



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

**Aprimoramento dos Trabalhos de Perfuração e Desmonte de
Rochas com Explosivos no Kimberlito de Catoca**

Ema Baca Glória Cachimbombo (Nº113304)

Luanda, 2022



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

Aprimoramento dos Trabalhos de Perfuração e Desmonte de Rochas com Explosivos no Kimberlito de Catoca

Ema Baca Glória Cachimbombo (Nº113304)

Orientador: Ph.D. António Pedro Alexandre

Coorientadores: Ph.D. Yuneisy Guilarte Matos

Eng.º João Lucamba Candombo

Luanda, 2022

DEDICATÓRIA

A minha amada mãe e as minhas irmãs, pelo incondicional apoio, incentivo e suporte.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de tudo à Deus e toda milícia Celeste.

A minha amada mãe, por estar sempre comigo em todos momentos. As minhas irmãs e ao meu noivo por todo incentivo e apoio.

Ao meu orientador em especial, Professor Doutor António Alexandre, aos Co-Orientadores Professora Doutora Yuneisy Matos, Eng.º João Candombo e a todos que directa ou indirectamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

“Os sonhos não determinam o lugar onde iremos chegar, mas produzem a força necessária para tirar-nos do lugar em que estamos.”

Augusto Cury

RESUMO

O presente trabalho, tem como objectivo principal aprimorar o modo de projecção da pega de fogo com vista a otimizar a fragmentação de rocha, desta forma melhorando as operações de carregamento, transporte e britagem primária. A investigação foi executada na Mina de Catoca que está localizada na província angolana da Lunda Sul, a cerca de 35 km da cidade de Saurimo, na qual se constatou a necessidade de diminuir a percentagem de fragmentos de rochas sobredimensionadas na fragmentação primária, resultantes do desmonte de rochas com explosivos. Com vista a melhorar a presença de fragmentação indesejada foi analisado o plano de fogo usado pela empresa, pois este é um dos principais factores que influenciam o resultado de um bom rebentamento, já que este é essencialmente o projecto fundamental que contém as informações e descrições acerca do desmonte de rochas com explosivos. Como proposta para o aprimoramento do plano de fogo foi realizada uma demonstração de cálculos na qual se fez a determinação dos parâmetros das explosões, considerando-se as propriedades físico-mecânicas das rochas, as propriedades das substâncias explosivas, bem como foi feita uma investigação analítica do estado tensional do maciço ao explodir cargas compactas, com o objectivo de mostrar quais seriam as novas condições de operacionalidade, assim como a realização de experimentos na mina de Catoca.

Palavras-chave: Kimberlito; Explosivos; Perfuração; Fragmentação; Desmonte de rocha.

ABSTRACT

The present work has as main objective to improve the way of projection of the fire handle in order to optimize the rock fragmentation, thus improving the operations of loading, transport and primary crushing. The investigation was carried out at the Catoca Mine, which is located in the Angolan province of Lunda Sul, about 35 km from the city of Saurimo, where it was found that there was a need to reduce the percentage of oversized rock fragments in primary fragmentation, resulting from blasting of rocks with explosives. In order to improve the presence of unwanted fragmentation, the fire plan used by the company was analyzed, as this is one of the main factors that influence the result of a good blast, since this is essentially the fundamental project that contains the information and descriptions about of rock blasting with explosives. As a proposal for the improvement of the fire plan, a demonstration of calculations was carried out in which the parameters of the explosions were determined, considering the physical-mechanical properties of the rocks, the properties of the explosive substances, as well as an analytical investigation of the tensional state of the massif when exploding compact loads, with the aim of showing what the new operating conditions would be, as well as carrying out experiments in the Catoca Mine.

Keywords: Kimberlite; Explosives; Drilling; Fragmentation; Rock dismantling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado das Propriedades Físico-Mecânicas do Gnaiss.....	24
Tabela 2 - Comparação entre substâncias explosivas, mais comuns para escavação de maciços rochosos	35
Tabela 3 - Valores da razão entre espaçamento (S) e afastamento (B) para diferentes características do maciço rochoso.....	37
Tabela 4 - Critérios de seleção de explosivos.....	39
Tabela 5 - Características da SE HEF – 100	60
Tabela 6 - Características da SE Riogel Kupula	60
Tabela 7 - Índice adiabático dos produtos da explosão.....	62
Tabela 8 - Parâmetros das ondas de detonação e choque refractadas no maciço rochoso com cargas compactas	64
Tabela 9 - Parâmetros das Perfurações.....	69
Tabela 10 - Pega de fogo utilizada para o Bloco 33-21.....	74
Tabela 11 - Pega de fogo utilizada para o Bloco 32.....	74
Tabela 12 - Resultados da percentagem de pedaços de rochas sobredimensionados.....	80
Tabela 13 - Efeitos da onda aérea sobre estruturas	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da sollicitação, devida a ondas sísmicas, sobre um meio sólido.....	30
Figura 2 - Sequência temporal de eventos, verificados numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma superfície livre	31
Figura 3 - Esquema de carregamento de um furo.....	36
Figura 4 – Sequências de iniciação em desmontes de duas faces livres e fiadas múltiplas	38
Figura 5 - Parâmetros do plano de fogo.....	41
Figura 6 - Operação de taqueio	42
Figura 7 - Escavadeira equipada com um rompedor hidráulico	42
Figura 8 - Accionistas da Sociedade Mineira de Catoca	44
Figura 9 - Localização geográfica de Catoca	45
Figura 10 - Área de savana arborizada.....	47
Figura 11 - Barragem do rio Chicapa e quedas do rio Chicapa.....	48
Figura 12 - Contacto Gnaisse–Minério na zona oeste do kimberlito de Catoca.....	52
Figura 13 - Deslocamento de material: gases em expansão e blocos acelerados	61
Figura 14 - Perfuratrizes utilizadas na Mina de Catoca	65
Figura 15 – Unidade móvel de Emulsão da Mina de Catoca.....	66
Figura 16 - Acessórios de detonação da Mina de Catoca	66
Figura 17 - Carregamento dos furos com emulsão HEF – 100 na Mina de Catoca.....	67
Figura 18 - Blocos indesejados produzidos pelo desmonte de rocha na SMC	68
Figura 19 - Pedaco de rocha sobredimensionado.....	73
Figura 20 – Localização da detonação do bloco 33-21	75
Figura 21 - Sequência de detonação do Bloco 33 - 21.....	76
Figura 22 – Localização da detonação do Bloco 32.....	77
Figura 23 - Sequência de detonação do Bloco 32.....	78
Figura 24 - Resultado da fragmentação do Bloco 33-21	79
Figura 25 - Remoção dos escombros após detonação no Bloco 33-21	79
Figura 26 - Resultado da fragmentação do Bloco 32	80
Figura 27 - Remoção dos escombros no Bloco 32.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SMC – Sociedade Mineira de Catoca

Lda - Limitada

dB – Decibéis

kPa – Kilo Pascal

μ_m – Micrómetro

ms – Milisegundos

P_f – Profundidade do furo

L_S – Longitude de subfuração

mL – Metros lineal

$Qt_{emulsão}$ – Quantidade total de emulsão

L_t – Longitude do tampão

un – unidades

H – Altura da bancada

Vl^m – Velocidade das ondas longitudinais no maciço

EGP – Estudos Geofísicos nos Poços

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	X
INTRODUÇÃO	13
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
1.1 Antecedentes da Temática em Angola	18
1.2 Caracterização do Maciço Rochoso.....	21
1.2.1 Propriedades Físico-Mecânicas das Rochas	21
1.2.2 Propriedades Mássicas.....	21
1.2.3 Propriedades de Resistência	22
1.3 Perfuração de Rocha.....	24
1.3.1 Rectilidade do Furo.....	25
1.3.2 Tipos de Perfuratrizes.....	25
1.3.3 Dimensionamento e Selecção das Perfuratrizes.....	26
1.4 Explosivos	26
1.4.2 Principais substâncias explosivas de uso industrial	32
1.4.3 Carregamento dos furos com explosivos	35
1.4.4 Sistemas e Sequências de iniciação.....	36
1.4.5 Selecção do Explosivo.....	38
1.4.6 Armazenamento e Manuseio dos Explosivos.....	39
1.5 Plano de Fogo	40
1.5.1 Escolha do Plano de Fogo.....	40
1.5.2 Principais Parâmetros de um Plano de Fogo	40
1.6 Desmonte Secundário	41
2 METODOLOGIA	43
3 ESTUDO DE CASO	44
3.1 Apresentação da Empresa	44
3.2 Características Gerais da Região do Jazigo	45
3.2.1 Localização Geográfica	45
3.2.2 O Relevo.....	45
3.2.3 Condições Climáticas e Solo	46
3.2.4 Fauna e Flora	46
3.2.5 Hidrografia.....	48

3.2.6	Vias de Acesso.....	48
3.2.7	Economia da Região.....	49
3.3	Geologia da Região do Jazigo.....	49
3.3.1	Características Geológicas do Jazigo.....	49
3.3.2	Rochas Encaixantes.....	51
3.3.3	Tectónica.....	52
3.3.4	Rochas Sobrejacentes.....	53
3.3.5	Morfologia Interna do Corpo Mineralizado.....	56
3.3.6	Características Hidrogeológicas do Jazigo.....	56
4	INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO ESTADO TENSIONAL DO MACIÇO AO EXPLODIR CARGAS COMPACTAS NO KIMBERLITO DE CATOCA.....	59
4.1	Características das Substâncias Explosivas a Investigar.....	59
4.2	Acção da Explosão no Maciço Rochoso.....	60
4.3	Pressão Máxima na Frente das Ondas Refractadas na Parede do Furo... 61	
4.3.1	Parâmetros das ondas de choque para cargas compactas.....	61
5	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS EXPLOSÕES.....	65
5.1.1	Operação de Perfuração de Rocha.....	65
5.1.2	Característica dos Furos.....	65
5.1.3	Carregamento dos Furos.....	65
5.1.4	Acessórios de Detonação a Utilizar na Mina de Catoca.....	67
5.1.5	Operação de Desmonte.....	68
5.2	Simulação de Cálculos para Determinação dos Parâmetros das Explosões 69	
5.2.1	Resumo das pegas de fogo utilizadas na Mina de Catoca e seus resultados 73	
5.2.2	Pegas de Fogo Utilizados Durante os Trabalhos Experimentais.....	74
5.2.3	Resultados das granulometrias obtidas nas detonações experimentais ... 78	
6	IMPACTE AMBIENTAL PROVOCADO PELAS DETONAÇÕES NA MINA DE CATOCA.....	81
6.1	Principais Impactes Causados pelas Detonações.....	81
6.1.1	Projecção dos Fragmentos.....	81
6.1.2	Produção de Poeiras.....	82
6.1.3	Disseminação das Vibrações.....	83
6.2	Medidas de Prevenção.....	84
	CONCLUSÕES.....	85
	RECOMENDAÇÕES.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
	ANEXOS	

INTRODUÇÃO

Determinada a jazida, é chegada a hora de determinar a forma de extracção do minério. Desse modo, é necessário determinar qual o método de desmonte que proporcionará o melhor resultado, ou seja, maior fragmentação ou o menor dano. Isto posto, o objectivo dessa técnica é liberar a rocha para a sua posterior escavação e/ou transporte.

Deve-se aprimorar a perfuração e desmonte de maneira que proporcione uma pilha adequada, para que os equipamentos de carregamento e transporte trabalhem de forma eficiente, bem como obter uma granulometria e forma que atendam as especificações da central de tratamento maximizando a produção. Nas indústrias mineiras, uma das principais operações é o desmonte de rocha com o emprego de explosivos. O resultado desta operação influencia directamente em todas as operações subsequentes, tais como carregamento, transporte do material e britagem primária, podendo o somatório dos custos das operações individuais ser mais elevado do que o desejado por influência de uma fragmentação indesejada.

No presente trabalho pretende-se propor melhorias no modo de execução do plano de fogo para otimizar as operações de carregamento, transporte e britagem primária. O estudo foi realizado na Sociedade Mineira de Catoca, Lda indústria cuja principal actividade é a extracção de diamantes, localizada na Província Angolana da Lunda Sul, a 35 quilómetros da cidade de Saurimo. Na qual verificou-se que as operações de carregamento e transporte, tornam-se mais difíceis quanto maiores forem os blocos produzidos pelo desmonte, influenciando assim, negativamente o factor de enchimento das caçambas dos equipamentos, e incrementando o total de número de ciclo.

A presença de granulometria grosseira gerada pelo desmonte primário, para além dos problemas citados, estes fragmentos causam desgastes nos diversos componentes do equipamento de carregamento e transporte, por estes serem forçados a operar em condições adversas, e também obrigando a um maior consumo de combustível. O encravamento de rocha no britador primário que causa a paragem de produção também é um dos problemas frequentes gerados

devido a presença de blocos com dimensão maior em relação a abertura aceitável do britador.

O planeamento de um desmonte de rochas com explosivos envolverá a definição de como as cargas serão alocadas, os tempos de detonação, bem como a definição dos tipos de acessórios a serem utilizados.

