ_v - Massa Volumétrica

Mf - Momento-flector de destruição,

R_c - Resistência a compressão

R_t - Resistência a tracção

R_{cis} - Resistência ao cisalhamento

P_d - Pressão de detonação

NDWI -índice de água normalizada

NDVI -índice de vegetação normalizada

PETN - Penta-eritritol

RBS -Relative Bulk Strenght (Energia relativa por volume)

RWS - Relative Weigth Strenght (Energia relativa por massa)

VOD - Velocidade de Detonação

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	III
AGRADECIMENTOS.....	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURA.....	IX
INTRODUÇÃO.....	11
Objecto de estudo.....	12
Problema.....	12
Hipóteses.....	12
Justificativa.....	12
Objectivo geral.....	13
Objectivos Específicos.....	13
Organização do Trabalho.....	13
CAPITULO 1: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
1.1 Matacões.....	14
1.2 Geologia e sua Influência na Fragmentação.....	15
1.3 Propriedades Físico-Mecânicas das Rochas.....	16
1.3.1 Propriedades Mássicas.....	16
1.3.2 Propriedades de Resistência.....	17
1.4 Explosivos.....	20
1.4.1 Tipos de Explosivos Utilizados em Mineração.....	21
1.4.2 Principais propriedades dos explosivos.....	22
1.4.3 Escolha do explosivo.....	25
1.4.3.1 Principais tipos de explosivo e critérios de seleção para escavação de maciços rochosos.....	26
1.4.4 Carregamento dos explosivos.....	27
1.4.5 Acessórios.....	28
1.4.6 Sequência de fogo.....	31
1.5 Plano de Fogo.....	32
1.5.1 Elaboração do Plano de Fogo.....	32

1.5.2 Principais parâmetros de um plano de fogo	33
1.5.2.1 Afastamento (A)	34
1.5.2.2 Espaçamento (E)	35
1.5.2.3 Malhas de perfuração	35
1.5.2.4 Diâmetro das perfurações (D)	36
1.5.2.5 Razão de carga	37
1.5.2.6 Tampão (T)	39
1.5.2.7 Subfuração	39
1.5.2.8 Profundidade dos furos	39
1.5.2.9 Volume detonado	40
1.5.2.10 Altura de carga de fundo (hf)	40
1.5.2.11 Altura de carga de coluna (hc)	41
1.5.2.12 Razão linear de carregamento (RLC)	41
CAPITULO-2 : METODOLOGIA	42
2.2 Caracterização Geológica e geotectónica do maciço rochoso.	42
2.3 Proposta de um plano de Fogo	42
2.4 Análise dos resultados	43
CAPITULO 3: ESTUDO DE CASO	43
3.1 Apresentação do Projecto	43
3.1.1 Geologia	44
3.1.2 Exploração mineira	45
3.1.3 Operação de desmonte	45
3.1.4 Operações de carregamento e transporte	45
3.1.5 Desenvolvimento da mina	46
3.2 Características Gerais da Região do Jazigo	
3.2.1 Localização Geográfica	46
3.2.2. O Relevo	47
3.2.3 Condições Climáticas e Solo	48
3.2.4 Hidrografia	49
3.3 Estrutura geológica do jazigo	50
3.3.1 Estrutura da chaminé kimberlítica de Luele	50
3.3.2 Sedimentos de cobertura e rochas encaixantes	51
3.3.3 Morfologia interna e teor de diamante no jazigo Luele	51
3.3.4 condições hidrológicas do jazigo	52

CAPÍTULO 4 - INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO ESTADO TENSIONAL DO MACIÇO AO EXPLODIR CARGAS COMPACTAS NO KIMBERLITO DE LUELE	53
4.1 Características das Substâncias Explosivas a Investigar	53
4.2 Acção da Explosão no Maciço Rochoso	54
4.3 Pressão Máxima na Frente das Ondas Refractadas na Parede do Furo	55
4.3.1 Parâmetros das ondas de choque para cargas compactas	55
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Proposta do Plano de fogo	59
5.1.1 Impedância.....	62
5.1.2 Modelo de um plano de fogo	61
5.1.2.1 Esquema de iniciação	62
5.2 Impactos ambientais devido a detonação	63
5.2.1 Onda aérea	63
5.2.2 Ultralançamento	64
5.2.3 Ruído e sobrepressão atmosférica	64
CAPITULO 6: CONCLUSÕES	66
RECOMENDAÇÕES	67
REFERÊNCIAS BIBIOGRAFICAS	68
ANEXOS	70

INTRODUÇÃO

A extração de minerais é uma actividade essencial para diversas indústrias em todo o mundo, desempenhando um papel crucial no fornecimento de matérias-primas para a construção civil, indústria metalúrgica, energia, entre outras. Um dos desafios mais significativos enfrentados pelas operações de mineração é o desmonte de rochas, um processo que envolve a utilização de explosivos para quebrar grandes massas de rocha em fragmentos menores.

No entanto, o desmonte de rochas não é uma tarefa trivial, pois envolve uma série de complexidades geológicas, geotécnicas e operacionais que podem afectar significativamente a eficiência e a segurança dessa etapa crucial.

Um dos problemas recorrentes em operações de desmonte de rochas é a ocorrência de "matacões" - fragmentos de rochas que não se desprendem adequadamente e que podem causar danos a equipamentos, atrasos na produção e, o que é ainda mais crítico, representar sérios riscos à segurança dos trabalhadores. Além disso, a qualidade da fragmentação rochosa afecta directamente a eficiência dos processos subsequentes, como britagem e moagem.

O presente estudo se concentra no " Dimensionamento do plano de fogo de afim de evitar matacões." O termo "plano de fogo" refere-se a um conjunto detalhado de procedimentos que envolve a seleção de explosivos, a configuração das cargas explosivas, a sequência de detonação e a gestão dos riscos associados ao desmonte de rochas em operações de mineração. Este plano desempenha um papel crítico na eficiência e na segurança das operações, pois uma fragmentação inadequada pode resultar em perdas significativas de material e, pior ainda, em situações perigosas, como a projecção de grandes blocos de rocha, conhecidos como "matacões," que podem representar ameaças à segurança dos trabalhadores e à integridade das instalações.

Neste contexto, este estudo busca explorar estratégias para a determinação de um plano de fogo que seja capaz de otimizar a fragmentação rochosa, reduzir os impactos ambientais e, acima de tudo, proporcionar um ambiente de trabalho seguro para os profissionais da mineração. Ao longo deste trabalho, serão abordados aspectos técnicos, geotécnicos, de segurança e ambientais, buscando uma abordagem integrada para enfrentar esse desafio complexo e crucial na indústria de mineração.

Objecto de estudo

Maciço rochoso da Mina do Luele.

Problema

Presença de matacões resultantes do processo de detonação na mineração, o que compromete a eficiência da fragmentação rochosa, aumenta os custos operacionais e pode causar danos ao equipamento.

Hipóteses

Se for implementado um plano de fogo cuidadosamente projectado e adaptado às características geológicas e Geotécnicas de uma área de mineração poderá resultar em uma fragmentação rochosa otimizada e uma redução significativa nos casos de matacões.

Justificativa

Eficiência Operacional: A fragmentação rochosa adequada é fundamental para o processo de mineração, afectando a eficiência da britagem, moagem e transporte de minérios. Um plano de fogo eficaz pode aumentar a eficiência operacional, reduzindo custos e aumentando a produtividade.

Sustentabilidade Ambiental: A fragmentação rochosa otimizada pode reduzir o consumo de energia e água em operações de processamento mineral, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a minimização do impacto ambiental.

Viabilidade Económica: A minimização de perdas de material devido a matacões e a melhoria na fragmentação rochosa podem aumentar a viabilidade económica das operações mineiras, tornando-as mais competitivas no mercado global.

Portanto, a pesquisa sobre a optimização da fragmentação rochosa e a prevenção de matacões é de importância significativa para a segurança, a eficiência e a sustentabilidade da indústria de mineração.

Objectivo geral

Desenvolver um plano de fogo eficaz e sustentável para operações de mineração a céu aberto, com foco na prevenção de matacões, promovendo a eficiência operacional, segurança e redução de impactos ambientais.

Objectivos Específicos

1. Realizar uma análise detalhada das características geológicas e Geotécnicas do local de mineração para compreender as propriedades das rochas a serem fragmentadas.
2. Selecionar os explosivos, acessórios e técnicas de detonação mais adequados para otimizar a fragmentação rochosa.
3. Apresentar uma proposta de metodologia de desmonte com explosivo.

Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em 6 capítulos, na qual estão redigidos da seguinte maneira:

Capítulo I – Fundamentação Teórica - onde serão apresentadas as bases teóricas para a realização desta investigação.

Capítulo II – Metodologias – Foram apresentados os métodos e técnicas necessários para elaboração deste trabalho.

Capítulo III – Estudo de Caso - relataram-se as características gerais da região do Kimberlito de Luele , nomeadamente a localização geográfica, relevo, hidrografia, etc. Bem como, faz-se a descrição sobre a geologia da região em estudo e do seu jazigo, tendo como foco as características geológicas do jazigo.

Capítulo IV – Investigação analítica do estado tensional do maciço ao explodir cargas compactas no kimberlito de Luele

Capítulo V- Resultados e discussões - Será apresentada a proposta de um plano de fogo, sequências e temporização de detonação.

Capítulo VI – Considerações finais: será apresentada a conclusão do trabalho bem como as recomendações para futuras investigações.

CAPITULO 1: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Matacões

Matacões em mineração, são grandes fragmentos de rocha que resultam de uma detonação inadequada ou de uma fragmentação não controlada durante a perfuração e detonação de rochas. Eles são basicamente blocos de rocha que não foram adequadamente quebrados em pedaços menores durante o processo de mineração.

Matacões podem resultar em atrasos significativos e custos adicionais em operações de mineração a céu aberto. A seleção adequada de explosivos e a otimização do plano de fogo são essenciais para evitar sua formação (Hustrulid, W.A., e Konya, C.J.)

A formação deles é indesejada na mineração porque pode criar problemas significativos, tais como:

Dificuldades de Transporte: Matacões são muito grandes e pesados, tornando o transporte e manuseio mais difícil e dispendioso. Eles podem obstruir o fluxo eficiente de minério ou material de construção.

Problemas de Processamento: Em muitas operações de mineração, o material precisa ser processado posteriormente para extrair os minerais desejados. Matacões podem ser difíceis de triturar ou moer, o que pode prejudicar o processo de beneficiamento.

Riscos de Segurança: Matacões grandes representam riscos de segurança significativos para os trabalhadores e equipamentos. Quedas acidentais de matacões podem causar ferimentos graves e danos às máquinas.

Perda de Recursos: A presença de matacões pode resultar na perda de minerais valiosos, uma vez que eles podem conter minerais que não foram adequadamente recuperados devido à fragmentação inadequada.

Os matacões podem ser provenientes de:

- Malhas de perfuração inadequada;
- Tampões com grandes profundidades ;

- Explosivos e razão de carga mal dimensionada;
- Goestrutura do maciço em escavação;
- Má distribuição dos retardos.

Para evitar a formação de matacões, é fundamental planejar cuidadosamente o processo de detonação, considerando factores como a geologia do local, a seleção de explosivos, a distribuição das cargas explosivas e o sequenciamento das detonações. O objetivo é obter uma fragmentação controlada que produza fragmentos de tamanho desejado para facilitar o transporte e o processamento subsequentes.

1.2 Geologia e sua Influência na Fragmentação

A determinação de um plano de fogo adequado em operações de mineração é uma etapa crítica para o sucesso das actividades. A geologia desempenha um papel fundamental nesse processo, pois a natureza das rochas presentes no local influencia directamente na fragmentação resultante da detonação.

A geologia exerce uma influência significativa na fragmentação rochosa durante operações de detonação. Portanto, uma compreensão aprofundada da geologia local é essencial para a determinação de um plano de fogo adequado que optimize a fragmentação e minimize a formação de matacões, garantindo assim a eficiência e a segurança das operações de mineração.

Elementos geológicos que podem afectar a fragmentação e que devem ser considerada na elaboração de um plano de fogo:

- **Dureza rocha:** A dureza de uma rocha é uma das características mais importantes a serem consideradas. Rochas mais duras, como granito e basalto, exigem mais energia para serem fragmentadas do que rochas mais brandas, como arenito. A escolha dos explosivos e a quantidade de energia aplicada no plano de fogo precisam ser ajustadas com base na dureza da rocha para obter a fragmentação desejada.

- **Faturamento:** A presença de fraturas naturais nas rochas pode afectar significativamente a fragmentação. Fraturas agem como zonas de fraqueza onde a rocha é mais propensa a se romper. A orientação, densidade e profundidade das fraturas são

importantes a serem consideradas ao projectar o plano de fogo para evitar a formação de blocos indesejados.

Estrutura Geológica:

- Falhas e Dobras: Falhas e dobras podem criar zonas de fraqueza na rocha, afectando a forma como ela se fragmenta. É importante mapear essas estruturas e considerá-las no planeamento do plano de fogo.

1.3 Propriedades Físico-Mecânicas das Rochas

A variação das propriedades físico-mecânicas de um maciço rochoso segundo Pedro Alexandre (2006) depende de uma série de factores, os quais estão condicionados por situações inerentes a sua formação; dentro destas podem mencionar-se: granulometria, composição mineralógica, textura, processo de formação do minério, idade do maciço, etc.