Um plano de fogo eficiente é aquele que maximiza a utilização da energia do explosivo, transferindo-a para a fragmentação adequada da rocha. No entanto, esse tipo de desmonte produz efeitos indesejáveis como vibrações de terreno, poeira e gases, além de ultralançamentos. Logo, um projecto tecnicamente correcto também deve minimizar a probabilidade de ocorrência desses eventos, razão pela qual foram abordados os impactos ambientais provocados pelas detonações na Sociedade Mineira de Catoca, bem como as devidas medidas de precaução.

O planeamento do plano de fogo, é um dos factores que influenciam o resultado de um bom desmonte, já que este é o projecto que contém as informações e descrições acerca do desmonte de rocha 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 jazigo de Catoca, nomeadamente a localização geográfica, relevo, fauna, flora, hidrografia, vias de acesso, economia da região e mineração. 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 Catoca – teve como foco o estudo das características das substâncias explosivas utilizadas em Catoca, a acção da explosão no maciço rochoso e a pressão máxima na frente das ondas refractadas na parede do furo.

Capítulo V – Apresentação e Determinação dos Parâmetros das Explosões – apresentou - se a empresa, e fez - se a simulação de cálculos dos parâmetros das explosões.

Capítulo VI – Impacte Ambiental provocado pelas Detonações na Mina de Catoca – foram apresentados os efeitos das detonações no meio envolvente, bem como as medidas de mitigação.

Problema

Necessidade de diminuir a percentagem de rochas sobredimensionadas durante o processo de desmonte de rochas com explosivos no Kimberlito de Catoca.

Hipóteses

Se for projectado uma pega de fogo, em que se considerem as propriedades físico-mecânicas das rochas, as propriedades das substâncias explosivas e a acção da explosão no maciço rochoso, é possível obter a granulometria requerida das rochas.

Justificativa

Reduzir o volume de material que necessita de desmonte secundário incorre em ganhos financeiros e de segurança para o processo de mineração.

Os ganhos financeiros são oriundos da redução do tempo da parada da britagem primária devido ao travamento por blocos, redução dos custos de perfuração e de desmonte dos matacões.

Os ganhos de segurança são atribuídos à redução do número de eventos de detonação, actividade que sempre apresenta riscos, além do facto de que a realização de desmontes secundários ser considerada mais perigosa do que de desmontes primários, visto que o fenómeno de formação de estilhaços é

preponderante. Daí surgir a necessidade de se reduzir a percentagem de blocos de rocha de grande granulometria, diminuindo assim os eventos de fragmentação secundária.

Objectivos do Trabalho

Objecto de Estudo

Maciço rochoso da Mina de Catoca.

Objetivo Geral

Elaborar uma pega de fogo que tenha em conta as propriedades físico-mecânicas das rochas, as propriedades das substâncias explosivas e a acção da explosão no maciço rochoso para evitar a percentagem de rochas sobredimensionadas na Mina de Catoca.

Objectivos Específicos

- Determinar as propriedades físico-mecânicas do maciço rochoso de Catoca;
- Pesquisar as características das substâncias explosivas utilizadas no kimberlito de Catoca;
- Determinar analiticamente a acção da explosão das distintas substâncias explosivas utilizadas no kimberlito de Catoca;
- Desenhar as redes de perfuração a serem utilizadas durante a investigação com as diferentes substâncias explosivas disponíveis e comprovar experimentalmente.

Delimitação do Estudo

Este projecto de pesquisa delimitou-se em fazer o estudo da perfuração e desmonte de rochas com explosivos, tendo como referência o kimberlito de Catoca.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Antecedentes da Temática em Angola

O tema das detonações em minas, pedreiras e obras de construção civil em Angola não tem recebido muita divulgação (Filipe, 2022).

As características delineadas nesta investigação baseiam-se nos dados disponíveis no Ministério da Geologia e Minas de Angola (Serviço Geológico de Angola), na generalização e síntese de vários relatórios, publicações e na revisão de fichas técnicas presentes na mina de Catoca.

É verdade que para obter parâmetros fundamentais de obras de perfuração e desmonte do ponto de vista da engenharia, é necessário conhecer as características das rochas, como resistência, fissuração, densidade e alguns fatores tecnológicos (dimensão dos blocos dentro da massa rochosa, etc.).

A definição dos trabalhos de exploração que requerem perfuração e desmonte é realizada quando a fortaleza (f) for superior a 4 de acordo com a escala de Protodiatonov.

Como os aspectos relacionados à distribuição espacial de rochas de diferentes resistências não eram conhecidos em detalhes, e com base nos materiais geológicos disponíveis e na experiência acumulada nos trabalhos de exploração em outras minas na Rússia que ainda estão em operação, se fez uma divisão prévia das rochas de acordo com às características de resistência.

Para isso, a resistência a ser superada em uma bancada para um grupo de cargas é determinada com a ajuda da fórmula de (Kutuzov 1988, 2000):

$$W = W_{ma} + \sqrt{P_n} * d * (1,2 - m), m$$

Onde:

W_{ma} – Resistência máxima a ser superada em um único furo, m.

ρ_n – Densidade das rochas. No caso do depósito kimberlítico de Catoca, aceita-se o valor médio equivalente a $2,8 \text{ g/cm}^3$.

d – Diâmetro dos furos (203 mm para furos de produção e 160 mm para furos pré-corte).

$m = \frac{a}{W}$ – Distância relativa entre cargas na linha. É aceite dentro dos limites (0,8-1,4) dependendo da explosividade da rocha, do carácter da rachadura, da sequência da explosão da carga e do grau exigido de trituração.

- A linha de menor resistência é determinada pela expressão:

$$W = 53K_t * d * \frac{\sqrt{\Delta e}}{\rho_n}, m$$

Onde:

K_t – Coeficiente de fissuração (1 a 1,2).

Δ – Densidade da substância explosiva (0,85 - 0,9 g/cm³).

e – Coeficiente de capacidade de trabalho da substância explosiva em relação à amonite 6B, para amonite é igual a 1.

Durante a exploração do depósito, o valor calculado do consumo específico de meios de explosão (k_p) de acordo com o material de referência ou estabelecido com base na experiência de realização de trabalhos de perfuração e desmonte em condições geotécnicas análogas.

Portanto, para rochas de resistência relativamente baixa $k_p = 0,5 \text{ kg/m}^3$.

Na explosão de uma série de cargas de perfuração colocadas em paralelo, equidistantes da superfície aflorada, a distância entre elas (a) é calculada pela fórmula:

$$a = m * W, m$$

Onde: $m = 0,8 - 1,4$

Em caso de explosão de filas múltiplas, a distância entre filas é calculada por meio da seguinte fórmula:

$$b = (0,8 - 1,1) a, m$$

- O comprimento (ou longitude) dos furos é definido pela expressão:

$$L = H + L_s, m$$

Onde:

L_S – Longitude de subfuração, m.

H – Altura da bancada, m.

- A longitude de subfuração constitui aproximadamente:

$$L_S = 0,5 * k_p * W, \text{ m}$$

- A magnitude da carga no furo é calculada pela fórmula:

$$Q = k_p * a * b * H, \text{ kg}$$

- Longitude da carga é calculado com a ajuda da fórmula:

$$L_{ca} = \frac{Q}{p}, \text{ m}$$

Onde:

p – Quantidade de carga de substância explosiva por metro linear do furo, kg/m.

Shejurdin (1985), define a seguinte expressão para determinar (p):

$$p = \pi d^2 * \frac{\rho_{SE}}{4}, \text{ kg /m}$$

Onde:

ρ_{SE} – Densidade da substância explosiva, para amonite é igual a 0,85 g/m³.

- Longitude do preenchimento é determinado dentro do limite:

$$L_r = (0,6 - 0,8) * W, \text{ m}$$

Os cálculos são efectuados de acordo com o método acima referido, tendo em conta os dados disponíveis na mina de Catoca.

O consumo específico de substância explosiva é aceite levando em consideração o aumento da resistência e da densidade da rocha à medida que a profundidade da mina aumenta.

Todos os parâmetros dos trabalhos de perfuração e explosão podem ser alterados quando os resultados experimentais forem obtidos.

Como se pode verificar na mina de Catoca, continuou a utilizar a metodologia de cálculo, que não considera a estrutura do maciço rochoso em toda a sua complexidade, nem a ação da explosão sobre o maciço.

1.2 Caracterização do Maciço Rochoso

1.2.1 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.

1.2.2 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:

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

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

1.2.3 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 solicitação 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 Catoca 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

1.3 Perfuração de Rocha

De acordo com Silva (2009), a perfuração da rocha é a primeira das operações a realizar no campo mineiro. O objectivo consiste em abrir espaços, neste caso furos, com distribuição espacial adequada ao maciço, onde posteriormente se irá alojar o explosivo e os acessórios que facultariam a detonação e a consequente fragmentação de rocha.

1.3.1 Rectilindade do Furo

Para Silva (2009), a rectilindade varia dependendo do tipo e natureza da rocha, do diâmetro e da profundidade do furo, do método e das condições do equipamento utilizado e da experiência do operador. Ao perfurar furos profundos para detonação, o furo deve ser tão recto quanto possível para que os explosivos sejam distribuídos correctamente, para se obter o resultado desejado.

1.3.2 Tipos de Perfuratrizes

Segundo Geraldi (2011), os equipamentos de perfuração são classificados em 4 grandes grupos, de acordo com os princípios mecânicos utilizados para perfuração:

1.3.2.1 Percussivas

A perfuratriz percussiva reproduz um giro na broca, imediatamente após cada golpe. Esse giro, sempre de um pequeno arco de círculo, é, portanto, descontínuo. Assim, ocorre a perfuração manual, caracterizada por dois movimentos distintos e independentes: golpeamento da broca, seguido de rotação da broca.

1.3.2.2 Rotativas

O equipamento é montado sobre uma plataforma, permitindo uma maior facilidade de locomoção e não há percussões, pois, a perfuratriz transmite à broca somente movimento de rotação, podendo demolir a rocha por corte, abrasão e esmagamento (RICARDO E CATALANI, 2007).

1.3.2.3 Percussivo-rotativas

Ao contrário da perfuratriz percussiva que apresenta porte menor e tem rotação da broca descontínua, as perfuratrizes percussivo-rotativas possuem percussões sobre a broca, além da rotação contínua. Geralmente utilizada para perfuração de diâmetro maior (38 mm a 89 mm), podendo chegar a 125 mm. O movimento da rotação pode ser produzido por motor de pistões, colocado no cabeçote do equipamento ou por motor independente (RICARDO e CATALANI, 2007).

1.3.2.4 Furo-abaixo (DTH)

Ao se atingir profundidades razoavelmente grandes para o avanço do furo, o esforço percussivo produzido na superfície é transmitido por meio das hastes até a extremidade do furo, acarretando uma dissipação de energia prejudicando o avanço da perfuração. A perfuratriz furo-abaixo evita essa dissipação de energia, uma vez que o mecanismo de percussão está na extremidade da broca, junto à coroa, parte mais extrema da broca e que efectivamente trabalha contra a rocha. Geralmente é aplicada em pedreiras de bancadas altas, acima de 20 m e possui um diâmetro de 75 mm a 225 mm (RICARDO e CATALANI, 2007).

1.3.3 Dimensionamento e Selecção das Perfuratrizes

Para seleccionar e dimensionar as perfuratrizes deve-se seguir alguns parâmetros, como a velocidade de perfuração dos equipamentos, a litologia dos maciços rochosos, o tipo de rocha a perfurar e as condições estruturais dos maciços rochosos (SANDIN, 2015).

Segundo Geraldi (2011), para seleccionar e dimensionar as perfuratrizes deve-se atender critérios tais como o mecanismo da perfuratriz, o tipo de broca que vai ser empregado, altura máxima da perfuratriz, o diâmetro de perfuração, o tamanho da coluna principal, a profundidade dos furos e o peso necessário para a perfuração.

Existem variados factores que determinam a escolha de uma perfuratriz, como dito pelos autores Sandin (2015) e Geraldi (2011), porém essa escolha deve ser feita de uma maneira cautelosa para que possa atender as necessidades desejadas.

1.4 Explosivos

Segundo Ricardo e Catalani (2007), os explosivos são substâncias ou misturas, em qualquer estado físico, que quando submetidos a uma causa térmica ou mecânica, suficientemente enérgica (calor, atrito, impacto etc.,) se transformam, total ou parcialmente, em gases, em um intervalo de tempo muito curto, despreendendo considerável quantidade de calor.

A taxa de reação depende do tipo de explosivo. Quando a liberação é rápida (a velocidade de detonação é mais rápida que a velocidade do som na substância) a detonação ocorre. Quando a velocidade de reação é menor que a velocidade do som na substância, a reação é denominada deflagração. As detonações são caracterizadas por altas taxas de reação (1.000 a 10.000 m/s) e altas pressões, de 200 GPa ou 200.000 atm (Crosby, 1998).

1.4.1.1 Acessórios de Detonação

Acessórios de detonação, são dispositivos empregados para iniciar cargas explosivas, fornecer e transmitir energia para a iniciação dessas cargas (ASSAKKAF, 2003). Sendo estes utilizados na escavação a céu aberto: espoletas simples; espoletas elétricas; cordel detonante; acendedores; reforçadores (“boosters”); escorvas; sistema não elétrico.

1.4.1.2 Energia dos Explosivos

A energia liberada pelos explosivos após a detonação encontra-se, inicialmente, armazenada como energia química. A utilização desta energia é controlada pelas leis de conservação de energia e massa. No processo de detonação nem toda energia dos explosivos é disponibilizada para a realização de trabalho útil (Hustrulid, 1999). Em desmonte de rochas, a energia dos explosivos é utilizada em:

- Criação de novas fracturas;
- Extensão de fracturas existentes;
- Deslocamento da massa rochosa e movimento do centro de gravidade;
- Efeitos indesejáveis como ultralancamento, vibração do solo, sobrepressão atmosférica, ruído e calor.

A divisão da energia nestas diferentes categorias depende:

- Do explosivo;
- Das propriedades do maciço rochoso;
- Da geometria do desmonte.

A energia dos explosivos, segundo Scott et. al. (1996), é expressa em termos de massa ou volume e é definida como se segue:

- Energia absoluta por massa (“Absolute Weight Strenght”, AWS): é a medida da quantia absoluta de energia disponível em cada unidade de massa do explosivo. Geralmente, é expressa em cal/g. Ex.: AWS do ANFO = 900 cal/g (energia termoquímica).
- Energia absoluta por volume (“Absolute Bulk Strenght”, ABS): é a quantia absoluta de energia disponível por unidade de volume de explosivo. É geralmente expressa em cal/Cm³. Pode ser calculada pela multiplicação da AWS pela densidade do explosivo. Ex.: ABS do ANFO (d= 0,85 g/Cm³) = 900 x 0,85 = 765 cal/Cm³.
- Energia relativa por massa (“Relative Weight Strenght”, RWS): é a medida da energia disponível por unidade de massa de um explosivo, comparada a um explosivo padrão. Para aplicações comerciais, o explosivo padrão é normalmente o ANFO (d = 0,85 g/Cm³), enquanto que para os explosivos militares, é o tri- nitrotolueno (TNT). A RWS é calculada pela divisão do AWS do explosivo pela AWS do explosivo padrão, multiplicando o resultado por 100.

$$RWS = (AWS \text{ do explosivo} / AWS \text{ do ANFO}) \times 100$$

- Energia relativa por volume (“Relative Bulk Strenght”, RBS): é definida como a energia contida em uma unidade de volume de explosivo, comparada a um igual volume de um explosivo padrão (ANFO ou TNT). A RBS pode ser calculada pela razão entre a RWS do explosivo e do ANFO multiplicada pela corresponde razão das densidades.

$$RBS = (RWS \text{ do explosivo}) \times (d \text{ explosivo} / d \text{ explosivo padrão})$$

É conveniente usar o desempenho do ANFO como base de comparação com outros explosivos por ser amplamente usado, simples de fazer e com um desempenho consistente (Scott et. al., 1996).

1.4.1.3 Elementos de dinâmica das rochas

A dinâmica das rochas é o ramo da mecânica das rochas dedicado ao estudo das respostas dos materiais rochosos quando submetidos a esforços dinâmicos

(Bernardo, 2004). A aplicação de cargas explosivas na escavação de maciços rochosos é um dos domínios de estudo da dinâmica das rochas.

Os materiais rochosos apresentam variações no seu comportamento mecânico e, conseqüentemente, nas suas propriedades resistentes e de deformabilidade, em função do tempo em que decorre a sollicitação exterior e a velocidade de aplicação da carga. Importa, pois, compreender o comportamento do maciço rochoso quando sollicitado pela acção das cargas explosivas.

1.4.1.4 Propagação de ondas em maciços rochosos

A detonação de cargas explosivas num maciço rochoso, induz a propagação de ondas de tensão e choque. As ondas de tensão estão relacionadas com a natureza elástica dos materiais rochosos (que retornam à posição original após passagem da perturbação). As ondas de choque propagam-se a velocidades extremamente elevadas, causando a rotura do material, este comportamento é contrariado por fenómenos dissipativos (Bernardo, 2004).

Grande parte das cargas explosivas aplicadas na escavação de material rochoso apresentam elevada velocidade de detonação, portanto a compreensão do comportamento das ondas de choque em maciços rochosos assume especial importância na análise de detonações. Nos maciços rochosos o comportamento elástico é válido apenas para pequenos valores do estado de tensão, dado que estes são caracterizados por possuírem anisotropias, heterogeneidades e descontinuidades.

Existem dois tipos de ondas sísmicas (ou de tensão):

- Volumétricas (ondas longitudinais, P e transversais, S);
- Superfície (ondas Love, L e Rayleigh, R).

As ondas volumétricas propagam-se através do maciço, radialmente desde a fonte de vibração. As ondas de superfície dependem de interfaces, entre meios distintos, para se propagarem (Bernardo, 2004). Na figura 1 encontra-se descrito o comportamento de um meio sólido, perante a sollicitação provocada pelos distintos tipos de ondas sísmicas.

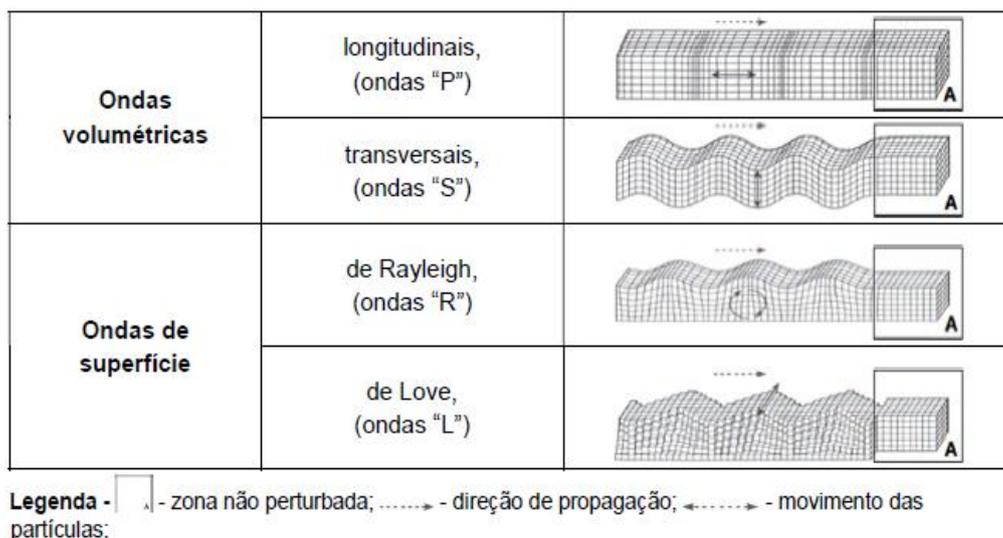


Figura 1 - Efeito da solitação, devida a ondas sísmicas, sobre um meio sólido (adaptado de Smolczyk, 2002 em Bernardo, 2004)

Considera-se (Dinis da Gama, 2007), que o fenómeno de atenuação das ondas sísmicas pode ser explicado por diversos mecanismos intrínsecos ou pelo atrito sólido nas descontinuidades. Estes mecanismos impõem uma diminuição da tensão associada à amplitude das ondas emitidas, independente da atenuação devida ao aumento da distância de propagação da onda.

As normalizações vigentes em diversos países, inerentes às vibrações, são concordantes em admitir que os danos estruturais se correlacionam com a amplitude das ondas sísmicas presentes e que, de entre as grandezas físicas que a caracterizam, são as velocidades vibratórias que melhor se ajustam à referida correlação (Dinis da Gama, 1998).

As vibrações propagam-se no maciço rochoso sob a forma de ondas, transportando tensões dinâmicas:

$$\sigma_d = \rho \cdot c \cdot v$$

Onde, σ_d representa a tensão dinâmica, ρc a impedância característica do meio (produto da sua massa volúmica (ρ) pela velocidade de propagação ondulatória (c) característica desse meio) e v a velocidade vibratória das partículas no meio. A impedância característica de um meio mostra a resistência que este oferece à propagação da onda.

1.4.1.5 Rotura de maciços rochosos por ação de cargas explosivas

Segundo Dinis da Gama (2003), a detonação de uma carga explosiva no interior de um furo aberto num maciço rochoso, origina a fracturação e consequente rotura da rocha, processo ao qual estão associadas duas fases distintas: uma fase dinâmica e uma fase quase-estática.

O desempenho dos explosivos na escavação de maciços rochosos, deve-se à ação conjunta de ambas as fases, causando localmente tensões superiores à resistência dinâmica da rocha (Kristiansen et al., 1990 em Bernardo, 2004). Na fase inicial (dinâmica) o maciço é sujeito a uma perturbação violenta, num curto intervalo de tempo, causada pela onda de choque. A velocidade de propagação da onda de choque, depende da densidade da rocha e do tipo de explosivo e ocorre radialmente a partir do furo, sofrendo atenuação com a distância, dando lugar a um regime de propagação de uma onda de tensão compressiva, do tipo sónico. Posteriormente, verifica-se a fase quase-estática, caracterizada pela expansão dos gases, resultantes da detonação da carga explosiva.

Na figura 2 encontra-se esquematizada a sequência temporal das fases da detonação em rocha, na vizinhança de uma face livre. São observáveis eventos distintos (instantes t_1 à t_5) decorrentes da atuação da onda de choque e da expansão de gases.

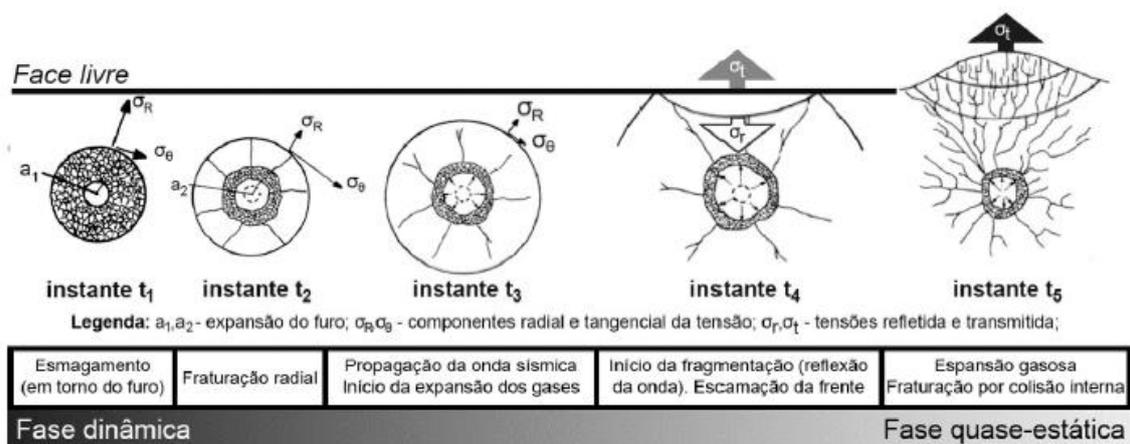


Figura 2 - Sequência temporal de eventos, verificados numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma superfície livre (adaptado de Aimone, 1992 em Bernardo, 2004)

No decorrer do instante t_1 , verifica-se o esmagamento da rocha na envolvente do furo. Este evento deve-se à componente radial da onda, que transporta uma tensão compressiva (σ_R) que excede, consideravelmente, a resistência da rocha. O aumento da distância ao furo provoca a atenuação da tensão compressiva (σ_R), para valores inferiores à resistência da rocha, a fraturação radial (verificada em t_2), deve-se à componente tangencial (σ_θ) da onda.

Durante o instante t_3 , a onda de choque continua a propagar-se, verificando-se paralelamente o início da expansão de gases, o que não seria espectável, dado tratar-se de um evento da fase quase-estática. A ocorrência deste evento, no instante t_3 , deve-se à indefinição na transição de fase (entre as fases dinâmica e quase-estática).

No final da fase dinâmica (instante t_4) ocorre a reflexão da onda na interface rocha-ar. A onda incidente, compressiva, ao contactar com a face livre da rocha, sofre reflexões e refrações.

Segundo Kolsky (1963, em Bernardo 2004), o impulso de compressão é refletido sob a forma de impulso de tração que, ao propagar-se para o interior da rocha, pode ocasionar roturas por tração, em virtude de a rocha atingir a rotura mais facilmente sob esta solicitação do que em regime de compressão.

Por fim (instante t_5), verifica-se internamente a expansão gasosa e a fraturação, devida a colisões entre material. Verifica-se ainda a continuidade da propagação da onda aérea (devido à refração da onda de choque, que se iniciou no instante anterior), este último evento está associado à fase dinâmica.

Segundo Bernardo (2004), devido à existência de sobreposição de fases considera-se que se deve pensar em termos de efeitos (dinâmicos e quase-estáticos), em lugar de fases, que sugerem uma separação temporal, difícil de estabelecer.