1.3.1 Propriedades Mássicas

- Massa Volumétrica (γ_v)

A massa volumétrica é a massa por unidade de volume. Para a sua determinação pode-se utilizar o método da pesada hidrostática. Matematicamente expressa-se pela seguinte equação:

$$\gamma_v = \frac{g}{V}; \quad [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Onde

γ_v : Massa Volumétrica

g: Massa da amostra, [g]

V: volume da amostra da rocha no seu estado natural, [cm³]

- Densidade (ρ)

As rochas de baixa densidade se deformam e rompem com facilidade, requerendo um factor de energia relativamente baixo. As de maior densidade precisam de uma maior

quantidade de energia para se obter uma fragmentação satisfatória. Para a sua determinação pode-se utilizar o método picnométrico. Matematicamente é expressa em:

$$\rho = \frac{g}{V_s}; \quad [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Onde:

V_s : volume da amostra da rocha no seu estado denso, $[\text{cm}^3]$

- Porosidade (P)

A porosidade permite avaliar a quantidade de espaços vazios existentes no meio contínuo formado pelos minerais constituintes da rocha, sendo estes vazios constituídos pelos poros e pelas fissuras da rocha. Esta é normalmente expressa em percentagem, considerando-se para as rochas 10% como um valor médio, 5% um valor baixo e 15% um valor alto.

A porosidade total determina-se pela relação entre a densidade e a massa volumétrica pela expressão seguinte:

$$P = \frac{\rho - \gamma_v}{\rho} * 100 \quad ; \quad [\%]$$

P: porosidade

1.3.2 Propriedades de Resistência

Os maciços rochosos são formados pela soma de matriz rochosa (rocha intacta) e descontinuidades. A sua resistência é afectada pela frequência e orientação do conjunto destas descontinuidades.

Segundo Ronildo Filho (2006), quando uma rocha perde a capacidade de resistir a uma certa sollicitação resultante de uma obra de engenharia ela pode perder totalmente a sua integridade e romper. Como existe uma diversidade de tipos de carga, não é possível definir-se um modo de ruptura único para o maciço rochoso. Os principais mecanismos de ruptura podem ser classificados como: ruptura por flexão, ruptura por cisalhamento,

ruptura por tracção, ruptura por compressão. Logo, antes da execução de obras de engenharia sobre as rochas deve-se determinar a sua habilidade para resistir a solicitações de cargas e assim evitarem-se as rupturas.

Em função do tipo de ruptura as rochas oferecem as resistências a flexão, ao cisalhamento, a tracção e resistência a compressão. Para o presente trabalho apenas destacam-se as três últimas:

- Resistência a compressão (R_c)

Para a sua obtenção utilizam-se amostras regulares. O método utilizado para a sua determinação é o ensaio de testemunhos num estado uniaxial. Para o cálculo deste índice utiliza-se a expressão:

$$R_c = \frac{P_{m\acute{a}x}}{F_o} ; [\text{Kg f} / \text{cm}^2]$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$: Carga máxima sobre a amostra no momento da sua destruição, [kgf]

F_o : Área da secção transversal da amostra, [cm²]

- Resistência a tracção (R_t)

Este índice determina-se com recurso ao método de flexão, (Blanco, 1998 e Pedro Alexandre, 2006). A amostra, de forma alargada com secção transversal (rectangular), coloca-se sobre dois apoios e sobre ela se exerce uma carga concentrada no seu ponto médio.

Para o cálculo deste índice utiliza-se a seguinte expressão:

$$R_t = \frac{6Mf}{a * b * h^2} ; [\text{Kg f} / \text{cm}^2]$$

Onde:

Mf : Momento-flector de destruição, [Kg f/cm²]

a: Coeficiente de flexão

b: Largura da amostra, [mm]

h: Altura da amostra, [mm]

- Resistência ao cisalhamento (R_{cis})

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento do maciço rochoso, normalmente leva-se em conta relação existente entre a força tangencial de ruptura e a superfície inicial do corte. Para as análises realizadas na SMC foi determinada pela expressão seguinte (Blanco 1998):

$$R_{cis} = \sqrt{\frac{R_c * R_t}{3}} ; \text{ [Kg f / cm}^2\text{]}$$

O material rochoso para o qual foram direccionados os estudos para determinação das propriedades físico-mecânicas em Luele é o Gnaisse, segundo o relatório sobre a pesquisa científica do kimberlito de Catoca " Estudos das propriedades físico-mecânicas das rochas 1999", as propriedades deste material são as apresentadas na tabela que se segue.

Tabela 1 - Resultado das Propriedades Físico-Mecânicas do Gnaisse

ρ (kg/m^3)	γ_v (kg/m^3)	P (%)	R_c (MPa)	R_t (MPa)	R_{cis} (MPa)	VI^m (m / s)
2800	2660	0,91	71,1	7,5	13,3	5380

Fonte: Ema B.G Cachimbombo (2022)

1.3.4 Módulo de Young

O módulo de Young é a razão entre a tensão e a deformação na direcção do esforço aplicado, sendo um importante indicador do comportamento mecânico da rocha, indicando

quão plástica e elástica é determinada litologia. O módulo de Young junto com o limite de ruptura da rocha indica a resiliência do material e permitem uma estimativa do grau de dificuldade em desmontá-lo. Rochas plásticas de forma geral demandam uma maior quantidade de energia para que haja desagregação do material.

Tabela 2 -Módulo de elasticidade de rochas

Material	Módulo de elasticidade em Gpa
Gabro	130
Basalto e Diabásico	65
Quartzito	55
Granito e Gnaisse	35
Arenito	12

Fonte: Google

A presença de módulo de Young e resistência a compressão uniaxial, fornece características que podem melhor entender o comportamento de quebra da rocha.

1.4 Explosivos

Explosivos são substâncias puras ou misturas, em qualquer estado, que quando submetidas a um estímulo externo suficientemente energético como calor, atrito ou impacto se transformam total ou parcialmente em gases em um curtíssimo intervalo de tempo, liberando uma grande quantidade de energia, gerando altas pressões e temperaturas. (CROSBY, 1998).

1.4.1 Tipos de Explosivos Utilizados em Mineração



Figura 1: Classificação dos explosivos

Fonte: Valdir Silva,2019

Existem 3 tipos de explosivos que são os mecânicos ,químicos e nucleares ,mas para a área de mineração o que nos interessa são os químicos e eles dividem-se em :

Altos explosivos: São caracterizados pela elevadíssima velocidade de reacção e alta pressão

EX.: Dinamites, Gelatinas

Primários: Serão considerados primários quando a sua iniciação se der por chama ,centelha ou impacto .

São materiais utilizados nos processos de iniciação dos explosivos propriamente ditos: Espoletas, Cordel Detonante, Boosters, etc., os mais usados industrialmente são: Azida de Chumbo, Estifinato de Chumbo, Fulminato de Mercúrio, Nitropenta, etc. Não tem força para detonar a rocha, apenas iniciar a explosão. Muito sensíveis.

Secundário: Serão considerados quando para a sua iniciação for necessario um estímulo inicial de elevada grandeza.os explosivos propriamente ditos ou explosivos de ruptura. São

tão potentes quanto os explosivos primários, porém por serem mais estáveis necessitam de uma maior quantidade de energia para iniciar o processo de detonação, energia esta geralmente fornecida pela ação direta da detonação de um explosivo primário. E o caso das Dinamites, Gelatinas, ANFOS, Lamas, Etc. ..

Baixos explosivos (Deflagrantes ou lentos): Foram os primeiros a serem desenvolvidos possuindo a velocidade de propagação inferior à velocidade do som da rocha, e como tal não originando a onda de choque .

A Decomposição destes explosivos acontece sob forma de queima progressivamente acelerada com aumento de temperatura e pressão, em que as partículas queimam na sua superfície expondo cada vez mais superfície livre para ser queimada e tem como única componente de trabalho libertação de gases.

Esta explosão chama-se deflagração e a reacção acontece com velocidade inferior à velocidade do som entre 100 a 2000m/s. Aqui estão incluídas as pólvoras

Explosivos de segurança ou permissíveis: São explosivos especialmente preparados para ambientes fechados e inflamáveis em que a sua principal característica é a baixa temperatura de explosão.

Têm na composição um inibidor de temperatura geralmente o cloreto de sódio

Têm baixa potencia , velocidade de detonação entre 2000 a 4500m/s e fraca resistência à água.

Agente detonantes: São misturas cujo ingredientes não são classificados como explosivos. De acordo com Ricardo e Catalani (2007), os explosivos utilizados em operações de minerações são divididos em: Pólvoras negras, Dinamites, ANFO, Granulados, Lamas explosivas, Emulsão encartuchada, Emulsão Bombeável, entre outras.

1.4.2 Principais propriedades dos explosivos.

O desempenho de um explosivo depende de suas características intrínsecas, bem como às condições sob a qual são submetidos, uma vez que existem diferentes tipos explosivos disponíveis, apresentando diferenças em relação às suas propriedades, como: densidade, velocidade de detonação, pressão produzida, sensibilidade, etc. Isso torna importante o

conhecimento dessas propriedades a fim de garantir a melhor aplicabilidade para condições exigidas (Bhandari,1997).

Algumas das propriedades dos explosivos importantes no desmonte de rochas são:

- Densidade
- Energia
- Balanço de oxigénio
- Velocidade e pressão de detonação
- Sencibilidade
- Resistência à água

Densidade

É definida como o peso específico do explosivo a relação entre a massa e o volume dessa massa, medida em g/cm^3 . A densidade dos explosivos comerciais varia de 0,60 a 1,45 g/cm^3 e é determinada por sua composição, tamanho de grão e a densidade dos componentes (Clark, 1980).

Energia liberada pelo explosivo

A aplicação do explosivo na actividade de desmonte tem como objetivo utilizar a energia desprendida na detonação para a cominuição e movimentação do material a ser desmontado de acordo com as necessidades das etapas subsequentes da cadeia de produção. O desprendimento de energia causa pulverização da rocha nas regiões próximas ao furo carregado, criação de novas fracturas, propagação de fracturas existentes, movimentação do material, vibração do solo, ruído e calor. “No processo de detonação nem toda energia dos explosivos é disponibilizada para a realização de trabalho útil.” (HUSTRULID, 1999 *apud* MORAIS, 2004, p. 31).

A fração da energia que será destinada a realização de trabalho útil depende da natureza do explosivo a ser utilizado, das propriedades do maciço rochoso em questão e da elaboração do plano de fogo.

Balanço de oxigénio:

A reação é dita propriamente balanceada em termos de quantidade de oxigénio disponível quando há presença o suficiente desse elemento para oxidar completamente todo o

combustível da mistura. A reação de detonação idealmente balanceada produziria dióxido de carbono (CO₂), vapor de água (H₂O) e gás nitrogénio (N₂). O excesso de oxigénio possibilita a formação de óxidos de nitrogénio (NO e NO₂), enquanto a falta de oxigénio proporciona a formação de monóxido de carbono (CO), além da alta toxicidade, os gases formados na reação desbalanceada reduzem a eficiência do explosivo pois diminuem a quantidade de energia liberada pela reação.

Velocidade de detonação:

A velocidade de detonação (VOD) é a velocidade na qual a reação se propaga através do explosivo. A velocidade de detonação depende de (CROSBY, 1998):

- composição química do explosivo
- diâmetro da carga explosiva
- confinamento e diâmetro das partículas do explosivo
- grau de homogeneização da mistura
- densidade do explosivo
- humidade do explosivo.
- temperatura do explosivo.
- tipo e gramatura (massa) da iniciação.

A VOD controla a taxa em que a reação do explosivo acontece, conseqüentemente, a partição da energia de choque em relação às parcelas que compõem a energia total. Um explosivo com uma VOD considerada baixa libera sua energia total a uma taxa mais lenta e uma proporção maior da energia total, de forma geral tende a realizar pressão através dos gases.

Já um explosivo de alta velocidade tende a gerar alta energia de choque ou brisância. Assume-se que quanto mais alta for VOD, maior será a capacidade do explosivo de fraturar a rocha (CAMERON E HAGAN, 1996 *apud* MORAIS, 2004).

A VOD é considerada um dos mais importantes indicadores de performance de um explosivo. A importância se deve ao facto que a pressão de detonação é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de detonação.

Pressão de detonação:

A pressão de detonação é a pressão criada pela onda de detonação durante a viagem ao longo da própria carga explosiva. É o principal elemento responsável pela geração de uma onda de choque no maciço que abriga a carga de explosivos. A magnitude desta onda reflete a intensidade da energia de choque do explosivo e o seu efeito é um dos causadores da fractura do maciço detonado. (CAMERON E HAGAN, 1996 *apud* MORAIS 2004).

A pressão de detonação é uma função da densidade do explosivo e da velocidade de detonação. A fórmula usualmente aceite para o cálculo da pressão de detonação (P_d), em MPa, (BJARNHOLT, 1980):

$$P_d = 0,25 \times \rho \times (VOD)^2$$

Onde ρ é o peso específico do explosivo (kg/m^3) e VOD é a velocidade de detonação do explosivo (km/s)

Sensibilidade: é a capacidade de propagação da onda criada pelo explosivo de um cartucho a outro, ou de toda a coluna explosiva existente no furo. Ela pode ser afetada directamente pela ausência de contacto entre os cartuchos ou por lacunas criadas em furos mal carregados;

Resistência à água: no momento em que se detona determinada rocha é essencial saber se existe concentração de água nos furos, afinal alguns tipos de explosivos não são resistentes à água ficando neutralizados e sem detonar. A resistência à água é medida através da quantidade de horas em que o explosivo ficou submerso à água, e ainda é suficientemente capaz de ser iniciado com eficácia e detonar completamente por meio de uma espoleta;

1.4.3 Escolha do explosivo

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), para que seja possível optar pelo tipo de explosivo mais adequado é fundamental considerar alguns fatores como, por exemplo, I) a dureza da rocha, se ela é dura, média ou branda; II) o tipo de rocha, se ela é

ígnea, metamórfica ou sedimentar; III) a natureza da rocha, se é homogênea ou fraturada; IV) se existe a presença de água; V) se a região a que se destina, se é carga de fundo ou carga de coluna; VI) Diâmetro dos furos; VII) Custo.

Tabela 3 - Critérios de seleção de explosivos

Fatores económicos	<ul style="list-style-type: none"> - Custo do explosivo - Custo da perfuração - Outros custos
Características da rocha e do maciço rochoso	<ul style="list-style-type: none"> - Propriedades geomecânicas da rocha - Grau de fraturação do maciço
Tipo de explosivo	<ul style="list-style-type: none"> - Impedância característica - Pressão de detonação - Energia disponível - Volume de gases - Sensibilidade e condições de armazenamento
Condições existentes	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões da carga - Tipo e ponto de iniciação - Atacamento e desacoplamento - Presença de água
Resultados pretendidos	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de rocha a desmontar - Grau de fragmentação a obter
Restrições ambientais	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrações do terreno - Onda aérea (ruído) - Libertação de poeiras - Projeção de fragmentos - Sobrefraturação do maciço remanescente

Fonte: Bernardo, 2004

1.4.3.1 Principais tipos de explosivo e critérios de seleção para escavação de maciços rochosos.

A aplicação de explosivos na escavação de maciços rochosos surgiu no século XVII, através da aplicação de pólvora, mantendo a sua composição praticamente inalterada até à actualidade (Bernardo, 2014). A descoberta da nitroglicerina, por Ascanio Sobrero em 1847, permitiu avanços na área dos explosivos industriais.

Em 1867, Alfred Nobel patenteou a dinamite, levando a um crescimento na aplicação de explosivo no desmonte de rocha.

Na tabela abaixo, encontram-se as principais propriedades das substâncias explosivas de uso industrial mais comuns.

Tabela 4. - Comparação entre substâncias explosivas, mais comuns para escavação de maciços rochosos

Substancias explosivas		Pólvoras	Gelationoso	Granulado	Emulsões
Composição base		Nitrato de potássio, Enxofre e Carbono	Nitroglicol ou Nitroglicerina	Nitrato de amonio e Gasoleo (ANFO)	Soluções aquosa de nit.de amonio, óleos e emulsionantes
Resistência à água		Má	Excelente	Má	Boa
Densidade		Variável	1,4/1,5	0,75/0,85	0,9/1,25
Apresentação	Granel	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Encartuchado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Observações		Rocha ornamental	Mais caro	Mais barato	Mais recente

Fonte: Bernardo, 2014

1.4.4 Carregamento dos explosivos

O carregamento é definido por Ricardo e Catalani (2007) como a introdução dos explosivos nos furos e deve ser realizado com muito cuidado, afinal os riscos gerados dependem directamente do carregamento e da eficácia do fogo.

Segundo Ricardo e Catalani (2007), após a introdução do explosivo no furo, ocorre o adensamento através de choque. Executam-se cortes longitudinais de 10 a 12 cm de cada lado do cartucho para ocupar o máximo volume no furo, o que não ocorre quando os cartuchos já vêm perfurados ou embalados em papel fino.

É importante obter um elevado adensamento na carga de fundo, pois é onde se concentra a maior quantidade de explosivo. O cartucho com a espoleta ou o cartucho com o ponto do cordel detonante, conhecidos como escorva, nunca devem ser forçados e não devem ser introduzidos em primeiro lugar, tendo, pelo menos, existir um cartucho como amortecedor.



Figura 2: Carregamento (Emulsão e Anfo)

Fonte : Canal do youtube “Desmonte de Rocha com Explosivos”

1.4.5 Acessórios

Os acessórios são tão importantes quanto o explosivo em si. Eles são os responsáveis pela iniciação do fogo e pela sequência de detonação, que garantirá a eficiência do plano de fogo.

Nas ligações entre os furos são utilizados os chamados cordéis detonantes. É a forma mais segura em desmontes a céu aberto porque não requer eletricidade. Por ser explosivo, dispensa espoletas e quando detona, age como escorva para as cargas explosivas, detonando-as também. O cordel detonante consiste em um núcleo de alto explosivo, o tetranitrito de penta-eritritol (PETN), que detona com velocidade de cerca de 7000 m/s (RICARDO e CATALANI, 1990). Pode possuir um múltiplo revestimento de fibras têxteis de PVC ou uma camada de náilon, conforme o uso a que se destina. Tem aspecto externo de cabo elétrico e é vendido em rolos. As conexões podem ser feitas com fita isolante ou com nó padronizado. A iniciação do cordel detonante pode ser feita através de espoletas elétricas ou simples.



Figura 3: Cordel detonante

Fonte: dinadrill.com.br

As espoletas simples consistem em uma cápsula de alumínio, fechada em uma extremidade, preenchida com um explosivo de base (PETN) e carga iniciadora de azida de chumbo. São sempre iniciadas por estopim comum, introduzido na outra extremidade da cápsula por meio de um alicate especial (RICARDO e CATALANI, 1990). São muito utilizadas em detonações onde há a necessidade ou é possível haver uma sequência de fogo, não sendo recomendadas em detonações simultâneas pois dificilmente os estopins atingiriam todas as espoletas ao mesmo tempo.



Figura 4: Espoleta nº8

Fonte: enaex.com

As espoletas elétricas são detonadas pela passagem de uma corrente elétrica com intensidade mínima para provocar a explosão. Permite detonar várias cargas ao mesmo tempo, podendo ser instantâneas ou detonar após um certo período de tempo após a passagem da corrente elétrica (RICARDO e CATALANI, 1990).

Os acendedores são acessórios responsáveis por iniciar as espoletas ou o próprio explosivo principal. Dentre eles podemos citar: estopim de segurança, estopim ultra-rápido, conectores para estopim, cordão ignitor e reforçadores (RICARDO e CATALANI, 1990).



Figura 5: Espoleta elétrica instantânea

Fonte: Catálogo da Órica

Retardos

Retardos, são elementos para a temporização do desmonte, para que haja tempo de criação de faces livres durante a processo de detonação, garantindo o devido sequenciamento e a carga máxima por espera de explosivos. O que também tem influência na melhora da fragmentação e controles de vibração e ruído. Os dois tipos de retardos mais comuns são: os retardos bidirecionais para cordéis (osso de cachorro, Figura 6 e os não elétricos de amarração Figura 7, esses com tubos de choque para condição do estímulo que aciona a espoleta, não gerando ruídos além da detonação da espoleta.



Figura 6: Retardos bidirecionais para cordéis

Fonte: dinadrill.com.br



Figura 7: Não elétricos de coluna (esquerda) e amarração (direita)

Fonte: Site Britanite,

1.4.6 Sequência de fogo

Ter uma sequência de fogo é muito importante quando se quer limitar as vibrações causadas pelas explosões, ou ainda, quando se deseja taludes escavados com superfícies bem definidas. Haverá, assim, uma determinada sequência de fogo, que nada mais é que uma ordem cronológica na sucessão de detonações, separadas por intervalo de tempo em milissegundos.

Esses intervalos de tempo entre detonações é resultado do uso de dispositivos chamados de retardos. Atualmente, existe no mercado dispositivos com diferentes tempos de retardo e são diferenciados pela cor, que varia de acordo com o fabricante, chegando a uma gama de dispositivos com intervalos de tempo de 10 à 125 ms.

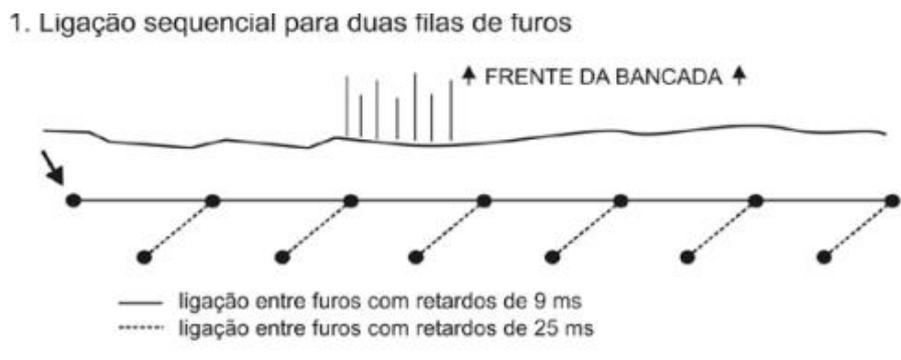


Figura 8: Ligação sequencial para duas filas de furo

Fonte: José Lúcio Pinheiro Geraldi

2. Ligação com direcionamento lateral do lançamento da pilha

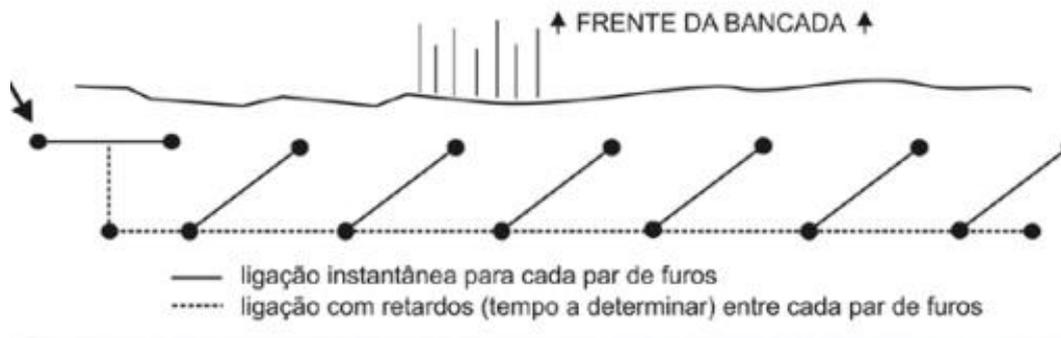


Figura 9: Ligação com direcionamento lateral do lançamento da pilha

Fonte: José Lúcio Pinheiro Geraldi

1.5 Plano de Fogo

Denomina-se Plano de Fogo, o projecto executivo para o desmonte de rocha com uso sistemático de explosivos, onde serão definidos e apresentados preliminarmente (GERALDI, 2006):

- O plano de perfuração;
- A qualificação e quantificação de explosivos;
- Os esquemas de ligação e iniciação entre os furos que serão detonados.

1.5.1 Elaboração do Plano de Fogo

A elaboração do plano de fogo visa atender os requisitos de fragmentação e formação da pilha, respeitando os limites ambientais e de segurança, evitando fogos falhados e ultra lançamentos bem como controlando as vibrações e pressões acústicas resultantes do processo de detonação.

Durante a elaboração do plano de fogo, o projectista deve levar em consideração todas as variáveis existentes do processo, sendo algumas delas controláveis e outras não controláveis.

Exemplos de variáveis não controláveis são propriedades físicas das rochas, foliações, mergulho, direção, fraturas, nível de saturação do maciço e condições meteorológicas.

Variáveis controláveis são o tipo de explosivo a ser utilizado, a razão de carga, número de faces livres, parâmetros geométricos da malha, sequenciamento, direcionamento e dimensão da detonação.

Ciente de seus objetivos, limites e variáveis não controláveis o projectista deve trabalhar utilizando o que está sobre seu controle de forma a atingir o resultado ótimo para seu processo.

De nada adiantará um plano de fogo com baixo consumo de explosivos por metro cúbico e também necessidades mínimas de furação, uma vez que resulte em blocos com dimensões que não caibam no equipamento de carregamento, ou ainda que não possam penetrar na boca do britador primário (RICARDO e CATALANI, 2007).

1.5.2 Principais parâmetros de um plano de fogo

Os principais parâmetros que necessitam constar em um plano de fogo são demonstrados na Figura abaixo, sendo relacionados a seguir e com esses dados se procede as perfurações do maciço rochoso, ao carregamento de “fogo” e à sua detonação. (IRAMINA, 2015)

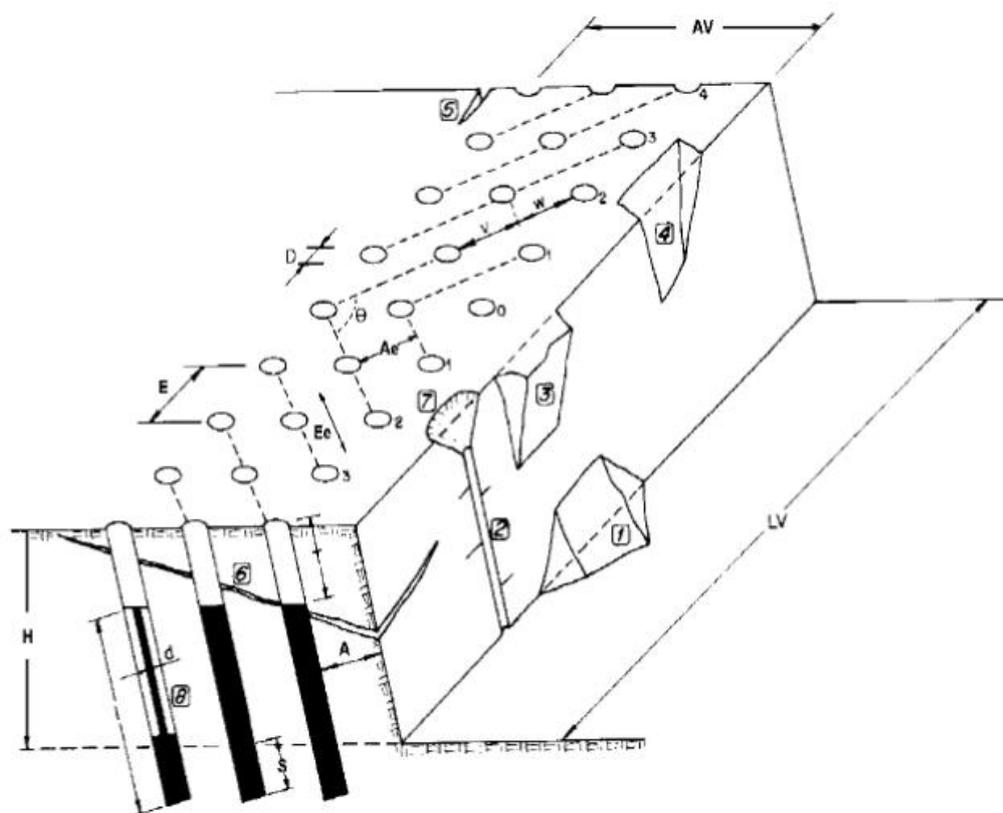


Figura 10 : Variáveis geométricas de um plano de fogo.