1.4.2 Principais substâncias explosivas de uso industrial

As substâncias explosivas podem ser divididas, considerando a forma como se decompõem, em dois tipos: deflagrantes e detonantes. Segundo Bernardo

(2014), os explosivos deflagrantes caracterizam-se pela detonação decorrer por meio da combustão dos seus constituintes, este processo decorre a uma velocidade inferior à velocidade de propagação da onda de choque. Na reação produzem-se essencialmente calor e gases, mas não onda de choque.

Os explosivos detonantes decompõem-se a velocidades bastante superior (2000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 7000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, consoante a sua composição), sendo que nesta reacção produz-se um grande volume de gases, a temperatura e pressão elevadas.

Actualmente, os explosivos do tipo detonante são os mais aplicados na indústria mineira. Contrariamente, a utilização de explosivos do tipo deflagrante está reduzida a algumas aplicações na exploração de rocha ornamental.

1.4.2.1 Principais propriedades das substâncias explosivas

Consideram-se (Bernardo, 2004) as propriedades mais importantes das substâncias explosivas, a energia específica, a velocidade de detonação, a pressão de detonação, a sensibilidade ao detonador, a resistência à presença de água e a densidade.

A **energia** total libertada por um explosivo quando detonado, pode ser repartida em duas componentes: energia da onda de choque ($E_{detonação}$, efeito dinâmico) e energia dos gases em expansão ($V_{gás}$, efeito quase-estático).

A **velocidade de detonação** de um explosivo, corresponde à velocidade de propagação da detonação ao longo da coluna de explosivo, no interior do furo, definindo o ritmo de libertação de energia. A velocidade de detonação depende do diâmetro da carga, da densidade de carregamento, do grau de confinamento, da temperatura e, para alguns explosivos (como o ANFO), do tipo de iniciação.

A **pressão de detonação** é definida como a pressão máxima teórica que existe na zona de reação (Bernardo, 2004), é proporcional à densidade do explosivo e ao quadrado da velocidade de detonação.

A **sensibilidade de um explosivo** pode explicar-se como a propensão deste a ser iniciado. Pode ser vista como a sensibilidade do explosivo perante detonações acidentais ou a facilidade em detonar-se intencionalmente. Devido

à necessidade de transporte, armazenamento e manuseamento, é essencial conhecer a sensibilidade do explosivo, de modo a garantir a segurança de todos os que de perto contactam com substâncias explosivas (Bernardo, 2014).

A **resistência de um explosivo** à presença de água está relacionada com a capacidade de este manter as suas características (potência ou capacidade de detonação) por períodos prolongados de tempo, sendo que esta varia com a composição do explosivo.

Segundo Jimeno et al. (2003), a presença de água na zona de aplicação do explosivo inviabiliza a utilização de explosivos de densidade inferior a 1, devido à flutuação do explosivo.

A **densidade do explosivo** corresponde ao quociente entre a massa de um dado volume relativamente à água, geralmente a densidade dos explosivos industriais varia de 0,7 a 1,4. A densidade dos explosivos tem um papel fundamental no seu desempenho, uma vez que, faz variar a sua impedância e pressão de detonação.

1.4.2.2 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 2 - Comparação entre substâncias explosivas, mais comuns para escavação de maciços rochosos (Bernardo, 2014)

Substâncias explosivas	Pólvoras	Gelatinoso	Granulado	Emulsões
Composição base	Nitrato de potássio, Enxofre e Carbono	Nitroglicol ou Nitroglicerina	Nitrato de amônio e Gasóleo (ANFO)	Soluções aquosa de nit. de amônio, 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	✓	✓	✓
	Encartuchado	✓	✓	✓
Observações	Rocha Ornamental	Mais Caros	Mais Baratos	Mais Recentes

1.4.3 Carregamento dos furos com explosivos

Segundo Correia (2011), o carregamento dos furos é o processo de introdução do explosivo dentro dos furos, esse processo de carregamento deve ser cuidadosamente executado, realizando primeiramente a limpeza dos furos, eliminando os detritos de perfuração e a água.

Segundo Ricardo e Catalani (2007), após a introdução do explosivo no furo, ocorre o adensamento através de soque. 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 socados ou forçados e não devem ser introduzidos em primeiro lugar, tendo, pelo menos, existir um cartucho como amortecedor.

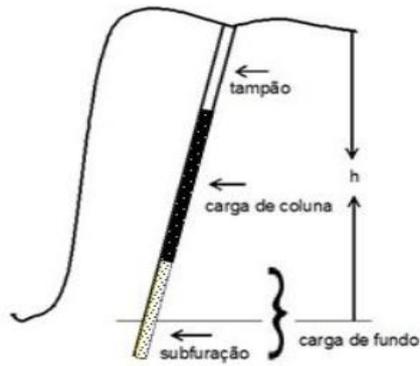


Figura 3 - Esquema de carregamento de um furo (LIMA, 2013)

1.4.4 Sistemas e Sequências de iniciação

A iniciação das cargas explosivas é feita por meio de sistemas de iniciação, onde se incluem os detonadores. Estes dispositivos permitem o correto acionamento, modo e instante de disparo, das cargas explosivas. A ordem e instante de iniciação de cada carga influencia de forma determinante a fragmentação e deslocamento do material, bem como, as condições do maciço remanescente.

1.4.4.1 Sistemas de Iniciação

Detonadores elétricos, os tipos detonadores elétricos são: instantâneo, de retardo longo ou de retardo curto. Compostos por um tubo de alumínio e uma de suas extremidades inacessível, ambos tipos possuem três partes distintas: a parte elétrica, a parte retardadora (ausente no tipo instantâneo) e a parte explosiva. Os detonadores elétricos são iniciados quando uma pequena quantidade de corrente é introduzida através dos fios condutores de polietileno, que correspondem pela parte elétrica, para dentro do involucro do detonador.

Detonadores não elétricos (nonel), apresentam maior flexibilidade que os detonadores elétricos pois, para além de permitirem trabalhar com atrasos ao nível dos milissegundos, são mais seguros nas operações de transporte e carregamento dos furos. Contudo, ainda apresentam erros associados ao elemento retardador (pirotécnico). De acordo com Hartman (1992), o detonador não-elétrico é empregado na maioria das detonações através de uma combinação de atrasos no interior do furo e na superfície. Os conectores de superfície são simplesmente ligados em cadeia oferecendo uma gama elevada de possibilidades de atrasos.

Detonadores electrónicos, permitem uma flexibilidade em termos de temporizações, semelhante à dos detonadores não-elétricos. Porém, apresentam a vantagem de mitigar completamente o erro associado ao elemento retardador (que passa a ser controlado por um chip). O sistema só pode ser accionado por um equipamento específico (blast box) que recebe informação de um determinado logger, o que o torna seguro.

1.4.4.2 Sequência de Iniciação

A sequência de disparo dos furos carregados pode modificar o valor dos parâmetros geométricos do desmorte, nomeadamente, o afastamento (B) e o espaçamento (S), passando a apresentar valores denominados efectivos (B_e e S_e). Estes parâmetros influenciam a fragmentação e o deslocamento do material, bem como a sobreescavação do maciço remanescente e a intensidade das vibrações geradas na detonação. Desta forma, importa compreender a alteração destes parâmetros e a forma como podem influenciar os resultados do desmorte.

Para desmontes em bancada a céu aberto, constituídos por uma só fiada e com altura da bancada, consumo específico de explosivo e diâmetro de furo contantes, para todo o desmorte, bem como, disparo dos furos em simultâneo, existe um valor da razão entre o espaçamento (S) e afastamento à face livre (B), para o qual a fragmentação e deslocamento do material são ótimas (Jimeno et al., 2003). A variação das características do maciço leva à alteração do valor óptimo da relação S/B, como descrito na tabela abaixo.

Tabela 3 - Valores da razão entre espaçamento (S) e afastamento (B) para diferentes características do maciço rochoso (adaptado de Jimeno et al., 2003)

Características do maciço		Relação S/B	Observações
Homogéneo	Pouco fraturado	2 – 4*	≈2,4 - valor ótimo S>3B - menor escavação por furo S<2,4B - fragmentação imperfeita;
	Fortemente fraturado	0,8 – 2,4**	Fragmentação adicional causada pelo deslocamento do material
	Descontinuidades paralelas à frente	>2,4	As descontinuidades disponibilizam faces livres adicionais
	Descontinuidades normais à frente	<2,4	Não existem cooperação entre furos

A iniciação dos furos, em momentos distintos, melhora de forma considerável a fragmentação, quando comparado com a iniciação instantânea de todos os furos. Este incremento está relacionado com a criação de faces livres adicionais, devido à fracturação radial, em torno do furo que se desenvolve, quase totalmente, antes da iniciação do furo adjacente (Jimeno et al., 2003).

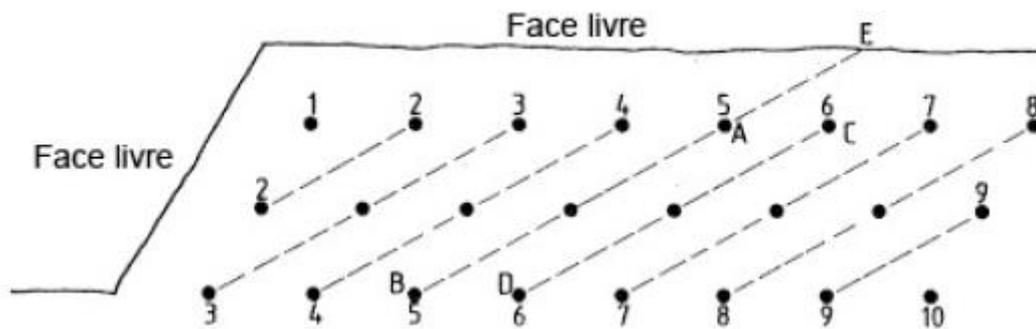


Figura 4 – Sequências de iniciação em desmontes de duas faces livres e fiadas múltiplas (Hagan, 1983)

1.4.5 Seleção do Explosivo

Para a seleção devem ser considerados factores como, características técnicas; limitações impostas pela normalização e factores económicos. A tabela abaixo apresenta uma compilação dos principais critérios a considerar na seleção de explosivos.

Tabela 4 - Critérios de seleção de explosivos (Bernardo, 2004)

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

1.4.6 Armazenamento e Manuseio dos Explosivos

Deve seguir estritamente aos regulamentos e leis ditados pela Polícia Nacional ou por diploma específico que as substitua, o qual deve ser aprovado pelo Titular de Poder Executivo mediante proposta do Ministério do Interior e órgão tutela da geologia e minas (Código Mineiro Angolano, 2011), não podendo o armazenamento, o manuseio e o transporte dos explosivos serem feitos de forma improvisada.

Segundo Ricardo e Catalani (2007), os explosivos e os acessórios de detonação não podem ficar armazenados em um mesmo paiol. Este, deve localizar-se a uma distância mínima das ferrovias, rodovias e de outros paióis, conforme regulamento do Código Mineiro Angolano, artigo 86.º secção V.

Os explosivos devem ficar em local desmatado para evitar que eventuais incêndios possam atingir os paióis e o acesso dos veículos deve ser fácil para permitir a operação de descarga e carga dos explosivos com menores riscos.

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 Escolha do Plano de Fogo

O plano de fogo considerado o mais adequado para um determinado trabalho de desmonte de rocha, dependerá, em primeiro lugar, do equipamento disponível para sua execução. Atendidas as limitações do equipamento, é possível mais de um plano de fogo factível. Opta-se pelo mais económico, desde que seja eficiente, desmontando a rocha em blocos de dimensões compatíveis com a finalidade do desmonte.

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 parâmetros principais que devem constar em um plano de fogo são mostrados na figura abaixo sendo relacionados a seguir e, com esses dados procede-se às perfurações do maciço, ao carregamento do “fogo” e à sua detonação (IRAMINA, 2015).

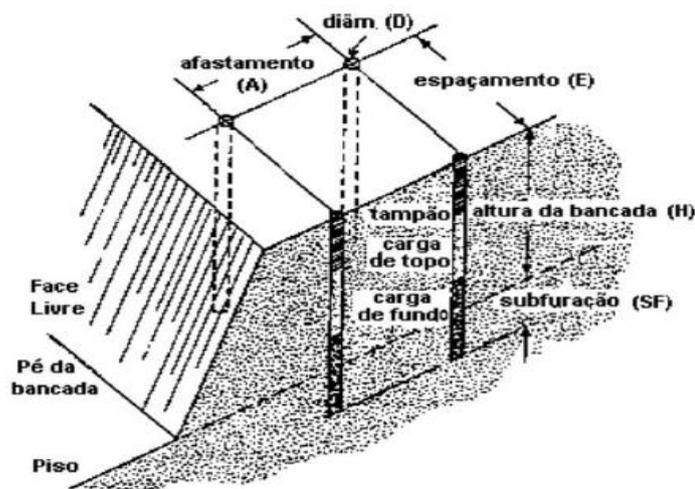


Figura 5 - Parâmetros do plano de fogo (IRAMINA, 2015)

1.6 Desmorte Secundário

Segundo Geraldi (2011), desmorte secundário é uma operação para a redução de grandes blocos de rocha (matacões), gerados num desmorte primário. Esta operação sobrecarrega os custos do desmorte, mas na maioria das vezes é inevitável e deve ser prevista em orçamentos, principalmente quando o material do desmorte é destinado a uma britagem posterior.

Silva (2009), diz que após o desmorte resultarem blocos de rocha de tamanhos inadequados, que não podem seguir directo para a britagem este material deve ser seleccionado, fragmentado na praça por rompedores e/ou com o auxílio de explosivos.

1.6.1.1 Fogacho

Segundo Mendes (2011), o método de fogacho consiste na perfuração dos blocos, em 32 ou 38 mm, e carregamento com explosivo. A detonação da carga de explosivo visa a fragmentação do bloco, o que o tornará adequado às operações subsequentes.

A explosão tem um desempenho mais eficiente quando as perfurações são realizadas na porção central do bloco, além de diminuir o risco de ultralançamentos de rocha. A razão de carregamento geralmente está na faixa de 0,075 a 0,110 Kg/m³

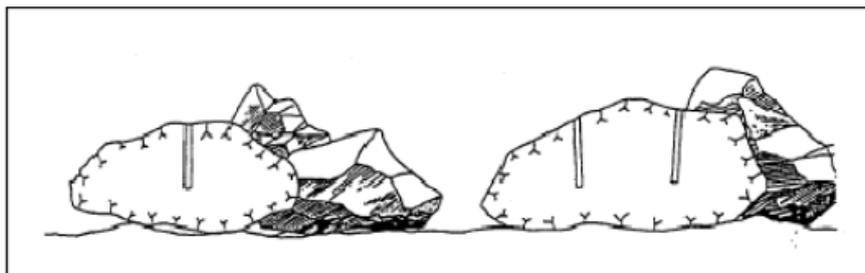


Figura 6 - Operação de taqueio (Mendes, 2011)

1.6.1.2 Rompedor Hidráulico

Um tipo de desmonte que deve ser evitado pelo alto custo de operação, quando comparado ao desmonte de rochas por explosivos, é o desmonte mecânico por rompedor hidráulico. O grande inconveniente dessa operação é o custo do ponteiro do rompedor que sofre excessivo desgaste por vibração, bem como todo o conjunto do braço da escavadeira, e o custo de uma escavadeira para o retrabalho de fragmentação com baixa produção (Oliveira, 2009).



Figura 7 - Escavadeira equipada com um rompedor hidráulico (Site TZ Rental, 2014)

2 METODOLOGIA

Para alcançar os objectivos estabelecidos, a metodologia adoptada incidiu fundamentalmente na revisão da literatura em torno da temática. O trabalho foi realizado em quatro (4) fases distintas a referir:

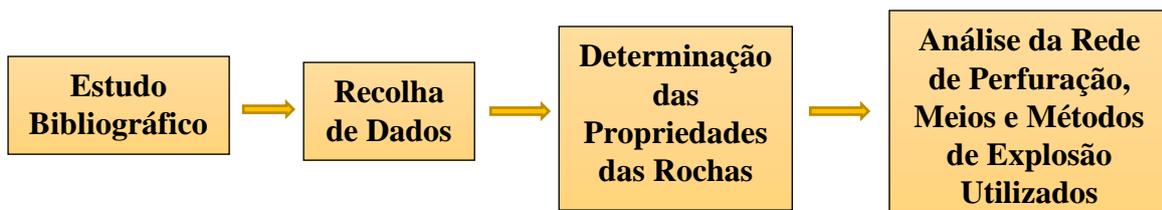
1. Estudo bibliográfico: Revisão de trabalhos relacionados com o tema de investigação;
2. Recolha de dados;
3. Determinação das propriedades físico-mecânicas das rochas;
4. Análise da rede de perfuração, meios e métodos de explosão utilizados.
Comprovação experimental no Kimberlito de Catoca das pegas de fogo propostas.

A primeira fase da consulta Bibliográfica, consistiu no levantamento bibliográfico por meio da literatura e trabalhos que abordam os temas sobre perfuração e desmonte de rochas com explosivos. Nessa fase foram levantadas as principais teorias e pesquisas acerca do tema escolhido para se chegar a uma conclusão dos modos mais eficazes para atingir os objectivos propostos. Esta etapa teve como base artigos técnico-científicos, livros, dissertações, matérias de páginas de internet, etc.

A segunda fase da recolha de dados, baseou-se na obtenção de todas as informações necessárias para o cálculo dos parâmetros das explosões.

Na terceira fase, obteve-se as propriedades físico-mecânicas do kimberlito de Catoca pois as propriedades do maciço são de extrema importância na determinação dos parâmetros das explosões.

A quarta e última fase, consistiu na análise da pega de fogo de Catoca, dos seus acessórios de detonação, modo de detonação do kimberlito e a posterior comprovação experimental das pegas de fogo.



3 ESTUDO DE CASO

3.1 Apresentação da Empresa

A Sociedade Mineira de Catoca é uma empresa de prospecção, exploração, tratamento-beneficiamento e comercialização de diamantes, erguida por iniciativa do governo Angolano para explorar o primeiro kimberlito, de direito angolano e capital misto. Os sócios que formam Catoca, são: Endiama (41%), Alrosa (41%), LLI Holding Bv (18%). O Catoca está inserido no sector mineiro e é a quarta mina de diamantes com maior volume de facturação do mundo (Manual da Função de Integridade e Conformidade da Sociedade Mineira de Catoca, 2019).

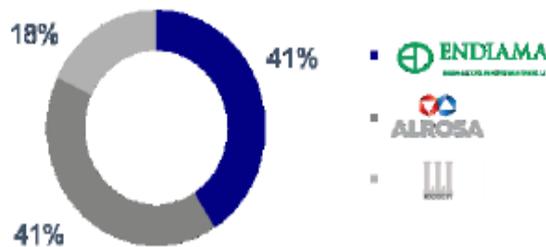


Figura 8 - Accionistas da Sociedade Mineira de Catoca (Manual da Função de Integridade e Conformidade da Sociedade Mineira de Catoca, 2019)

A chaminé kimberlítica de Catoca é explorada a céu aberto. O sistema de mineração utilizado é a escavação por avanço e transporte rodoviário. O “Flowsheet” tecnológico prevê o desmonte directo do estéril e a extracção do minério usando escavadeiras, e carregamento utilizando camiões basculantes de 40, 100 e 135 toneladas de capacidade.

Alguns blocos de minério contêm uma espécie mais dura de rocha kimberlítica, razão pela qual são sujeitos a escarificação antecipada com bulldozer. Nas zonas norte, sul e oeste da mina, onde predomina o gnaiss, o desmonte é realizado mediante a perfuração e explosão.

3.2 Características Gerais da Região do Jazigo

3.2.1 Localização Geográfica

Geograficamente, a chaminé kimberlítica de Catoca está situada no nordeste da República de Angola, ao noroeste da província da Lunda Sul, próximo da cidade de Saurimo, numa distância de 35 km e cerca de 800 km de Luanda, sendo esta limitada a Norte pela província da Lunda Norte, a Oeste pelas províncias de Malange, Lunda Norte e Bié, a Sul a província do Moxico, e a Este pela República Democrática do Congo.

O território da área de concessão da SMC (Sociedade Mineira de Catoca) encontra-se dentro da folha topográfica 121-SG34 (escala 1:1000000) do Cadastro Topográfico do Estado, numa região situada nos limites entre as Lundas Norte e Sul, e ocupa uma área de 340 Km^2 , delimitada por coordenadas geográficas de $20^{\circ}15'00''$ a $20^{\circ}24'15''$ de longitudes Este e $9^{\circ}18'00''$ a $9^{\circ}29'20''$ de latitudes Sul. As coordenadas geográficas da chaminé de Catoca são: $20^{\circ}18'$ de longitude Leste e $9^{\circ}25'$ de latitude Sul.

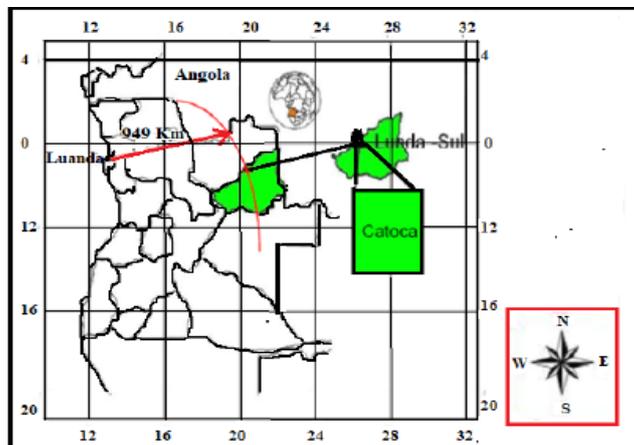


Figura 9 - Localização geográfica de Catoca (Filipe, 2022)

3.2.2 O Relevo

A orografia da região da área de concessão da SMC representa uma planície monótona. É a parte Leste do planalto da Lunda, apresentando uma inclinação geral da superfície na direcção do Sul ao Norte, e com as cotas absolutas de 1078 a 1037 m nos interflúvios, e de 1000 a 900 m nos vales dos rios.

Existe um nó de cruzamento de ramos pertencentes às zonas de fracturação abissal das categorias continental, regional e local, no qual se encontra o campo kimberlítico de Catoca. Este nó é caracterizado também por presença de vestígios duma estrutura anelar de 40 km de diâmetro, no epicentro da qual está situada a chaminé de Catoca. O facto é que quase todos esses acidentes perderam a sua revelação em relevo ao se aproximarem do centro da estrutura, resultando que o bloco inteiro apresente pouca perturbação.

Distinguem-se claramente as planícies costeiras, as escarpas ocidentais, as terras altas e os planaltos centrais, bem como as principais bacias de drenagem dos rios Cuanza, Congo e Zambeze.

3.2.3 Condições Climáticas e Solo

O clima da região de Catoca é tropical húmido. Apresenta duas estações típicas durante o ano: a época das chuvas, que vai desde os fins de Agosto até a primeira quinzena de Maio, sendo a temporada mais chuvosa incidente nos meses de Novembro a Março; e a estação seca, que se estende de Maio a Agosto.

A máxima temperatura registada é de (+37,4°) e a mínima de (+11,6°). A temperatura diária média durante o ano ronda entre (+22,5°) a (+22,8°). As direcções predominantes dos ventos, em função da estação do ano, são de Norte - Nordeste e Sul - Sudoeste. A sua velocidade média cifra-se em 2,0 -2,5 m/s enquanto os valores máximos vão a 16,6 – 18,4 m/s.

Muitas vezes os solos são desagregados pelo volume das quedas pluviais, as savanas existentes não os protegem, salvo em algumas modestas manchas que estão cobertas por uma vegetação rasteira. O solo predominante nesta região é o ferralítico, o paraferalítico e os solos fracamente lavados, conforme pode ser visto na figura abaixo.

3.2.4 Fauna e Flora

Angola apresenta uma excepcional biodiversidade, devido à grande heterogeneidade de biomas nela representados. Inúmeros fatores contribuem para essa grande diversidade de ambientes representados no país, entre eles,

a posição geográfica intertropical, a grande variação nas altitudes e a grande variabilidade geológica. A combinação entre as diferentes condições climáticas e pedológicas produziram cenários biológicos extremamente diversos, compreendendo desde a densa floresta tropical até áreas desérticas.

A flora é representada por savana típica, estepe tropical com uma abundante cobertura herbácea, raras árvores e arbustos que formam moitas nas margens dos rios e vales. A diversa fauna apresenta mamíferos de grande porte, aves diversas, reptéis, batráquios, peixes e numerosos grupos de vertebrados (felídeos, antópolos, coleópteros, fauna do solo, etc.).

A região de Saurimo, onde se encontra inserido o empreendimento, caracteriza-se por ser uma zona de transição entre os domínios da savana, ao sul, e da floresta tropical que se estende ao norte, ganhando extensas áreas na República Democrática do Congo. Portanto, não apenas a cobertura vegetal da região, mas também sua fauna, se caracteriza pela grande diversidade de animais: o hipopótamo (*Hippopotamus amphibius*), a palanca-vermelha (*Hippotragus equinus*), a pacaça (*Syncerus caffer*), a eita tunganga (*Tragelaphus strepsiceros*), a quissema (*Kobus defassa*), o leão (*Panthera Leo*), a cabra-de-leque (*Antidorcas marsupialis*), o sacara (*Otocyon megalotis*), os mabecos (*Lycaon pictus*), a geneta (*Genetta angolensis*), o gato-bravo (*Felis silvestris*), o leopardo-caçador (*Acinonyx jubatus*), a hiena-castanha (*Parahyaena brunnea*), a galinha-do-mato (*Numida meleagris*), as serpentes e etc.



Figura 10 - Área de savana arborizada

3.2.5 Hidrografia

A rede hidrográfica da região faz parte da bacia da grande artéria fluvial do rio Congo, e está orientada na direcção Norte. Os rios Luembe, Chicapa, Luachimo, Chiumbe, Luxico e outros, fazem parte da mesma bacia, correndo subparalelamente do Sul ao Norte.