Fonte: SILVA, (2007).

Tabela 5. Variáveis geométricas de um plano de fogo.

H = altura do banco	D = diâmetro do furo	L = longitude do furo
d = diâmetro da carga	A= afastamento nominal	E=espaçamento nominal
LV=longitude do desmonte	AV=comprimento da bancada	Ae= afastamento efectivo;
Ee=espaçamento efectivo	T = tampão	S = subperfuração
I = longitude da carga	= ângulo de saída	tr = tempo de retardo
1 = repé	2 = meia cana do furo	3 = rocha saliente
4 = sobreescavação	5 = fenda de tracção	6=trincamento do maciço
7 = cratera	8 = carga desacoplada	

Fonte: Silva, (2007)

1.5.2.1 Afastamento (A)

É a menor distância que vai do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra. De todas as dimensões do plano de fogo essa é a mais crítica. Quando muito pequeno 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. Quando o afastamento é muito grande a sobreescavação (backbreak) na parede é muito severa. Se é excessivo há grande emissão de gases dos furos contribuindo para ultralançamentos de fragmentos rochosos a distâncias consideráveis, crateras verticais, alto nível de onda aérea e vibração do terreno; a fragmentação pode ser extremamente grosseira e problemas no pé da bancada podem ocorrer (SILVA, 2007).

Outras variáveis do plano de fogo são mais flexíveis e não produzirão efeitos drásticos nos resultados tal como os produzidos pelo erro na estimativa da dimensão do afastamento. O valor do afastamento é função do diâmetro dos furos, das características das rochas e dos tipos de explosivos utilizados. Os valores do afastamento oscilam entre 33 e 39 vezes o diâmetro do furo, dependendo da resistência da rocha e da altura da carga de fundo (SILVA, 2007). Uma fórmula empírica e bastante útil para o cálculo do afastamento (SILVA, 2007).

$$A = 0,0123 \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times D_e$$

Onde:

ρ_e = densidade do explosivo (g/cm³);

ρ_r = densidade da rocha (g/cm³);

D_e = diâmetro do explosivo (mm).

1.5.2.2 Espaçamento (E)

Espaçamento é a distância entre dois furos de mesma linha. No caso de bancada baixa ($H_b/A < 4$), dois casos devem ser observados:

1º Caso: Os furos de uma linha são iniciados instantaneamente:

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

2º Caso: Os furos são detonados com retardos:

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

No caso de bancada alta ($H_b/A > 4$), dois casos devem ser observados:

1º Caso: Os furos são iniciados instantaneamente:

$$E = 2 \times A$$

2º Caso: Os furos são detonados com retardos:

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

O espaçamento nunca deve ser menor que o afastamento, caso contrário, o número de matações será excessivo (SILVA, 2007).

Se aumentar **E** e diminuir **A**, a rocha ficará mais fragmentada, logo com blocos de menor dimensão.

Se diminuir **E** e aumentar **A**, a rocha ficará menor fragmentada, logo com blocos de maior dimensão.

1.5.2.3 Malhas de perfuração

Defini-se como malha de perfuração a área resultante do produto das distâncias (em metros) adotadas para a locação dos furos em uma frente de escavação de rocha (GERALDI, 2011).

A geometria das malhas pode ser quadrada, retangular, estagiada, triângulo equilátero, ou malha alongada.

- A quadrada ou retangular, é de fácil perfuração com menor tempo de locomoção de furo a furo)(SILVA, 2009)
- . A estagiada, dificulta a perfuração (maior tempo de locomoção furo a furo), porém possui melhor distribuição do explosivo no maciço rochoso. (SILVA, 2009)
- A malha triângulo equilátero é estagiada com relação $E/A = 1,15$; são indicadas para rochas compactas e duras; possuem ótima distribuição da energia do explosivo na área de influência do furo, maximizando a fragmentação; o centro do triângulo equilátero, o ponto mais crítico para fragmentação, recebe igual influência dos três furos circundantes.(SILVA, 2009)

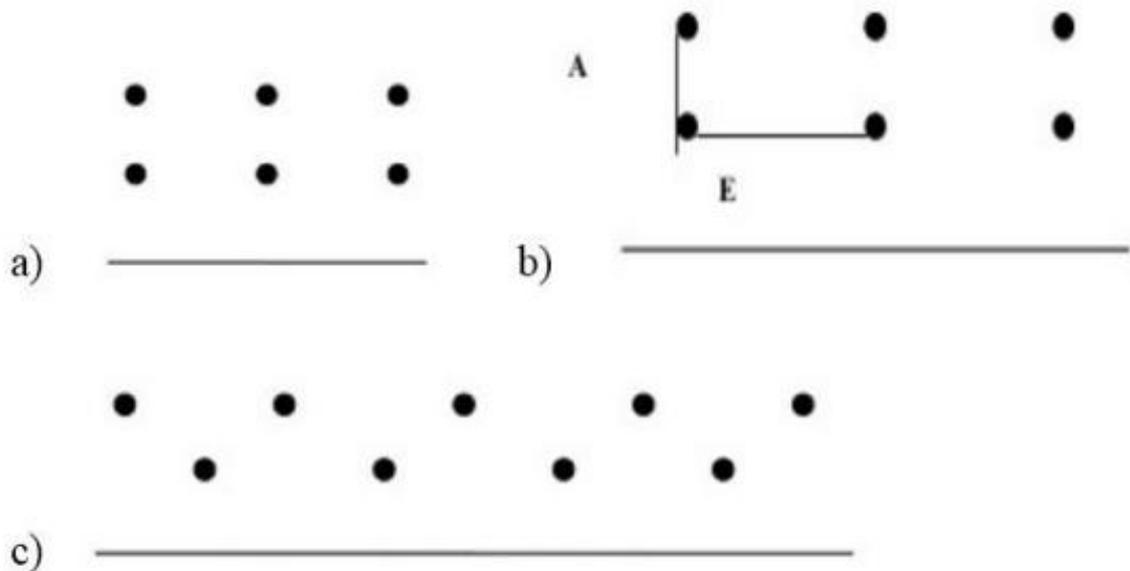


Figura 11 : (a) Malha quadrada (b) Malha retangular (c) Malha estagiada

fonte: Adaptado de Silva, 2014

1.5.2.4 Diâmetro das perfurações (D)

É determinado em função do equipamento previsto para executar as perfurações. Esse equipamento, e o diâmetro do furo, devem estar coerentes com a altura da bancada e com os demais equipamentos de carregamento e beneficiamento da rocha detonada. Quanto maior o diâmetro do furo, maior é o consumo de material explosivo para preenchimento dos furos e menores são os fragmentos de rocha resultantes da detonação

Tabela 6 - Tipos de equipamentos de perfuração

Tipo de equipamento	Profundidade / Altura bancada	Diâmetro de perfuração
Perfuratriz manual	até 4 m	1 ¼"
Wagon-drill	3 - 9 m	1 ½" - 2 ½"
Perfuratriz sobre trator, coroa normal	9 - 18 m	2" - 5"
Perfuratriz sobre trator, furo-baixo	18 - 30 m	3 ½" - 7"

Segundo Ricardo e Catalani (1990), o valor máximo do diâmetro da perfuração em polegadas é igual a capacidade da caçamba do equipamento de carga em jardas cúbicas. Pois, como outras grandezas componentes do plano de fogo estão direta ou indiretamente relacionadas com o diâmetro da perfuração, as dimensões dos blocos resultantes da detonação também estão.

Na **Tabela 6** estão contidos alguns exemplos de equipamentos de perfuração, associados aos seus possíveis diâmetros de perfuração e altura da bancada.

1.5.2.5 Razão de carga

A razão de carga é a massa de explosivo usada para desmontar um metro cúbico ou uma tonelada de rocha. É normalmente expressa em g/m³ ou g/t. A razão de carga pode ser calculada a partir das expressões:

$$RC = \frac{100 \times Q_e}{B \times S \times H} \text{ em g/m}^3$$

$$RC = \frac{100 \times Q_e}{B \times S \times H \times d} \text{ em g/t}$$

Onde:

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)

d é a densidade da rocha (g/cm³).

Existem parâmetros práticos que correlacionam a razão de carga ao tipo de rocha detonada conforme tabela abaixo descrita:

Tabela 7: Razão de carga consoante o tipo de rocha

Tipo de rochas	Consumo de explosivo(g/m ³ “in situ”)
Granito, Gnaisse, basalto(rochas eruptivas)	350 - 550
Arenito	300 - 400
Carvão	100 - 150
Calcário	250 - 350

Se dividirmos o peso de explosivo de cada furo pela quantidade de rocha detonada por furo, teremos, a razão de carregamento, que pode ser dada em g/m³ ou g/ton. .

O ajuste da razão de carregamento é realizado à medida que os resultados da detonação são analisados pelos responsáveis pela elaboração e aplicação do Plano de Fogo, mas estas modificações poderão seguir critérios práticos, já conhecidos para os valores de razão de carregamento, como por exemplo:

-Razão de carregamento para rochas competentes , tipo granito é de 350 a 450 g/m³.

-Razão de carregamento para rochas decompostas tipo arenito é de 300 a 350 g/m³.

-Razão de carregamento para rochas tipo calcário é de 150 a 200 g/ton.

1.5.2.6 Tampão (T)

É a parte superior do furo que não é carregada com explosivos, mas sim com material inerte bem adensado a fim de confinar os gases do explosivo. O óptimo tamanho do material do tampão (OT) apresenta diâmetro médio (D) de 0,05 vezes o diâmetro do furo.

$$OT = D / 20$$

O material do tampão deve ser angular para funcionar apropriadamente. Detritos de perfuração devem ser evitados. O confinamento é necessário para que a carga do explosivo funcione adequadamente e emita a máxima de energia, bem como para controle da sobrepressão atmosférica e ultralançamento de fragmentos rochosos:

$$T = 0,7 A$$

1.5.2.7 Subfuração

É o comprimento perfurado abaixo da praça da bancada ou do greide a ser obtido.

A necessidade do uso da subfuração ocorre em virtude do maior engastamento da rocha ser observado na sua base, a qual não será arrancada plenamente, surgindo uma protuberância conhecida como repé.

O repé onera os custos de desmonte exigindo perfurações secundárias de acabamento, prejudicando as próximas detonações primárias, além do aspecto segurança para os homens e equipamentos.

Com a execução de subfuração, também melhoramos a capacidade de empilhamento do material e conseqüentemente o rendimento de carregamento e transporte. Intervalo de valores para a subfuração:

$$S = (\text{Zero a } 0,6. A)$$

Onde: A = Afastamento.

Usualmente utilizamos para valor inicial da subfuração o seguinte:

$$S = 0,3. A$$

Na prática, dependendo do tipo geo-estrutural da rocha, este valor é suficiente para evitar o repé, mas em outros casos somente a realização de furos de levante, que são furos horizontais, realizados junto ao pé da bancada, resolvem o problema de repés.

1.5.2.8 Profundidade dos furos :

É definida como o comprimento total perfurado, ou seja :

Sabendo-se a altura da bancada (H), a inclinação dos furos (a) e a sub-furação (S), fica determinada a profundidade de furação:

$$PF = H / \cos a + S$$

A inclinação dos furos proporciona vantagens tipo:

- Reduz o “over break” (quebra para trás);
- Melhor arranque no pé da bancada;
- Melhor forma e posicionamento da pilha;
- Maior estabilidade dos taludes das bancadas;
- Melhor distribuição de energia ao longo da face livre;
- Melhor fragmentação ao longo da face livre;
- Reduz a ocorrência de “matacões” na parte superior do furo (tampão).

1.5.2.9 Volume detonado:

Se multiplicarmos o afastamento pelo espaçamento e pela altura da bancada (ou pelo comprimento do furo acima do pé, no caso de furos inclinados), teremos o volume de rocha compacta “IN SITU” extraída por cada furo detonado.

$$V = A \cdot E \cdot H \text{ m}^3$$

O volume de rocha depois de detonada é, aproximadamente, 1,5 vezes o volume de rocha compacta (empolamento) para rochas tipo granito. Para cada tipo de rocha será definido um parâmetro de empolamento.

1.5.2.10 Altura de carga de fundo (hf):

A carga de fundo corresponde a uma coluna de explosivo, em metros, mais potente (mais denso) utilizado no fundo do furo onde a rocha encontra-se mais engastada.

A profundidade de furação (Pf) menos a altura do tampão (T) nos fornece a altura da coluna de explosivos (He) a ser carregada por furo.

$$He = T - Pf \text{ em metros.}$$

A faixa de intervalo para os valores de altura de carga de fundo hf é de :

$$(0,3 \text{ a } 0,5) \cdot He$$

Inicialmente tomamos o valor máximo para hf = 0,5.He e após as primeiras detonações ajustamos para valores otimizados e técnico-econômicos.

A concentração e a distribuição de explosivos no furo vão depender de parâmetros como:

- Diâmetro dos furos;

- Densidade do explosivo escolhido;
- Diâmetro do explosivo escolhido;
- Consistência do explosivo;
- Tipo de encartuchamento do explosivo;
- Presença de água no furo;

1.5.2.11 Altura de carga de coluna (hc):

É a altura da carga explosiva acima da carga de fundo, a qual não precisa ser tão concentrada (densidade menor) , pois sua função principal é “empurrar” o material fragmentado ao longo da face livre.

$$hc = Pf - T - hf \text{ em metros.}$$

onde:

hc - altura de carga de coluna em metros;

Pf – altura total do furo (profundidade de furação) em metros;

T – altura do tampão em metros;

hf – altura da carga de fundo em metros.

Geralmente a concentração da carga de coluna (kg/m), também chamada de razão linear de carga, corresponde a 40% a 60% da concentração da carga de fundo.