Os seus vales são abertos e têm formas de U e V. São estes, rios de médio comprimento, com uma certa frequência de pedregais na sua extensão, impróprios para a navegação e com recursos hídricos potenciais.

O rio mais importante é o Chicapa que corre ao longo do limite Leste da área de concessão de Catoca, onde foi construída uma Central Hidroeléctrica que abastece a SMC e sede da província da Lunda Sul – a cidade de Saurimo.

A chaminé de Catoca encontra-se na ladeira direita do vale de curso médio do rio Lova, um dos afluentes do rio Chicapa. O jazigo está situado numa caldeira erosiva natural, formada pelo riacho Catoca que corre acima da própria chaminé.



Figura 11 - A esquerda barragem do rio Chicapa e a direita as quedas do rio Chicapa

3.2.6 Vias de Acesso

O acesso à região pode ser feito tanto por via aérea como terrestre. No interior da área de concessão, as vias rodoviárias entre os diferentes canteiros industriais e sociais da empresa são estradas de terra batida, e asfaltadas em algumas zonas como a vila residencial, e a estrada principal que liga a vila a estrada da mina. As cargas e equipamentos provenientes da Rússia, Brasil,

Europa e outros países, são transportados até Luanda por via marítima, donde são levados a Catoca por via terrestre ou em aviões.

A circulação entre Catoca e as sedes provinciais de Saurimo e Lucapa, realiza-se por estrada asfaltada, controlada pelas unidades militares e policiais.

3.2.7 Economia da Região

A população Local da região, e etnia Tchokwe, dedica-se principalmente a agricultura. Com o aparecimento da SMC, verificou-se um aumento no fluxo da população. O transporte dos colaboradores de Saurimo e dos povoados circunvizinhos, até ao seu local de trabalho, é feito por autocarros.

Na ocorrência de recursos naturais destacam-se alguns materiais de construção como argila, para a fabricação de tijolos na área da cidade de Saurimo, areias argilosas e argilas arenáceas para entulho, gnaisses, quartzitos e cascalhos para a fabricação da brita. Existem perspectivas de utilização das rochas estéreis da Mina de Catoca para a produção de pedregulho, brita e areia, para os fins de construção.

3.3 Geologia da Região do Jazigo

3.3.1 Características Geológicas do Jazigo

Segundo o relatório da mina de 2001, as dimensões da chaminé na superfície moderna do soco de plataforma, eram em torno de 900×900 m (65,7 hectares), o que fez com que esse “pipe” fosse considerado como uma das maiores chaminés do mundo. Em plano a sua configuração é quase isométrica, ligeiramente angulosa.

Os afloramentos do kimberlito a superfície terrestre foram verificados apenas no talvegue e nas paredes do vale do riacho Catoca, numa área de 115 mil m², aproximadamente. A sua parte restante (cerca de 80% da área) era coberta com amontoados e assoreamentos de rochas estéreis, representadas por produtos de destruição dos gnaisses, areias e areias argilosas que encaixam o corpo mineralizado, transportados pelas correntes fluviais do planalto circundante, e também por sedimentos da formação Calahári. A espessura máxima das rochas estéreis estimava-se em 40-50 m, e de 20 m em média.

Na sua composição litológica, são destacados vários tipos de kimberlitos. A parte central da chaminé é preenchida por uma variedade de kimberlitos intrusivos fracamente diamantíferos redepositados e inter-estratificados com as rochas puramente sedimentares; os quais atingem uma profundidade de 100 metros. O seu afloramento na superfície do corpo mineralizado ocupa uma área correspondente a mais de 30% da secção da jazida. A espessura máxima constatada naquela fase da pesquisa foi de 114 m. O teor dos diamantes nessa caldeira é muito baixo, variando entre 0,09 - 0,14 qlt/m³.

Os kimberlitos intrusivos que rodeiam a mesma são heterogéneos, representados por variedades porfíricas maciças que formam um cinturão anelar de 50 – 250 m de largura ao longo do endo-contacto da chaminé; kimberlito de porfiros médios, brechas kimberlíticas e tufos, que se situam no intermédio entre os kimberlitos porfíricos e depósitos do complexo vulcanogénico – sedimentar.

Os máximos teores de diamantes (de 0,54 qlt/m³ a 1,96 qlt/m³ em alguns poços) incidem no cinturão de kimberlitos porfíricos. Os kimberlitos da zona de transição caracterizam-se por teores de diamantes duas vezes menores.

Uma variedade de kimberlitos pórfiros finos foi descoberta nos poços, na profundidade de 50 – 90 m a partir da superfície da chaminé. Não há dados acerca da amostragem em diamantes, para essa variedade de kimberlitos.

As rochas encaixantes da chaminé, são gnaisses pré-cambrianos de diferentes composições e graus de meteorização. As rochas sobrejacentes de cobertura, são areias da formação paleogeno-neogénica de Calahári, areias e arenitos interformacionais paleogénicos e sedimentos aluviais e artificiais industriais modernos.

Os kimberlitos e as rochas vulcanogénico - sedimentares (RVS) diamantíferas das fácies crateral do jazigo, geneticamente vinculadas à formação do próprio corpo mineralizado, estão representados pelos seguintes tipos principais:

- Brechas kimberlíticas com a textura maciça do cimento (BKM);
- Brechas kimberlíticas autolíticas (BKA);

- Tufos kimberlíticos, brechas tufáceas e tufo-gravelitos com intercalações de arenitos tufáceos (BTK);
- Arenitos, arenitos tufáceos, tufo-aleurolitos, argilitos (RVS);
- Rochas kimberlíticas da zona de transição (ZT) e do substrato do complexo vulcanogénico - sedimentar, saturadas em abundância com os xenólitos de gnaisses encaixantes – a chamada “zona xenolítica” (ZX).

3.3.2 Rochas Encaixantes

Os gnaisses encaixantes, são de composição feldspato - piroxênica, com os veios e intercalações de quartzitos e xistos quartzíco – biotíticos. São também caracterizados por diferentes graus de meteorização e desintegração. As rochas são corrugadas, os ângulos de mergulho em bandamento e xistosidade variam de 30 a 80 graus. Segundo as medições feitas na parte Oeste da Mina, o azimute de mergulho dos gnaisses é Noroeste 340-350 graus. O ângulo de mergulho constitui 50-90 graus. O seu contacto com os kimberlitos é acentuado, com paredes abruptas (até sub - verticais).

A superfície do tecto do maciço de gnaisses encaixantes, apresenta as mesmas cotas da superfície de kimberlitos da chaminé, cujos valores são 960-970 m de altitude absoluta. Assim sendo a transição duma superfície para outra não tem desníveis acentuados. A cota da superfície do maciço de gnaisses aumenta, a medida que se afasta do contorno do “pipe”, e chega a atingir os valores de 980 m ou mais (985-988 m).

Na parede Oeste da caldeira erosiva natural, ocupada pela chaminé de Catoca, os gnaisses da superfície são intensamente meteorizados. A espessura da zona intemperizada constitui 30-50 m, sendo o valor possivelmente ainda maior, na parte Sudoeste da parede. A espessura máxima do eluvião gnáissico, revelada na parede Oeste da chaminé, incide sobre uma área a Sul da foz do riacho Catoca, possivelmente originado por existência duma zona tectónica nessa área. Essa zona revela-se na direcção do Nordeste a Sudoeste, nos kimberlitos da chaminé e provavelmente nos gnaisses encaixantes. Nas paredes Norte e Sul os gnaisses resistentes e praticamente não meteorizados, são esperados abaixo da cota 920 m, na parede Leste – abaixo da cota 940 m, no Oeste – debaixo das cotas de 890-900 m.

Debaixo dos kimberlitos dentro do contorno da chaminé, nos poços de prospecção geológica profundos foram descobertos, por via de regra, os gnaisses muito resistentes, inalterados, fracamente fissurados, onde a velocidade de sondagem com brocas diamantinas de 112 mm, geralmente não ultrapassa 1-2 m em um turno.

Na zona de contacto com a chaminé, os gnaisses da superfície são sujeitos a um intenso intemperismo. Como resultado, o tecto dos gnaisses do maciço rochoso parece imergir ao longo do corpo kimberlítico de uns metros até umas dezenas de metros na direcção das paredes ao centro do “pipe”.



Figura 12 - Contacto Gnaisse–Minério na zona oeste do kimberlito de Catoca

3.3.3 Tectónica

A chaminé de Catoca está localizada na parte central, numa estrutura radial-circular, geneticamente resultante da activização do foco tectono-magmático intracrustal, e situa-se num nó de cruzamento das zonas de fracturas de extensão Noroeste, sub-meridional e sub-latitudinal. A sua posição, coincide com uma das estruturas circulares menores.

Foram destacadas na região da chaminé de Catoca, nas rochas do embasamento, três zonas tectónicas, de largura de 100-150 a 200-250 m. Duas apresentam direccionamento de extensão Norte, e uma, com direcção Norte - Noroeste. Para a sua determinação foram usados os critérios de, variação da extensão dos eixos longos das anomalias lineares, fraccionamento e carácter mosaico do campo magnético, articulação lateral das anomalias de diferentes extensões, e variação do campo em graus.

A estrutura tectónica interna do jazigo tem uma composição tectónica complexa e reflecte as peculiaridades do regime tectónico nas diversas etapas da sua formação. O seu aspecto moderno, está relacionado principalmente, com o carácter dos movimentos tectónicos na fase final de evento do magmatismo kimberlítico (no período

de surgimento da estrutura circular das brechas kimberlíticas com a textura maciça do cimento e suas variedades micáceas), assim como no período dos processos pós-magmáticos.

3.3.4 Rochas Sobrejacentes

Os gnaisses e kimberlitos da chaminé estão cobertos por uma capa bastante grossa, de sedimentos paleogêneo-neogêneos e paleogêneos, friáveis, principalmente arenosos. No Nordeste da mina, nos restos do vale do riacho Catoca, a camada rochosa de cobertura compreende sedimentos aluviais e artificiais industriais, duma espessura e distribuição relativamente pequenas. Na parede Oeste, as rochas sobrejacentes são os sedimentos seixosos e arenáceo - argilosos, lodosos, saturados com água, de pequena espessura (menos de 5 m), do vale do rio Lova. Os mesmos jazem no eluvião argiloso dos gnaisses.

Fora dos limites da chaminé, nas paredes Norte, Leste e Sul do “pipe”, a espessura da capa arenosa de cobertura constitui 40-55 m. Com a superfície relativamente plana do tecto subjacente dos gnaisses (cotas de 966-970 m), a possança das areias cresce, à medida de afastamento das extremidades da chaminé a uma distância de 150-250 m, com o aumento dos níveis da superfície da terra de 970-980 m a 1010-1020 m. Nesta parte, a cobertura arenosa divide-se em duas camadas aproximadamente iguais em espessura.

A camada superior está representada por areias da formação Calahári: da cor parda avermelhada, finas, raramente argiláceas até areia argilosa, secas, fracamente cimentada, possuindo pequena resistência estrutural, a qual se perde quando são molhadas. As areias, por via de regra, têm estrutura densa, na base da sua camada possuem um horizonte marcante (1 - 2 m) de solos seixosos das rochas siliciosas, com o enchimento argiláceo -arenoso / arenáceo -argiloso. As cotas desse horizonte marcante sobem à medida que se afasta da

chaminé. Junto aos limites do “pipe”, os seixos encontram-se nas cotas de 970 m, e a uma distância de 200 m do contorno - nas cotas de 995 m.

A camada inferior até os gnaisses e kimberlitos subjacentes está composta por areias argilosas de densidade média, friáveis, da cor parda acastanhada, com manchas brancas e inclusões pontilhadas brancas do caulino, que se denominam areias interformacionais. Há possibilidade de aparecerem, na parte superior da camada (no contacto com as areias Calahári), os grandes blocos (de 1-3 m) de arenitos aglutinados com o cimento silicioso, que têm um aspecto textural parecido com as areias interformacionais pintalgadas, uma vez que estes ocorrem fora (mas não muito distante) dos limites do jazigo.

Em regra, as areias são finas, às vezes contêm as intercalações sub-horizontais das argilas pardo -acastanhadas, resistentes, muito densas e argilitódes com espessura de 0.1 a 2 m. A partir das cotas de 980 – 975 m, as areias apresentam-se aguadas, nas áreas situadas a distâncias de 150 – 250 m da chaminé. A medida que se aproxima dos limites do “pipe” o nível de água baixa quase até as cotas da superfície dos gnaisses e kimberlitos - 969 – 972 m.

Nos abaixamentos locais do tecto das rochas subjacentes, o fluxo aquático concentra-se, criando fontes que formam os tributários do riacho Catoca. As areias interformacionais saturadas com água, descobertas nas paredes da chaminé, são instáveis por erosão interna, e com o escoamento de água das mesmas, as areias flutuam, formando deslocamentos e solifluxões locais, os quais arrastam também as areias de Calahári, que são mais estáveis, fracamente cimentadas. Em consequência disso, nas areias de Calahári criam-se vastos barrancos com as paredes sub-verticais.

Dentro dos limites da chaminé, nos seus declives, a espessura das areias de Calahári não tem variações substanciais e não ultrapassa 25 m, enquanto as areias interformacionais variam consideravelmente quer na espessura quer nas suas propriedades. A possança das areias interformacionais cresce significativamente à medida que se aproxima do centro da chaminé, a partir da periferia. Pode-se destacar convencionalmente três camadas que se diferenciam por suas propriedades.

A camada superior, relativamente friável, saturada com água, instável por erosão interna, flutuando nos taludes, de 15-25 m de espessura, encontra-se debaixo das areias Calahári nas paredes da chaminé até as cotas de 960-970 m. Na sua parte superior, nos contactos com as areias Calahári, foram encontrados os blocos de arenitos pintalgados aglutinados com o cimento silícico, resistentes e altamente resistentes.

A camada média das areias, encontra-se nos taludes das bancadas, na parte média da mina, nas cotas de 950-940 m. É constituída por areias finas, pintalgadas, densas, homogéneas, de cores variadas, com o predomínio de matizes amarelos. São estas areias suficientemente estáveis nos taludes das bancadas de 970, 960 e 955 m, na parte Nordeste da Mina actual. A sua transição á parte superior é incerta.

O estrato inferior das areias encontra-se no centro da Mina até a profundidade de 130 m. Este é denso, até arenito fracamente litificado, da cor castanha, fissurado, estratificado, com uma pequena inclinação na estratificação, concordante com o jazimento do sopé da formação que forma uma depressão caliciforme, no tecto das rochas vulcanogénico - sedimentares subjacentes. No centro da chaminé, a espessura dos sedimentos interformacionais é a mais grossa. A espessura máxima das areias interformacionais na parte central do "pipe" está limitada pelas cotas de 970 até 840 m. Os sedimentos estão saturados com água, porém os taludes das bancadas são suficientemente estáveis.

Os sedimentos aluviais e artificiais industriais do vale do riacho Catoca, de menos de 10 m de espessura, estão o mais frequentemente representado por areia da cor amarela acastanhada, de grãos finos e médios, saturada com água, com impurezas de calhaus das rochas siliciosas. Grande parte desses sedimentos foi lavrada aquando da garimpagem desordenada do alúvio. Posteriormente, foram assoreados por areias provenientes dos declives da caminé. Os limites nítidos da lavra não estão estabelecidos, por não terem sido preservados os seus vestígios testemunhadores.

3.3.5 Morfologia Interna do Corpo Mineralizado

A chaminé do kimberlito de Catoca é um corpo kimberlítico, que contém no seu interior mais de 300000000 m^3 de produtos de magmatismo kimberlítico. É caracterizada por possuir o conjunto integral de todos os elementos morfológicos (canal de adução, diatrema e cratera) e de todos tipos geológicos genéticos das rochas kimberlíticas (kimberlitos e brechas kimberlíticas com a textura maciça de cimento, brecha kimberlíticas autolíticas, brechas tufáceas kimberlíticas, formações vulcano-sedimentares e epiclásticas de composições mistas). Semelhante à maior parte dos corpos kimberlíticos em Angola, a chaminé de Catoca pertence aos diatremas fracamente erodidas, com o funil preservado, que está preenchida pelas rochas de fácies crateral. A superfície do corpo mineralizado debaixo das formações de cobertura é acidentada em consequência do enchimento incompleto da cratera da chaminé, com o material kimberlítico e corte desigual do corpo kimberlítico já formado pelos processos erosivos posteriores. As cotas absolutas dessa superfície variam de 950 - 971 m no local do jazigo até 840 m na sua parte central. A forma da chaminé em plano é quase isométrica, irregularmente arredondada, parcialmente achatada pelas rochas encaixante no bloco leste, as suas dimensões na superfície do corpo mineralizado, montam a 990x915m, com área de 636000 m^2 . A transição da cratera para diatrema, está constado na profundidade de 400 m, aproximadamente (cota absoluta de 560 m) onde as dimensões da chaminé são de 430x360 m e a área da secção transversal 136000 m^2 .

3.3.6 Características Hidrogeológicas do Jazigo

Durante o estudo das características hidrogeológicas da chaminé kimberlítica de Catoca, efetuaram-se estudos geofísicos nos poços de prospeção geológica abertos no corpo mineralizado, com o objectivo de encontrar os intervalos de afluência de água e o avaliar as suas características de filtração.

A saturação com água verifica-se normalmente nas areias interformacionais dos sedimentos sobrejacentes e intercalações, e nas lentes arenáceas da camada vulcanogénico - sedimentar do "cálice", que se caracterizam por débitos extremamente baixos. Essa saturação é praticamente devida somente às precipitações atmosféricas.

Nos poços em que foram descobertos os kimberlitos, os EGP não registraram intervalos de afluência ou absorção de água.

Nos poços de prospeção geológica, nos quais se realizavam os estudos hidrogeológicos, além do “conjunto de estudos de minérios” dos EGP, foram efetuadas: termometria, debitometria, diagrafia acústica, medições do nível de água.

Os estudos geofísicos para a caracterização hidrogeológica do jazigo foram realizados em três etapas:

- Substituição da água da lama de perfuração por água de lavagem até depuração completa da água seguido de procedimentos de termometria, debitometria, e diagrafia acústica, mantendo o nível da água á boca do poço.
- Abaixamento do nível da água, feito mediante o baldeamento com tubo-colherão, seguido dos procedimentos de medições do nível de água de 1 em 1 hora, e termometria igualmente de 1 em 1 hora.
- Recolha das amostras de água em todo o poço após a recuperação do nível, em cada 50 metros.

As condições hidrogeológicas da jazida foram estudadas no processo de prospeção detalhada dos seus níveis superiores. Um volume relativamente pequeno de estudos hidrogeológicos efetuados no contorno da mina aberta existente permitiu fazer uma estimativa qualitativa de particularidades hidrogeológicas referentes a mina, definidas por condições hidrográficas e meteorológicas, por posições de limites hidrodinâmicos e condições de alimentação e descarga de águas subterrâneas abertas pela mina, por mudança do regime de filtração de factores que o definem no processo de mineração bem como pelo carácter de abertura dos níveis de águas subterrâneas e pela tecnologia de mineração.

Os estudos hidrogeológicos efectuados revelaram a presença de dois tipos de águas subterrâneas de sedimentos interformacionais, e águas de fissuras de gnaisses de idade arcaica de grau de erosão eólica e de desintegração diferentes.

As águas subterrâneas são adjacentes aos sedimentos interformacionais representados por areias quartzo-feldspáticas de grão fino que por vezes contêm camadas intermédias sub-horizontais de argilas sólidas e muito densas, de espessura de 0,1 a 0,9 m acompanhadas de calhau silicífero escasso. O ingresso de água a mina aberta é realizado por fontes descendentes de baixa descarga situadas em descidas locais do leito hidrófugo que acumulam águas infiltrantes.

Segundo os resultados das observações hidrogeológicas do regato Catoca efectuadas em 1988 acima e abaixo da zona norte pela corrente do regato, o débito de água constituiu 250-300 m³/h. Os débitos totais de fontes no período de estiagem segundo as medições feitas em Outubro de 1999 variam de 26 m³/h á 27,2 m³/h. O ingresso de água de areias interformacionais foi estimado entre 10-15 m³/h.

Em resultado de observações do regime efectuadas no período de estiagem (Junho- Agosto de 2005), o volume de ingresso de água á fossa da mina era da ordem de 120-140 m³/h. O débito total das fontes no colector das águas inferior contando fugas da fossa da mina variava de 47,2 a 58 m³/h.

O volume de ingresso total de água é da ordem de 170-200 m³/h. O ingresso diário máximo á mina aberta no período das cheias pluviais foi calculado baseando-se nos dados de observações meteorológicas efectuadas desde 1995. O valor máximo das precipitações diárias, de 94 mm/dia, foi tomado como projectado com a frequência de uma vez por cinco anos.

A composição química das águas compreende hidrocarbonetos, sulfatos e cloretos como também de hidrocarbonetos de cálcio. A sua mineralização total varia de 0,03 a 0,1 g/l. As águas são ultra-doces. A composição química da água varia em função da estação do ano.

4 INVESTIGAÇÃO ANALÍTICA DO ESTADO TENSIONAL DO MACIÇO AO EXPLODIR CARGAS COMPACTAS NO KIMBERLITO DE CATOCA

4.1 Características das Substâncias Explosivas a Investigar

A substância explosiva usada no kimberlito de Catoca, é o explosivo do tipo Emulsão HEF – 100. Para a fragmentação secundária usa – se a emulsão de marca Riogel Kupula encartuchada.

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 embalamento 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 5 - Características da SE HEF – 100 (Filipe, 2022)

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 6 - Características da SE 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.

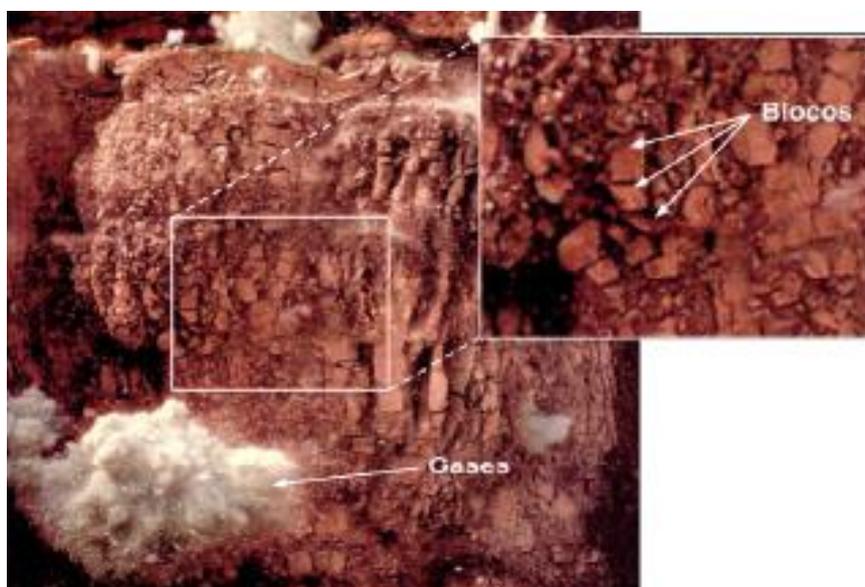


Figura 13 - Deslocamento de material: gases em expansão e blocos acelerados
(<https://www.youtube.com/watch>)

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):

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

ρ_{SE} - Densidade da substância explosiva, kg/m^3 .

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

K - índice adiabático dos produtos da explosão.

$K = f(\rho_{SE})$.

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

Tabela 7 - Índice adiabático dos produtos da explosão (Filipe, 2022)

$\rho_{SE} (\text{g/cm}^3)$	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):

$$k_R = \frac{2\rho_0 v_L}{\rho_{se} v_d + \rho_0 v_L}$$

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).

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

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

f) Pressão máxima (P_r) 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:

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

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

Onde:

P_r – 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.

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

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

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):

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

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

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

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

Tabela 8 - Parâmetros das ondas de detonação e choque refractadas no maciço rochoso com cargas compactas (Filipe, 2022)

Sustancia explosiva	P (MPa)	V (m/s)	K_R	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

5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS EXPLOSÕES

5.1.1 Operação de Perfuração de Rocha

A perfuração é assegurada por uma frota constituída por perfuratrizes SANDVIK D45KS, Caterpillar CAT-MD6250 com capacidade para perfurar furos de 220 mm a profundidade de 60 m.



Figura 14 - Perfuratrizes utilizadas na Mina de Catoca

5.1.2 Característica dos Furos

- **Diâmetro dos furos**

Os furos são de 203 mm de diâmetro, este de acordo a capacidade das perfuratrizes empregues na Mina de Catoca, da produção requerida, do ritmo de escavação, da altura da bancada e das características da rocha.

- **Profundidade dos Furos e Ângulo de Inclinação**

A profundidade dos furos varia de 16 a 18 metros, tendo como média 17 metros de profundidade. Tratam – se de furos verticais.

5.1.3 Carregamento dos Furos

O procedimento inicia-se com a conexão do cordel detonante ao booster ou reforçador (um de 800g no fundo e outro de 400g no meio), que funciona como o próprio nome diz, para reforçar a onda de choque, dando início à explosão. Tratando-se de uma substância explosiva do tipo emulsão, o carregamento dos

furos acontece com a aplicação directamente no furo sem a embalagem do mesmo, sendo uma emulsão bombeada (granel), é armazenada e transportada por uma unidade móvel. Em furos com cavernas, coloca-se uma manga plástica antes da aplicação da emulsão (para evitar o escapamento da emulsão para essas cavernas). Finalizado o carregamento, segue-se o processo de conexão dos cordéis e a inserção do retardo no cordel detonante. No momento de dar início ao fogo, o estopim é anexado ao cordel detonante e deve-se acender a extremidade do tubo flexível do acessório.