Há casos de termos uma variação na concentração na carga de coluna tais como :

- Para obtermos uma fragmentação fina,
- Na detonação de linhas múltiplas de furos,
- Quando existir material de desmontes anteriores na frente da face da bancada,
- Ocorrências geo-estruturais diferenciadas ao longo da face livre da bancada,
- Reparação de erros de desmontes anteriores com “over break”,
- Falhas de furos ao longo da coluna explosiva.

1.5.2.12 Razão linear de carregamento (RLC):

Exprime a quantidade, em peso, de explosivos utilizados por metro de furo carregado sendo expresso em kg por metro. Para um dado valor de diâmetro de furo e um determinado tipo explosivo (densidade) chega-se a RLC da carga de coluna ou da carga de fundo.

Estes valores são calculados em tabelas e são adequados aos diversos tipos de explosivos conhecidos comercialmente bem como suas diversas aplicações.

Tabela 8: Razão linear de carga

Diâmetro		Densidade					
mm	polegada	0,6	0,8	0,9	1	1,15	1,45
22	7/8"	0,23	0,31	0,35	0,0,39	0,45	0,56
25	1	0,3	0,41	0,46	0,51	0,58	0,73
32	1 ¼	0,48	0,63	0,71	0,79	0,91	1,15
38	1 ½	0,68	0,91	1,03	1,14	1,31	1,65
50	2	1,22	1,62	1,82	2,03	2,33	2,94
57	2 ¼	1,54	2,05	2,31	2,57	2,95	3,72
65	2 ½	1,9	2,53	2,85	3,17	3,64	4,59
75	3	2,74	3,65	4,1	4,56	5,24	6,61
90	3 ½	3,72	4,97	5,59	6,21	7,14	9
100	4	4,86	6,49	7,3	8,11	9,32	11,76
125	5	7,6	10,13	11,4	12,67	14,57	18,37
150	6	10,94	14,59	16,42	18,24	20,98	26,45
311	12 ¼	45,62	60,83	68,43	76,4	87,44	110,26

Obs: Ex: Um furo com diâmetro de 2 polegadas (50mm) carregado com um explosivo de densidade igual a 0,80 g/cm³ consumirá cerca de 1,62 Kg / m de furo carregado.

CAPITULO-2 : METODOLOGIA

A metodologia utilizada para executar esse trabalho foi definida em 4 etapas, que são:

2.1 Revisão Bibliográfica:

Realização de uma revisão extensiva da literatura sobre métodos de desmonte de rochas, controle de fragmentação, formação de matacões e práticas recomendadas na indústria de mineração.

2.2 Caracterização Geológica e geotectónica do maciço rochoso.

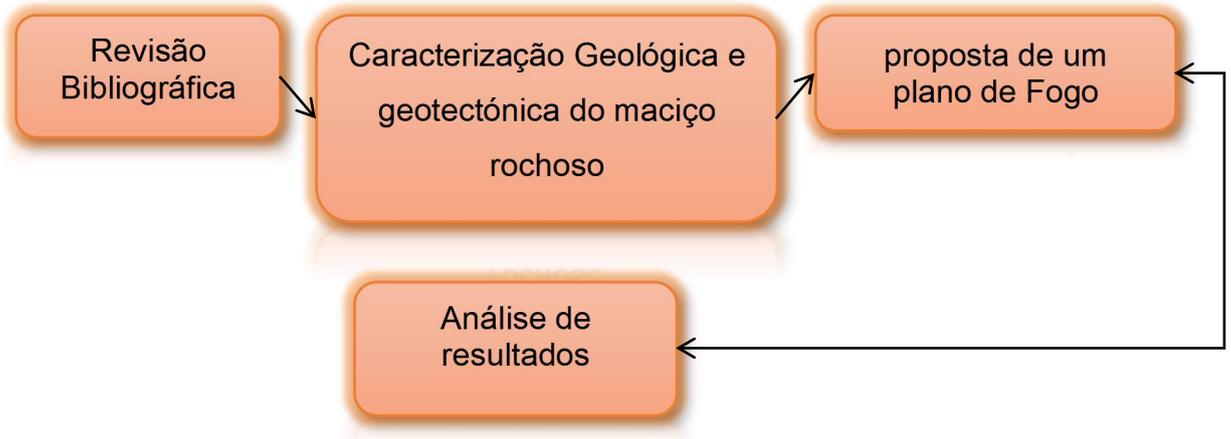
Análise detalhada da geologia da área de estudo. Isso inclui a identificação do tipos de rochas, propriedades físicas e mecânicas das rochas, incluindo dureza, densidade, resistência, entre outras.

2.3 Proposta de um plano de Fogo.

Tendo em conta a densidade da rocha distribuição das cargas explosivas, espaçamento entre furos, tipo de explosivos, entre outros parâmetros.

2.4 Análise dos resultados.

Análise dos resultados propostos e identificar possíveis pontos de melhoria e garantir a ausência ou redução de matacões.



CAPÍTULO 3: ESTUDO DE CASO

3.1 Apresentação do Projecto

A mina de Luele foi descoberta em Novembro de 2013 como resultado de um estudo que serviu para identificar o potencial diamantífero do país realizado pela Endiama e a Alrosa, sendo uma zona que segundo estudos geológicos apresenta um enorme potencial, e com uma vida útil de mineração estimada em até 30 anos.(Sociedade mineira de Catoca, 2021).



Figura 12 : Kimberlito de Luele

Fonte: Site da Catoca

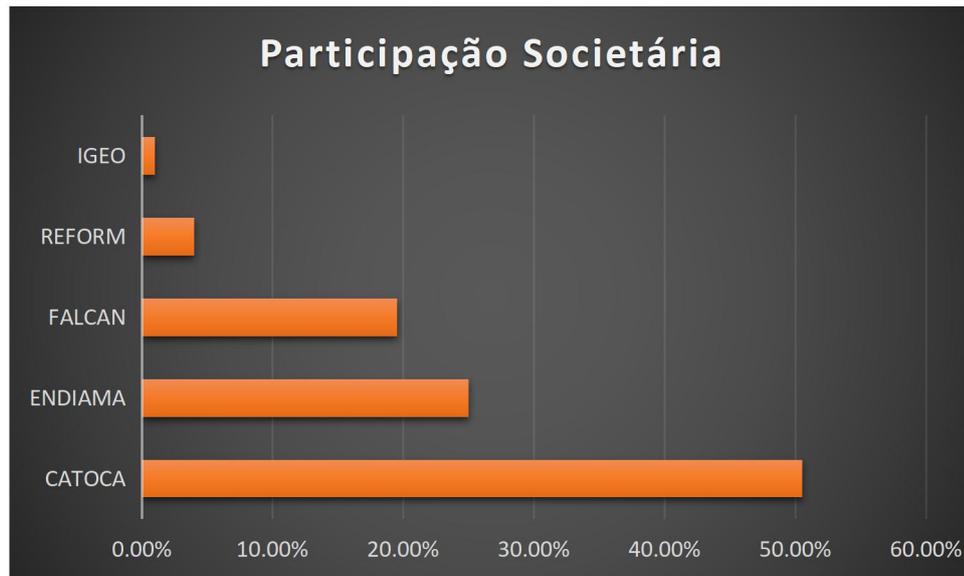


Figura 13 :Participação societária do Kimberlito de Luele

Fonte:Revista Luele (Endiama)

O Luele é aquilo que, tecnicamente, designamos por "time one", ou seja, a da primeira linha. O kimberlito possui reservas estimadas em 350 milhões de quilates. Sua produção está estimada em 13 milhões de quilates ano, com previsão para um tempo de vida até 2090. (Minas de Angola ,2023).

3.1.1 Geologia

No âmbito da determinação do potencial geológico-mineiro de Luele, concluídas as etapas iniciais do programa de prospecção geológica, definiu-se uma fase pré-operacional da mina que teve início em janeiro de 2017 e prossegue até a data presente. Esta fase permitiu a preparação da mina para uma amostragem de grande volume o que possibilitou que se determinassem os principais parâmetros técnicos-económicos do projecto.

Dos resultados de prospecção obtidos até a data somos a destacar os seguintes indicadores:



QUILATES

628
MILHÕES

TEMPO DE EXPLORACAO
ESTIMADO

60 ANOS
2023 E 2083

3.1.2 Exploração mineira

A chaminé kimberlítica do Luele é explorada a céu aberto, preconiza três etapas sequências de trabalho, designadamente: o desmonte , o carregamento e o transporte da massa mineira. Estas actividades têm como objectivo assegurar o acesso físico aos horizontes onde se localiza o minério, através do aprofundamento gradual da mina, concretizado em observância aos parâmetros geotécnicos que determinam a estabilidade dos taludes na mina e garantem a segurança do pessoal operacional, matérias e equipamentos. Para tal, ocorre primeiramente a remoção directa das rochas estéreis sobrejacentes, sendo este material encaminhado para as escombreyras e de seguida efectua-se a extração do mineiro que é encaminhado para processamento na central de tratamento ou para armazenamento em estoques de minério. A actividade de exploração mineira em Luele decorre com base nos planos de longo, médio e curto prazo estabelecidos, respeitando as melhores práticas e regras da exploração mineira.

3.1.3 Operação de desmonte

Com recurso a escavadeiras hidráulicas com baldes de 4 a 8 metros cúbicos de capacidade, podendo ser complementado por tractores de esteiras (Bulldozers) de grande porte visando possibilitar a desintegração e escarificação do minério. Prevê-se que a operação de desmonte evolua para um processo combinado “mecânico e dinâmico “ envolvendo trabalhos de perfuração e detonação (TPD)

3.1.4 Operações de carregamento e transporte

O carregamento e o transporte de massa mineira(Estéril e Minério) na mina de Luele é cíclico e resulta da acção combinada da sua frota de equipamentos de carga (escavadoras e pás carregadeiras) conjuntamente com a frota de equipamentos de transporte ,constituída por camiões articulados de 45 toneladas e camiões rígidos de 100 toneladas. No futuro

próximo Luele implementara um sistema de gerenciamento da sua frota de equipamentos que irá assegurar a capacidade de monitoramento, maximizar a produtividade e melhorar a estrutura de custos operacionais.

3.1.5 Desenvolvimento da mina

A presente etapa de desenvolvimento da mina de Luele é caracterizada pelos seguintes parâmetros de exploração:

Altura das Bancadas: 10 - 30 metros

Diametro actual da mina: 1.150 ×1.050

Ângulo de talude rochas freaveis: 26 - 45°

Largura média das vias de circulação dentro da mina: 15 - 30 metros

Profundidade actual da Mina : 90 metros

Taxa de produção mensal da massa mineira em 2023: 814 mil metros

Largura da rampa de transporte (25 - 30) metros

3.2 Características Gerais da Região do Jazigo

3.2.1 Localização Geográfica

A chaminé kimberlítica do Luele localiza-se no Nordeste da República de Angola, província da Lunda Sul, na bacia do rio Luele, aproximadamente 35km da cidade de Saurimo.

A mina situa-se entre as províncias da Lunda-Norte e Lunda-Sul, a Leste do País. Tem uma área de concessão de 1195 km² (Minas de Angola)



Figura 14: Mapa de Angola, Imagem satélite da Mina de Luele .

Fonte: Q-GIS, Google Earth

A mina de Luele está à uma distância de 20KM da mina de Catoca (Novo Jornal, 2015)

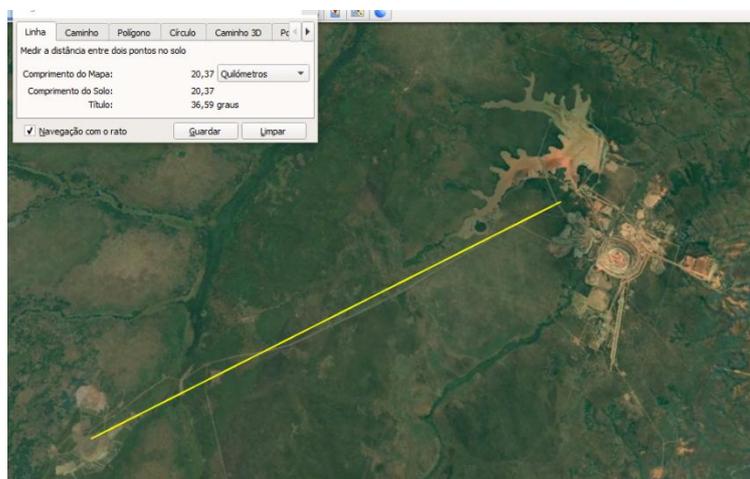


Figura 15 : Imagem satélite da mina de Luele e mina de Catoca.

Fonte: Google Earth

3.2.2. O Relevo

A região onde está localizada a nossa concessão mineira possui como unidade geomorfológica representada por *Plateau* da Lunda, também conhecida como Planalto da Lunda, é uma extensa área planáltica localizada no nordeste de Angola, na África Central.

Essa região é conhecida por sua topografia relativamente plana, marcada por extensas planícies, com altitudes moderadas, sendo que a concessão possui cotas absolutas de 1090m a 1030m.

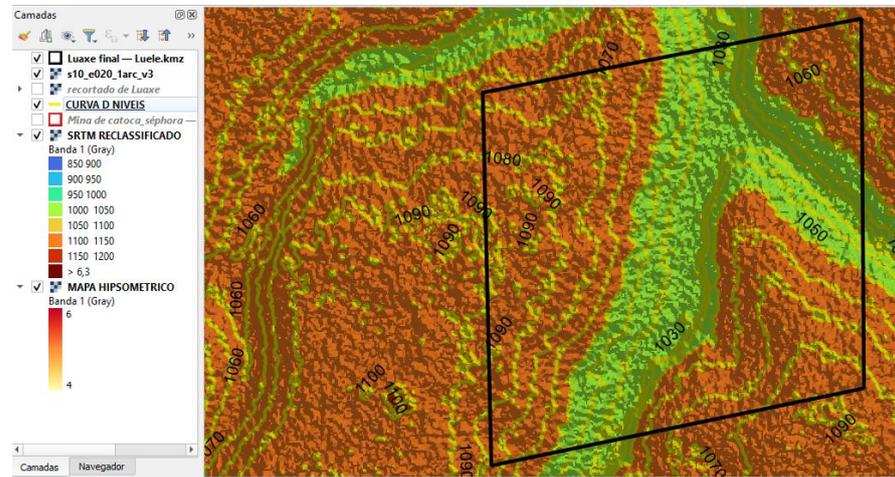


Figura 16: Mapa de curvas de níveis de Luele

Fonte:Q-GIS

3.2.3 Condições Climáticas e Solo

Segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger* predomina na província o clima subtropical úmido (Cwa), com temperaturas que oscilam entre o máximo de 34°C e mínimo de 22°C, registrando grande precipitação pluviométrica(wikipedia)

A estação quente permanece por 1,7 mês, de 10 de agosto a 30 de setembro, com temperatura máxima média diária acima de 32 °C. O mês mais quente do ano em Saurimo é setembro, com a máxima de 33 °C e mínima de 19 °C, em média.

A estação fresca permanece por 5,3 meses, de 15 de novembro a 24 de abril, com temperatura máxima diária em média abaixo de 28 °C. O mês mais frio do ano em Saurimo é junho, com a mínima de 13 °C e máxima de 29 °C, em média.(pt.weatherspark.com)

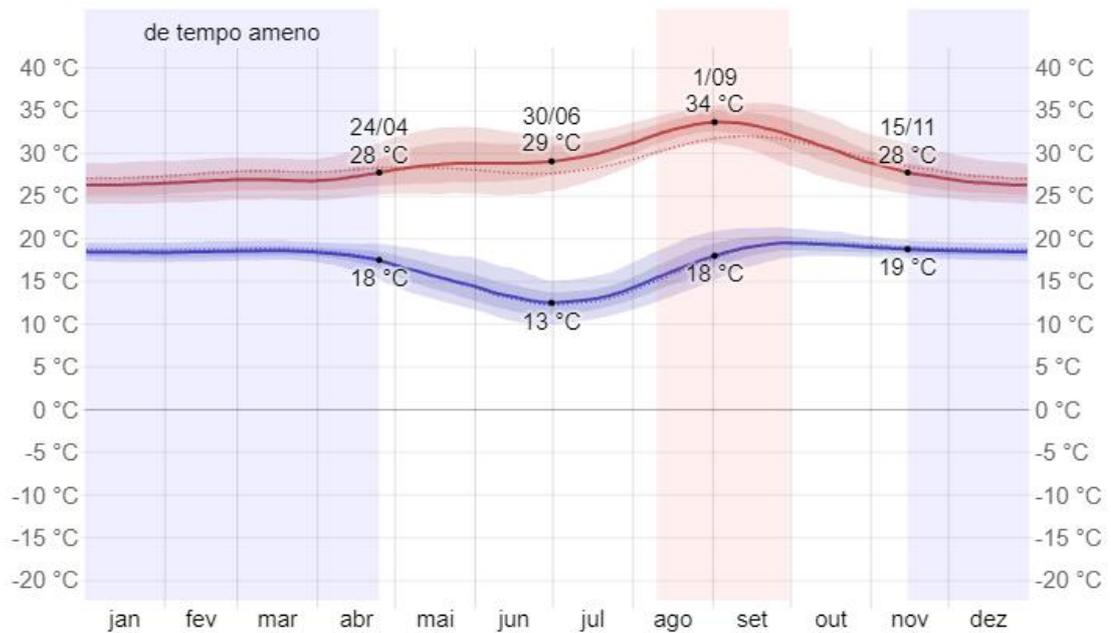


Figura 17 : Condições meteorológicas por mês de Saurimo

Fonte:pt.weatherspark.com

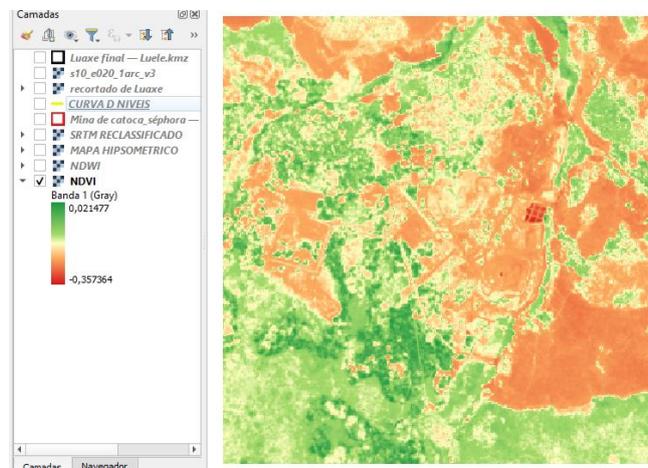


Figura 18 : Mapa de NDVI de Luele

Fonte:Q-GIS

3.2.4 Hidrografia

Importantes rios cortam terras sul-lundenses, com destaque para o Cassai, o Chiumbe-Luateche e o Cuango. Outros rios relevantes são o Luia, o Chicapa (que banha Saurimo), o Luachimo, o Luxiza e o Cucumbi, todos estes com nascente na província. Todos os rios

citados são tributários do Cassai que, por sua vez, é um dos maiores tributários da bacia do Congo. (wikipedia)

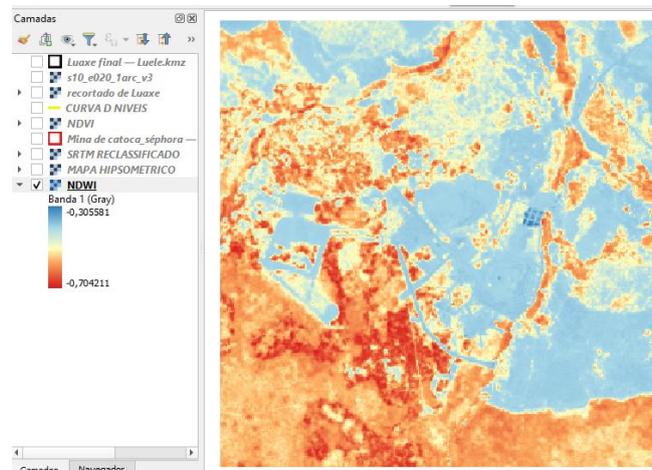


Figura 19 : Mapa de NDWI de Luele

Fonte:Q-GIS

3.3 Estrutura geológica do jazigo

A mina Luele é um depósito primário de diamantes formado por rochas kimberlíticas (Rochas vulcânicas sedimentares, Kimberlitos Tufíticos e Kimberlitos Piroclásticos), coberto por sedimentos do Calahari e Calonda.

3.3.1 Estrutura da chaminé kimberlítica de Luele

O jazigo Luele foi descoberto ao abrigo dos trabalhadores de pesquisa em Novembro de 2013, durante a verificação de uma anomalia magnética. Os trabalhos geofísicos de superfície (electrossondagem de perfil TDEM) incluíram a sondagem detalhada da cobertura das chaminés na superfície Luele e Luaxe 071, a definição de alta precisão dos contornos de afloramento das chaminés na superfície da base mesozóica, bem como da estrutura dos horizontes superiores do jazigo até às profundidades de 150-170 m, foram detectadas e delineadas as depressões de cratera preenchida pelas formações vulcânico-sedimentares pouco diamantíferas.

Dentro das margens da chaminé foram perfuradas 40 poços de pesquisa, avaliação e prospecção com dimensão total de 9740,2 m. Entre eles 22 poços cortam o contacto da chaminé com as rochas encaixantes, ficando os restantes parados em kimberlitos. O poço mais profundo em kimberlito atingiu 613 metros.

A chaminé kimberlítica Luele fica na parte Sul a da concessão Luaxe num bloco de rochas metamórficas de deslocação complexa, Limitado de Sul e Norte por quebras de extensão sublatitudinal e partido por quebras submeridionais de extensão Noroeste. A zona de saída superficial do corpo mineiro tem forma de haltere o que permite supor a existência de duas raízes do jazigo. Na vizinhança imediata a chaminé foram descobertos vários corpos kimberlíticos de pequena dimensão.

3.3.2 Sedimentos de cobertura e rochas encaixantes.

As rochas kimberlíticas das chaminés são completamente cobertas pelos sedimentos arenoso-argiloso da formação Calonda do grupo Calaari, bem como pelos sedimentos quaternário com a espessura total de 53 a 65m. O contacto dos sedimentos de cobertura com a s rochas da chaminé é sub-horizontal, com a espessura destes sedimentos a aumentar para Oeste ao longo com aumento das cotas de altitude do relevo. As rochas de cobertura são representadas pelos seguintes tipos principais :

sedimentos biogénicos (bQ_4);

Membros não segmentado dos sedimentos de idade paleogéneo-quaternarios tardios(Pg-N- Q_4);

Sedimentos da formação Calonda (K_2c).

3.3.3 Morfologia interna e teor de diamante no jazigo Luele.

Na secção a chaminé Luele é composta por três membros. Os kimberlitos piroclásticos (PYRK-1, PYRK-2) que são o principal tipo de minério compõem a zona de diatrema do corpo minério, sendo depositados principalmente a partir da profundidade de 90-100m da superfície natural. Os kimberlitos piroclásticos são caracterizados pelos teores moderados de diamantes em amostras particulares de classe +0,5 mm, ficando na margem desde 0,0 até 4,85 - 4,93 qt/t, com o valor médio de 0,97 qt/t. Geralmente, os derivados tufíticos dos kimberlitos(T) ficam depositados imediatamente sobre os kimberlitos piroclásticos. Os tufitos são, de facto, os mesmos kimberlitos-mãe, com traços evidentes de ressedimentação, com pseudo-laminações e traços de escoamento. A espessura de tufinos sobre os kimberlitos pode atingir 80 - 100 m, por regra até 40 - 50 m. Os tufitos são caracterizados pelo teor de diamantes estável. Os teores de diamantes em amostras particulares da classe +0,5 mm ficando na margem desde 0,03-0,05 até 6,80 qt/t, com o valor médio de 2,12 qt/t.

A massa principal dos sedimentos de cratera é representada pelo complexo de rochas vulcano-sedimentares (RVS - VSRL, VSRH). O teor de diamantes nestas formações é bastante baixo, porém, até 20% deles podem ter teor de diamantes industrializável (acima de 0,15 qt/t). As RVS são associadas à zona central da área da chaminé, preenchendo duas depressões em forma de funil nas partes norte e sul da chaminé. A profundidade máxima registrada de deposição das RVS praticamente sem teor de diamantes - 207 metros abaixo da superfície natural (140m abaixo da superfície da chaminé)

3.3.4 Condições hidrológicas do jazigo.

A rede hídrica da região pertence à bacia do rio Congo. A base de erosão local e o caudal permanentemente activo do rio Luele que atravessa o território na direcção submeridional a Leste da chaminé. A distância entre o centro marcado da mina e o rio é de cerca 785m.

A superfície do jazigo e dos territórios da divisória das águas adjacentes têm cotas absolutas de 1024,5 até 1095,5 m. As divisórias são largas, planas, por regra, cobertas pelos arbustos e florestas pouco densa, com os solos predominante arenosos de origem eólica.

Nas margens do jazigo as cotas absolutas do lenol de água do rio Luele são de 1026,1-1024,5m (Agosto de 2016) com inclinação do caudal - 1,03 m/km (0,001un). A profundidade de água na estiagem é de 0,5-0,8 m em corredeiras até 1,0- 2,0 m em bacias aumentando até 2,5-4,0 m na época de chuva em estreitamento do vale. Velocidade de corrente 1,4-2,9 m/seg.

Na etapa inicial no rio foram instalados dois postos hidrológicos (da Sociedade Mineira de Catoca): a jusante -n.º 1, 0,8 km a jusante da foz do rio Lufune, e a montante n.º 2, a 13 km a montante do posto n.º 1.

**CAPÍTULO 4 - INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO ESTADO TENSIONAL DO
MACIÇO AO EXPLODIR CARGAS COMPACTAS NO KIMBERLITO DE
LUELE**

4.1 Características das Substâncias Explosivas a Investigar

As emulsões são tipos de explosivos elaborados a partir do nitrato de amônio, combinado com outras composições químicas que estabilizam o produto e o faz resistente à água, como o nitrito de sódio. Quando embalados industrialmente, são conhecidos como emulsão encartuchada. No entanto, se tratando de grandes maciços de rocha, a emulsão pode ser aplicada directamente no furo sem a sua embalagem, o que caracteriza a emulsão bombeada. Para o uso como explosivo bombeado, a emulsão deve ser armazenada e transportada em uma unidade móvel ou caminhão-bomba que contenha uma unidade misturadora, pois apenas no momento do bombeamento para os furos é que a emulsão se tornará explosiva, uma vez misturada ao nitrito de sódio.

A emulsão a granel apresenta algumas vantagens em relação à emulsão encartuchada, nomeadamente: redução do custo de embalagem e transporte o que beneficia tanto o produtor como o consumidor; a viscosidade dos produtos explosivos a granel é mais baixa, logo são aplicados em grandes quantidades e mais facilmente bombeados directamente para os furos; grande eficiência de carregamento dos furos; o tempo de enchimento é reduzido e a operação de desmonte é acelerada; o enchimento dos furos é completo o que aumenta a utilização do coeficiente de energia do explosivo.

Tabela 9- Característica da SE HEF-100

HEF – 100	Densidade da SE [g/cm^3]	1,18
	Velocidade de detonação [m/s]	5.200
	Calor da explosão [Kj/Kg]	4.305
	Pressão de detonação [MPa]	7.211
	Índice adiabático dos produtos da explosão [K]	3,12

Tabela 10- Características do Riogel Kupula

Riogel Kupula	Densidade da SE [g/cm^3]	1,20
	Velocidade de detonação [m/s]	5.000
	Calor da explosão [Kj/Kg]	5.684
	Pressão de detonação [MPa]	100
	Longitude do cartucho, l_c [mm]	600
	Peso do cartucho q' [g]	1.200
	Diâmetro do cartucho, d_c [mm]	90
	Índice adiabático dos produtos da explosão [K]	3,16

4.2 Acção da Explosão no Maciço Rochoso

Muitas teorias têm sido propostas sobre o mecanismo de fragmentação das rochas devido à acção das substâncias explosivas. Tal como foi referido anteriormente, segundo Konya e Walter (1990), dois mecanismos distintos têm lugar neste processo: em primeiro lugar, uma onda de choque, do tipo compressiva, desenvolve-se em torno da carga explosiva; em segundo lugar, após a passagem da onda de compressão ao longo da rocha, a pressão do gás no furo submete novamente a rocha a tensões de compressão.

Sendo assim, a detonação das cargas explosivas nos furos, ocorre em duas fases distintas (Bernardo, 2009):

Fase dinâmica – o maciço é sujeito a uma perturbação dinâmica violenta, aplicada num curto espaço de tempo, que é produzida por uma onda de choque que se desloca a uma velocidade que é essencialmente dependente do tipo de rocha, mas também do tipo de explosivo. A onda, propagando-se radialmente a partir do furo, é gradualmente atenuada com a distância, o que dá lugar a um regime de propagação duma onda de tensão compressiva, do tipo sónico;

Fase quase-estática – é caracterizada pela expansão dos gases resultantes da detonação da carga explosiva, originando a aplicação de tensões elevadas, em regime quase estacionário. A designação atribuída (quase-estática) deve-se à ordem de grandeza dos tempos associados a esta fase, visto que, a propagação das ondas de tensão ocorre na ordem de grandeza das dezenas de microsegundos, a pressurização dos gases ocorre por vários milisegundos.

Assim, a fase dinâmica corresponderá à acção das ondas de choque no maciço rochoso, e a fase quase-estática é aquela devida ao trabalho mecânico realizado pelos gases provenientes da reacção química de decomposição do explosivo, ou seja, corresponde ao deslocamento dos blocos do maciço rochoso.

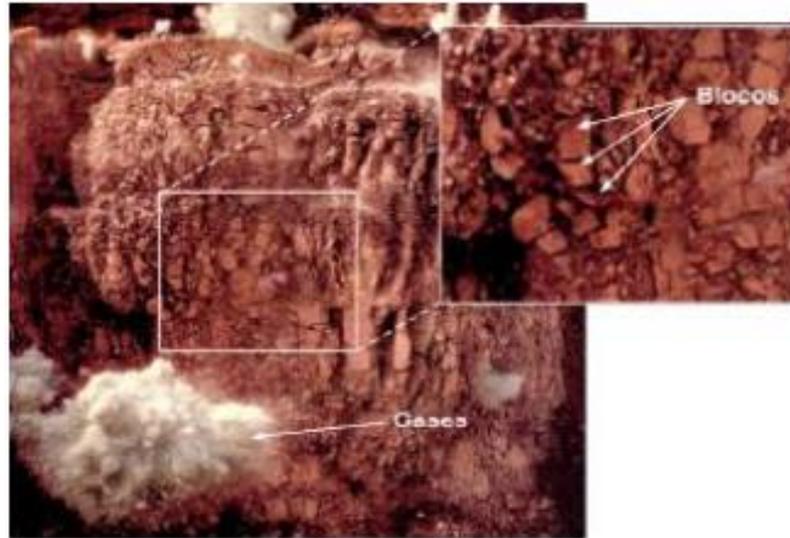


Figura 20 : Deslocamento de material: gases em expansão e blocos acelerados

Fonte:(<https://www.youtube.com/watch>)

4.3 Pressão Máxima na Frente das Ondas Refractadas na Parede do Furo

4.3.1 Parâmetros das ondas de choque para cargas compactas

A determinação do estado tensional do maciço ao explodir cargas de substâncias explosivas compactas na mina de Catoca, se realiza segundo a metodologia elaborada por Alexandre (2006), estabelecendo os seguintes parâmetros:

- Pressão na frente da onda de detonação da substância explosiva;
- Velocidade dos produtos de detonação;
- Coeficiente de refração acústica das ondas;
- Valor inicial da pressão na frente das ondas refractadas na rocha;
- Coeficientes empíricos A e m;
- Pressão máxima na frente das ondas refractadas na parede do furo;
- Densidade da rocha na frente da onda refractada;
- Velocidade das partículas das ondas refractadas;

- Velocidade da frente da onda refractada.

As fórmulas e expressões matemáticas que se utilizaram são as seguintes:

- a) Pressão na frente da onda de detonação da substância explosiva

(Borovikov & Vaniagin, 1985):

$$P = \frac{\rho_{se}(v_d)^2}{K+1}, \text{ Pa}$$

Onde:

ρ_{se} - Densidade da substância explosiva, kg/m³.

V_d - Velocidade de detonação da substância explosiva, m/s.

K - índice adiabático dos produtos da explosão.

K = f(ρ_{se}).

Este índice se determina através da interpolação na tabela que se segue.

Tabela 11 - Índice adiabático dos produtos da explosão (Filipe, 2022)

ρ_{se} (g/cm ³)	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,75
K	1,3	1,6	2,2	2,8	3,0	3,2	3,4

- b) Velocidade dos produtos da explosão (Borovikov & Vaniagin, 1985):

$$v = \frac{v_d}{k+1}$$

- c) Coeficiente de refração acústica das ondas (Borobikok & Vaniagin, 1974):

$$k_R = \frac{2\rho_o v_L}{\rho_{se} v_d + \rho_o v_L}$$

- d) Se determina o valor inicial da pressão na frente das ondas refractadas

em direcção a rocha (Borovikov & Vaniagin, 1974):

$$Pr^1 = k_R \cdot p$$

e) Coeficientes empíricos A e m (Gogoliev, 1968).

Se:

$$\frac{Pr}{\rho_o(v_L)^2} < 0,1 \quad \text{então : } A = 3 \text{ e } m = 3.$$

$$0,1 \leq \frac{Pr}{\rho_o(v_L)^2} \leq 35 \quad \text{então: } A = 5,5 \text{ e } m = 5.$$

f) Pressão máxima (Pr) na frente das ondas refractadas na parede do furo (Gogoliev *et al.*, 1965).

No caso de cargas compactas, a pressão máxima na onda refractada é calculada em dependência da relação entre a impedância da substância explosiva, ou seja, o produto $\rho_{SE} V_d$ e a resistência de onda na rocha $\rho_{SE} V_L$ (acoplamento de impedância) a partir das condições (Gogoliev et al., 1965):

Se:

$$\rho_{SE} V_d \quad \rho_{SE} V_L$$

$$\left\{ \frac{Pr}{\rho_o} \left[1 - \frac{1}{\left(A \frac{Pr}{\rho_o v_L^2} + 1 \right)^{1/m}} \right] \right\}^{1/2} = v - \left\{ \frac{\sqrt{2k}(Pr-p)}{\rho_{se}(k+1)[Pr(k+1)-p(k-1)]^{1/2}} \right\}$$

Onde:

Pr – Pressão máxima, MPa.

ρ_o - Densidade, Kg/m³.

ρ - Massa volúmica, Kg/m³.

V_L - Velocidade das ondas longitudinais, m/s.

p - Quantidade de carga de substância explosiva por metro linear de perfuração, kg/m.

$\rho_{SE} V_L$ $\rho_{SE} V_d$

$$\left\{ \frac{\text{Pr}}{\rho_o} \left[1 - \frac{1}{\left(A \frac{\text{Pr}}{\rho_o v_L^2} + 1 \right)^{1/m}} \right] \right\}^{1/2} = v + \frac{2k v_d}{k^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{\text{Pr}}{p} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$

g) Se determina a densidade da rocha na frente da onda (ρ_R), a velocidade das partículas (V_R) e a velocidade da frente da onda refractada (V_F)

(Borovikov & Vaniangin, 1974)

$$\rho_R = \rho_o \left[1 + \frac{A \rho_R}{\rho_o v_L^2} \right]^{1/m}, \text{ kg/m}^3$$

$$V_R = \sqrt{\text{Pr} \left(\frac{1}{\rho_o} + \frac{1}{\rho_R} \right)}, \text{ m/s}$$

$$V_F = \left[\frac{\rho_R}{\rho_o} \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho_o}{\rho_R}} \right) \right]^{1/2}, \text{ m/s}$$

Os resultados dos parâmetros de detonação e ondas de choque refractadas ao maciço rochoso com cargas compactas aparecem na tabela abaixo.

Tabela 12 - Parâmetros das ondas de detonação e choque refractadas no maciço rochoso com cargas compactas (Filipe, 2022)

Sustância explosiva	P (MPa)	V (m/s)	K_g	P_r^1 (MPa)	A -	m -	P_r (MPa)	ρ_R (kg/m ³)	V_R (m/s)	V_F (m/s)
HEF-100	7.547	1.262	1.41	10.664	5.5	5	20.352	3.205	1.061	6.121

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Proposta do Plano de fogo

Depois de termos feito o estudo de caso e recolhido as informações necessárias podemos concluir que:

5.1.1 Impedância

Impedância Acústica pode ser caracterizada como uma propagação de som de um meio, com determinadas características específicas, para outro meio com características diferentes. Esta diferença estará diretamente relacionada na energia que será refletida na interface dos meios em questão.

Escolha do tipo de explosivo depende de vários factores e um dos factores principal é a impedância acústica que é caracterizada pelo produto da densidade (ρ) da rocha pela velocidade da onda acústica (V) na rocha.

$$I = \rho \times v$$

Sendo então um dado que se refere às camadas de rocha, a impedância acústica possui várias vantagens. De acordo com Latimer et al. (2000) um modelo de impedância de boa qualidade contém mais informação que o dado sísmico, pois, esse modelo possui todas as informações contidas no dado sísmico, além de possuir a informação adicional dos dados de perfis de poços

Para o tipo de Explosivo Vamos usar emulsão encartuchada IBEGEL AD com resistência a água e grande potência na detonação.

Tabela 13 - Característica do explosivo

	ibegel	Ibegel SSP	Ibegel AD
Densidade	1,15	1,25	1,25
Velocidade de detonação	500 a 5.100	3.500 a 4.700	3.500 a 4.700
RWS (%)			
RBS (%)	86	90	86
Volume de gases (L/kg)	122	135	135
Resistencia à águas	Muito resistente		

Na tabela a seguir estarão as variáveis para o cálculo do plano de fogo:

Tabela 14 - Variáveis do plano de fogo

Tipo de rocha	GNAISSE
Densidade da rocha (g/cm ³)	2,8
Altura da bancada (m)	20
Inclinação da bancada	45°
Diametro do furo (mm)	178
Equipamento de perfuração	Perfuratriz sobre trator, furo-baixo
Inclinação do furo	15°
Tipo de explosivo	Emulsão
Densidade do explosivo (g/cm ³)	1,25

Tabela 15- Cálculo do Afastamento, Espaçamento e malha.

Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Malha (m ²)
$A = 0,0123 \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times D_e$	$E = (H_b + 7A) / 8$	$M = A \times E$
5	7	35

Tendo em conta que a Altura da bancada varia de 10 - 30 m, a altura média será de 20m logo segundo a **Tabela 6, o diâmetro do furo adequado será de 178mm .**

Tabela 16- Calculo do Tampão ,Volume e subfuração

Tampão	Volume detonado (m³)	Subfuração
$T = 0,7 A$	$V = A . E . H$	$S = 0,3 . A$
3,5	700	1,5

Tabela 17 - Calculo da Profundidade do furo, hf e hc

Profundidade do furo	Altura da carga de coluna (m)	altura da coluna de explosivos (He)	Altura da carga de fundo (m)
$Pf = H / \cos a + S$	$hc = Pf - T - hf$	$He = T - Pf$	$hf = 0,5.He$
22	9,25	18,5	9,25

Na **Tabela 7** temos a razão de carga tendo em conta os tipos de rochas,mas para o nosso caso do Gnaiss será igual a 450 e a razão linear de carga ,segundo a **tabela 8** será igual a 31.

5.1.2 Modelo de um plano de fogo

Tabela 18 -Parâmetros do plano de fogo

Tipo de rocha	GNAISSE
Densidade da rocha (g/cm ³)	2,8
Altura da bancada (m)	20
Inclinação da bancada	45°
Diametro do furo (mm)	178

Equipamento de perfuração	Perfuratriz sobre trator, furo-baixo	
Inclinação do furo	15°	
Tipo de explosivo	Emulsão	
Densidade do explosivo (g/cm ³)	1,25	
Afastamento (m)		
Espaçamento (m)		
Malha (m ²)		
Diametro do furo (mm)	177,8	
Tampão	3,5	
Volume detonado (m ³)	700	
Profundidade do furo	22	
Subfuração	1,5	
Altura da carga de coluna(hc)	9,25	
Altura da carga de fundo(hf)	9,25	
Rlc	31	
Rc	450	

5.1.2.1 Esquema de iniciação

Ligação sequencial com retardos “furo a furo” para minimizar a relação de carga máxima por retardo.

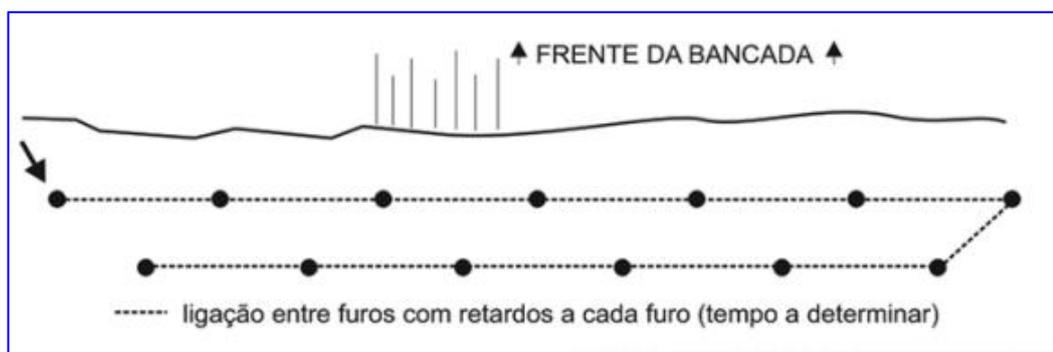


Figura 21 : Esquema de ligação

Fonte: José Lucio pinheiro Geraldi

Observação importante:

- Rochas mais elásticas ou alteradas exigem tempos maiores de retardos

- Rochas mais duras e tenazes podem intervalos reduzidos de tempo
- Para melhor fragmentação da rocha, aumentar o número de retardos por fogo
- Um número menor de retardos provoca um maior lançamento da pilha desmontada

5.2 Impactos ambientais devido a detonação

Na indústria extrativa a céu-aberto, a principal fonte de impactos ambientais provém da escavação de maciços rochosos com recurso a explosivos, devido aos efeitos que originam. Cabe ao responsável pelo diagrama de fogo, ajustar o explosivo ao ambiente geológico, procurando as soluções que melhor se adaptem, otimizando cada aplicação e consequentemente, verificando menor impactos ambientais. (Bernardo, 2004)

Com efeito, qualquer excesso de energia empregue na fase de escavação, é prejudicial, uma vez que tem como consequências: (Bernardo, 2004):

- Ocasionalmente custos mais altos de equipamentos e materiais;
- Tornar o maciço menos resistente, mais deformável e mais permeável;
- Provocar impactos ambientais acrescidos;
- Obrigar a usar suportes mais resistentes e mais caros;

De seguida serão apresentados os impactos ambientais mais comuns resultantes de desmontes com recurso a explosivos, em explorações a céu aberto.

5.2.1 Onda aérea

O uso de explosivos origina a propagação de ondas de choque através da atmosfera, gerando um som desagradável (ruído) e vibrações aerotransportadas, vulgarmente conhecidas por onda aérea ou sopro. As vibrações aerotransportadas resultam, essencialmente, da vibração da superfície do terreno, enquanto o ruído é geralmente gerado pela libertação de gases, uso de cordão detonante e/ou pela colisão de blocos projectados entre si e o piso.

Sendo que as principais medidas a tomar de modo a minimizar este impacto são:

1. Utilizar um atacamento com dimensão adequada (usualmente 0,7 vezes o afastamento);
2. Utilizar como material de atacamento, rocha fragmentada em vez do usual pó de furação, ou então dispositivos de melhoria de atacamento (*plug*);
3. Analisar a face livre de modo a detectar fracturação excessiva da frente de desmonte, e carregar com explosivos a primeira fila de furos em conformidade;

4. Detonar quando as condições de vento sejam favoráveis (nomeadamente quando a sua direcção seja contrária ao local das estruturas a proteger);

5. Utilização de detonadores não eléctricos, em vez do cordão detonante.

Consoante a intensidade da onda aérea, são vários os efeitos esperados

5.2.2 Ultralaçamento

A norma NBR 9653, define ultralaçamento como o “arremesso de fragmentos de rocha de diâmetro superior a 1000 mm além da área de operação decorrentes do desmonte de rocha com uso de explosivos” (ABNT, 1986) .

Dele decorrem os maiores riscos pessoais e materiais passíveis de ocorrer em um desmonte de rochas com explosivos. Sua prevenção dá-se na elaboração de um bom plano de fogo, não sendo, entretanto, suficiente para evitá-los.

Silva et al (2000) citam as seguintes causas de ultralaçamentos:

- afastamento insuficiente ou excessivo
- impróprio alinhamento dos furos
- iniciação instantânea de furos em filas consecutivas
- ocorrência de anomalias geológicas
- tampão inadequado

5.2.3 Ruído e sobrepressão atmosférica

Definindo sobrepressão atmosférica como toda propagação de uma onda elástica pelo ar, Eston (1998) considera ruído como a sobrepressão situada na faixa de frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz e considerada desagradável segundo algum critério humano. Às sobrepressões com frequências inferiores a 20 Hz denomina-se infra-sons; àquelas com frequências superiores a 20.000 Hz, ultra-sons. Considera ainda conceitualmente equivocada a utilização do termo 'sopro de ar' por avaliar que tal terminologia implica em deslocamento de matéria.

Sanches (1995), por sua vez, define "sobrepressão atmosférica ou sopro de ar como um termo que se refere à propagação pelo ar de ondas de choque provenientes da detonação de cargas explosivas".

Ambos consideram, entretanto, que as principais fontes de sobrepressão - uma vez que definem ruído como uma sobrepressão em faixa de frequência audível - em um desmonte

de rochas com explosivos estão relacionadas a:

- liberação de gases através de fraturas e da parte superior da coluna de explosivos, com ejeção do tampão;
- detonação de explosivos não confinados;
- deslocamento da fração do maciço rochoso sujeita ao desmonte;
- refração das ondas sísmicas através da atmosfera.

Suas condições de dispersão dependem das condições atmosféricas existentes no local no momento do desmonte, como direção e intensidade do vento, presença de inversões térmicas, nebulosidade, temperatura e pressão.

Seus efeitos vão de incômodos à população vizinha a danos em edificações.

Segundo Silva et al (2000) as ações mitigadoras possíveis dão-se por meio de:

- verificação das condições meteorológicas existentes, evitando a detonação em situações desfavoráveis;
- execução de malhas de perfuração perfeitamente demarcadas e perfuradas;
- não direcionamento da frente de detonação para o local a ser preservado;
- detonações em horário de maior ruído;
- implantação de obstáculos entre a fonte e o local a ser preservado.

CAPITULO 6 : CONCLUSÕES

Ao longo deste estudo, explorou-se em detalhes uma proposta de um Plano de fogo para o desmonte de rochas com explosivos, com o foco específico na prevenção de matacões e na otimização da fragmentação rochosa. A análise geológica detalhada do maciço rochoso no kimberlito Luele serviu como base para a elaboração de um plano de fogo cuidadosamente delineado, acompanhado da escolha criteriosa de explosivos e da implementação de uma sequência de detonação estratégica.

Os resultados obtidos destacam a importância crucial de considerar variáveis como densidade do explosivo, diâmetro e inclinação da perfuração e dimensões da bancada durante o dimensionamento do plano de fogo. Os cálculos matemáticos realizados, levando em consideração factores como altura da bancada, afastamento, espaçamento, carga do furo, número de furos e factor de carga, foram fundamentais para garantir uma abordagem precisa e eficaz.

Além disso, ao desenvolver estratégias que visam maximizar a eficiência operacional, garantir a segurança dos trabalhadores e reduzir o impacto ambiental, este estudo contribui para o avanço das práticas no desmonte de rochas.

RECOMENDAÇÕES

As descobertas apresentadas não apenas proporcionam insights valiosos para a comunidade acadêmica e profissional, mas também oferecem direcionamentos tangíveis para a aplicação prática desses métodos inovadores.

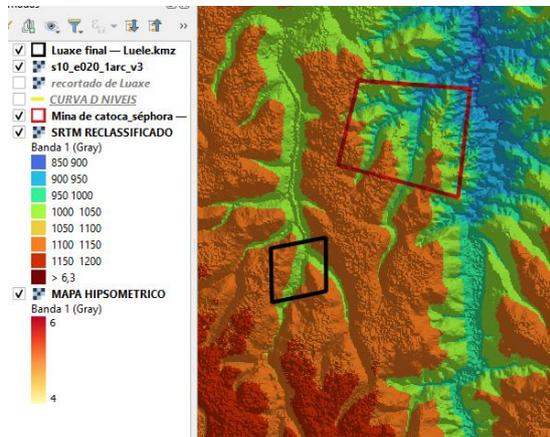
- Desenvolver mais estudos sobre o comportamento do maciço rochoso, aquando da
- utilização de substâncias explosivas do tipo emulsão a granel.
- Estudo do carregamento e transporte adequado após a operação de desmonte.
- Análise da distribuição granulométrica em detonações.
- Fazer o estudo de viabilidade económica dos possíveis métodos de desmonte de rochas com explosivos na mina de Luele.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alexandre Pedro, A.M. (2006). Metodología para el diseño de las voladuras en canteras de áridos. (Tesis Doctoral, ISMMANJ).
2. Alexandre Pedro, A.M.: Metodologia para Projectos de Fragmentação de Rochas com Explosivos. 3as Jornadas Científico-Técnica da Sociedade Mineira de Catoca, Lunda-Sul, 2007.
3. Araujo A.G e Guimarães F. (1992) Geologia de Angola: Noticia explicativa da carta geologica à escala 1:1.000.000
4. Bernades J.P.V (2022) Dimensionamento de planos de fogos reduzindo a formação de matacões provenientes de desmontes de rocha. Monografia de Graduação em engenharia de minas.Universidade Federal de ouro preto.
5. Cardoso J.G (2015) Estudo comparativo entre diversas técnicas de desmonte para optimização económica e ambiental.
6. Correia R.M.S(2011) Influência das propriedades petrofísicas na fragmentação de rochas graníticas por detonação com explosivos. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia mecânica, Faculdade de ciências e tecnologia da Universidade de Coimbra.
7. Cachimbombo E.G. Aprimoramento dos Trabalhos de Perfuração e Desmonte de Rochas com Explosivos no Kimberlito de Catoca
8. Giraldo J.L.P Plano de Fogo a céu aberto e desmonte de rochas esculturais.
9. Iramina W.S (2015) . Aula 03- Desmonte de Rocha por Explosivos :Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo .
10. Koppe J.C e Costa J.F.C.L Operações de lavra em pedreiras
11. Morais J.L (2004) simulação da fragmentação dos desmontes de Rochas por explosivos. Tese de doutorado apresentado pela universidade federal de minas gerais
12. Neto C.D (2004) análise das vibrações resultantes do desmonte de Rocha em mineração de calcário e argilito Posicionada junto à área urbana de limeira (sp) e sua Aplicação para a minimização de impactos

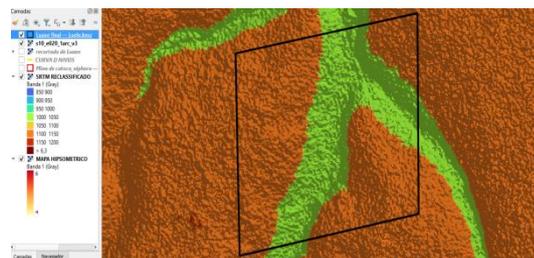
13. Nieble C.M (2017) Desmontes cuidadosos com explosivos aspecto de engenharia e ambientais :Oficina de Textos, 2017
14. Neves L.S (2018) Modelagem de desmonte de rocha para otimização da metodologia mine to mill.
15. Oliveira D.B.M (2017) Projecto de melhoria de fragmentação em desmonte de rochas.Universidade Federal de ouro preto.
16. Oliveira J.G.B (2009) Desmonte de Rocha a Céu Aberto com Recurso a Explosivos
17. Otaño Noguel, J.: Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Universitária Félix Varela, La Habana, 2014.
18. Resende S.A (2011) desenvolvimento de explosivos utilizando combustíveis não-convencionais:Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
19. Souza D.E.T (2018) Modelos de Fragmentação Kuz-Ram e TCM: Estudo comparativo dos modelos de fragmentação empregados na previsão granulométrica da rocha desmontada por explosivos. Universidade Federal de ouro preto
20. Silva T.C (2012) Avaliação da carga máxima por espera através de lei de atenuação visando a minimização de danos decorrentes das operações de desmonte de rochas nas escavações da arena de Pernambuco.
21. Teixeira J.L.S (2010) Qualidade da Fragmentação no Desmonte de Rocha: Análise Preliminar

ANEXOS



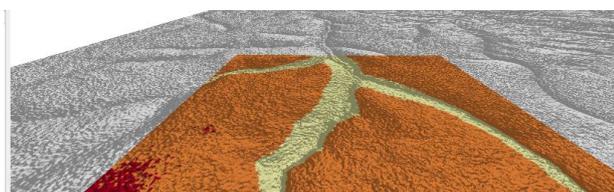
Anexo- Mapa hipsométrico de Luele e Catoca

Fonte:Q-Gis



Anexo- Mapa hipsométrico de Luele

Fonte:Q-GIS



Anexo- Mapa hipsométrico 3D de Luele

Fonte:Q-GIS

Polegadas	Milímetros	Unid. x Caixa* (pçs)	Peso Unid. (g)	Unid. x Caixa* (pçs)	Peso Unid. (g)	Unid. x Caixa* (pçs)	Peso Unid. (g)
1" x 8"	25 x 203	212	118	194	129	-	-
1" x 24"	25 x 610	71	353	-	-	-	-
1 ¼" x 16"	32 x 406	68	368	61	410	-	-
1 ¼" x 24"	32 x 610	45	556	41	610	-	-
1 ½" x 16"	38 x 406	47	532	43	582	-	-
1 ½" x 24"	38 x 610	31	807	29	863	-	-
2" x 16"	51 x 406	27	926	-	-	-	-
2" x 24"	51 x 610	18	1.389	-	-	16	1.563
2 ¼" x 24"	57 x 610	14	1.786	-	-	13	1.924
2 ½" x 24"	64 x 610	11	2.273	-	-	-	-
3" x 24"	76 x 610	8	3.125	-	-	-	-
3 ½" x 24"	89 x 610	6	4.167	-	-	-	-
4" x 24"	102 x 610	4	5.680	-	-	-	-
5" x 22"	127 x 559	3	8.333**	-	-	-	-

Obs.: para garantir 25 kg/cx, podem ocorrer variações de 3% nas dimensões, no peso e na quantidade de cartuchos;

*Para outras especificações, consultar a área de Atendimento ao Cliente;

**Esse produto, em virtude do seu tamanho e condições de fabricação, segue a densidade de 1,25g/cm³.

Anexo- Característica técnica do explosivo

Fonte: www.enaex.com/br



Anexo – Emulsão encartucha do tipo Riogel Kupula

Fonte : Ema Cachimbombo