Figura 15 – Unidade móvel de Emulsão da Mina de Catoca

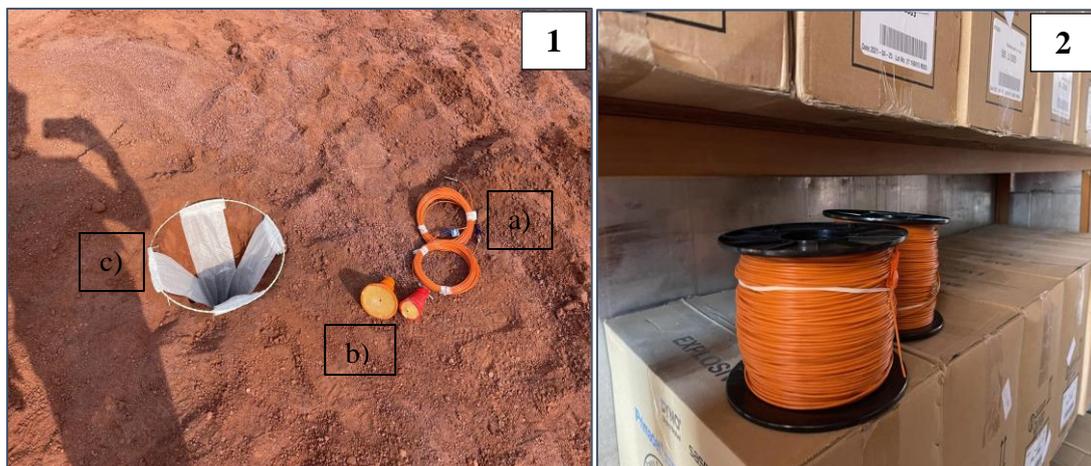


Figura 16 - Acessórios de detonação da Mina de Catoca: 1.a) Detonador Nonel; 1.b) Boosters; 1.c) Manga plástica e 2) Cordel detonante



Figura 17 - Carregamento dos furos com emulsão HEF – 100 na Mina de Catoca

5.1.4 Acessórios de Detonação a Utilizar na Mina de Catoca

Acessório	Observações
Detonador Nonel	É um detonador não eléctrico de tubo de choque projectado para iniciar explosões.
Intensificador de carga (BOOSTER DE 400 E 800 g)	O booster ou reforçador é um dispositivo revestido com plástico que tem a função de amplificar a onda de choque para dar início à explosão. Para garantir que toda a carga do furo seja detonada é necessário reforçar. Recomenda-se o uso desse acessório para obtenção do máximo rendimento no momento em que se dá início à detonação (SILVA, 2009).
Mangas	São sacos colocados em furos com cavernas, para evitar com que a emulsão escape para essas cavernas, evitando assim que se gaste mais emulsão.
Sequenciadores (Retardos)	São dispositivos semelhantes a espoletas comuns, normalmente com revestimento de corpo plástico, que proporcionam atraso controlado na propagação da onda de choque; são empregados para a montagem de malhas em que se precisa de uma defasagem na iniciação do explosivo em diferentes pontos, ou mesmo para detonações isoladas, proporcionando maior segurança à operação (Mineração – Desmonte e Estabilidade de Rochas, 2008).
Cordão Detonante	Acessório, iniciador e transmissor de energia, que permite a iniciação simultânea de várias cargas explosivas, por ele interligadas, independente da extensão da rede. Consiste num núcleo de nitropenta envolvidos por fios de algodão e rayon e

	revestido externamente por uma camada plástica à prova d'água.
Led Line	Linha de chumbo.
Estopim	São tubos flexíveis preenchidos com pólvora negra destinados a transmitir chama para iniciação de espoletas.
Mecha Lenta	Cordão constituído por um núcleo calibrado de pólvora envolvido por um tecido e coberto com camada impermeável.

5.1.5 Operação de Desmonte

Quando o desmonte apresenta blocos de rocha de tamanhos inadequados, que não podem seguir directo para a britagem. Este material é seleccionado, e fragmentado na praça pelo método de fogacho.

- **Granulometria do Desmonte**

Após a detonação há ainda a existência de fragmentos de rocha com granulometria indesejada, dificultando assim os processos subsequentes de carregamento, transporte e britagem secundária. A figura abaixo ilustra blocos provenientes do desmonte primário da SMC, como apresentado no último parágrafo, estes blocos afectam a movimentação dos equipamentos de carregamento e transporte, necessitando assim de uma fragmentação secundária para redução da granulometria.



Figura 18 - Blocos indesejados produzidos pelo desmonte de rocha na SMC

5.2 Simulação de Cálculos para Determinação dos Parâmetros das Explosões

Para melhorar os trabalhos de perfuração e desmonte de rochas com explosivos, e assim diminuir a necessidade de fragmentação secundária será demonstrado uma simulação de cálculos.

a) Parâmetros de Perfuração

Para a realização da detonação são alojados os explosivos, detonadores e booster (um de 800 no fundo e outro de 400 no meio) na câmara de carga (furos) de tal forma que é de grande importância conhecer o passaporte de perfuração onde se observa a quantidade de furos a realizar, profundidade de cada furo, inclinação, profundidade máxima, mínima e a média tal como a sua localização espacial (coordenadas X, Y, Z) de cada furo, como se ilustra no exemplo da tabela seguinte:

Tabela 9 - Parâmetros das Perfurações

ID	Coord_y	Coord_X	Coord_Z	Profund	Ângulo
01	8960434.1	423071.38	764	17,00	-90
02	8960428.67	423072.23	764	18,00	-90
03	8960423.23	423072.99	764	18,00	-90
04	8960417.8	423073.82	764	18,00	-90
05	8960412.37	423074.66	764	18,00	-90
06	8960406.94	423075.5	764	18,00	-90
07	8960401.5	423076.33	764	18,00	-90
08	8960396.09	423077.28	764	18,00	-90
09	8960390.7	423078.33	764	18,00	-90
10	8960385.31	423079.38	764	17,00	-90
11	8960379.91	423080.42	764	17,00	-90
12	8960374.51	423081.44	764	17,00	-90
13	8960369.11	423082.46	764	18,00	-90
14	8960363.71	423083.47	764	18,00	-90
15	8960358.32	423084.54	764	18,00	-90
16	8960353.03	423086.02	764	18,00	-90
17	8960347.74	423087.5	764	18,00	-90
18	8960342.45	423088.98	764	18,00	-90

19	8960337.15	423090.46	764	18,00	-90
20	8960331.86	423091.94	764	18,00	-90
21	8960326.59	423093.48	764	17,00	-90
22	8960321.36	423095.18	764	17,00	-90
23	8960316.13	423096.87	764	16,00	-90
24	8960310.91	423098.56	764	16,00	-90
25	8960305.73	423100.39	764	16,00	-90
26	8960300.59	423102.33	764	16,00	-90
27	8960295.44	423104.27	764	16,00	-90

b) Parâmetros de Carga

➤ Cálculo da Razão Linear de Carga (R_{LC})

Segundo Silva (2009), a razão linear de carregamento (R_{LC}) é a quantidade de explosivo por metro de um furo:

$$R_{LC} = \frac{\rho_{se} * \pi * D^2}{4000} = \frac{1,18 * 3,14 * 203^2}{4000} = 39,17 \text{ kg/m}$$

Descrição:

ρ_{se} : densidade da substância explosiva;

D^2 : diametro do furo.

➤ Cálculo do Afastamento (A)

Para Silva (2009), o afastamento é a menor distância que vai do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra.

$$A = 0,0123 \left[2 * \left(\frac{\rho_{SE}}{\rho_R} \right) + 1,5 \right] * D_F; \text{ m} \quad A = 0,0123 \left[2 * \frac{1,18}{2,8} + 1,5 \right] * 203 = 6 \text{ m}$$

ρ_R : Densidade da rocha, g/cm^3 .

ρ_{SE} : Densidade da substância explosiva, g/cm^3 .

➤ **Cálculo do Espaçamento (E)**

Espaçamento é definido como a distância em metros entre os furos de uma linha de fogo. A relação prática para seu dimensionamento está ligada directamente ao afastamento (GERALDI, 2011).

$$E = A; m \quad E = 6 m$$

➤ **Cálculo da Malha de Perfuração (M)**

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

$$M = E * A = 6 * 6 = 36 m$$

➤ **Cálculo da Longitude do Tampão ($L_{tampão}$)**

Segundo Silva (2009), tampão é a parte superior do furo que não é carregada com explosivos, mas sim com terra, areia ou outro material inerte bem socado a fim de confinar os gases do explosivo.

$$L_{tampão} = P_{furo} * (20 \text{ à } 30 \%)$$

$L_{t1} = 16 * 0,2 = 3,2 m$	$L_{t2} = 17 * 0,2 = 3,4 m$	$L_{t3} = 18 * 0,2 = 3,6 m.$
-----------------------------	-----------------------------	------------------------------

➤ **Cálculo da Longitude de Carga (L_{CARGA})**

A longitude da carga é igual a profundidade do furo menos a longitude do tampão.

$$L_{CARGA} = P_{furo} - L_{tampão}$$

$L_{C1} = 16 - 3,2 = 12,8 m$	$L_{C2} = 17 - 3,4 = 13,6 m$	$L_{C3} = 18 - 3,6 = 14,4 m$
------------------------------	------------------------------	------------------------------

➤ **Cálculo da Quantidade de Carga em cada Furo (Q_{CARGA})**

$$Q_{CARGA} = P_{furo} * M * q; kg$$

Para a rocha:

$Q_{c1} = 16 * 36 * 0,93 = 536 \text{ kg}$	$Q_{c2} = 17 * 36 * 0,93 = 569 \text{ kg}$	$Q_{c3} = 18 * 36 * 0,93 = 603 \text{ kg}$
--	--	--

Para o minério (tendo em conta o intervalo estabelecido $q = 0,55$):

$Q_{c1} = 16 * 36 * 0,55 = 317 \text{ kg}$	$Q_{c2} = 17 * 36 * 0,55 = 337 \text{ kg}$	$Q_{c3} = 18 * 36 * 0,55 = 356 \text{ kg}$
--	--	--

Onde:

q: Consumo específico (para rocha $q = 0,93 \text{ kg/m}^3$, para minério $q = 0,50$ a $0,60 \text{ kg/m}^3$).

- **Cálculo do Total de Substância Explosiva usada em cada Bloco Detonado (Q_{Total})**

$$Q_{Total} = \sum Q_{CARGA} ; \text{kg}$$

Para a rocha: $Q_{Total} = 536*5 + 569*6 + 603*16 = 15.742 \text{ kg}$

Para o minério: $Q_{Total} = 317*5 + 337*6 + 356*16 = 9.303 \text{ kg}$

- **Cálculo do Total de Metros Perfurados para Realizar a Detonação (m_{lineal})**

$$m_{lineal} = \sum P_{furos} ; \text{m}$$

$$m_{lineal} = 16*5 + 17*6 + 18*16 = 470 \text{ m}$$

- **Cálculo do Total de Metros por Carregar (m_{lineal})**

$$m_{lineal} = \sum L_{Carga} ; \text{m}$$

$$m_{lineal} = 12,8*5 + 13,6 *6 + 14,4 *16 = 308 \text{ m}$$

- **Cálculo do Total de Metros de Tampão (m_{lineal})**

$$m_{lineal} = \sum L_{Tampão} ; m$$

$$m_{lineal} = 3,2 * 5 + 3,4 * 6 + 3,6 * 16 = 94 m$$

➤ **Cálculo do Rendimento de Produção (R_{prod})**

$$R_{prod} = (P_{furo} - 1) * M ; m^3$$

$$R_{prod1} = (16 - 1) * 36 = 540 m^3$$

$$R_{prod2} = (17 - 1) * 36 = 576 m^3$$

$$R_{prod3} = (18 - 1) * 36 = 612 m^3$$

➤ **Cálculo do Volume de Rocha a Detonar (V_{Rocha})**

$$V_{Rocha} = \sum R_{prod} ; m^3$$

$$V_{Rocha} = 540 * 5 + 576 * 6 + 612 * 16 = 15.948 m^3$$

5.2.1 Resumo das pegas de fogo utilizadas na Mina de Catoca e seus resultados

Actualmente, existe um problema com os padrões utilizados em Catoca, uma alta percentagem (12,45% - 13,33%) de fragmentos de rocha com dimensões maiores do que os admissíveis pelos equipamentos da cadeia tecnológica (Filipe, 2022).



Figura 19 - Pedaco de rocha sobredimensionado (Filipe, 2022)

5.2.2 Pegas de Fogo Utilizados Durante os Trabalhos Experimentais

Para os trabalhos experimentais na Mina de Catoca, foram desenhados os padrões de detonação para uma carga compacta, composta de Booster de 400 e 800g e Emulsão Russa fabricada em Catoca, por serem estas as substâncias explosivas utilizadas e disponíveis na Mina.

Em dependência do maciço rochoso, utilizaram-se duas redes de perfuração, uma para o gnaisse e outra para o minério duro que não pode ser arrancado com os equipamentos mecânicos.

Nas tabelas abaixo apresentam-se as pegas de fogo para os blocos 33-21 e 32.

Tabela 10 - Pega de fogo utilizada para o Bloco 33-21

Diâmetro (mm)	a (m)	b (m)	H (m)	Lt (m)	Ls (m)	Pf (m)	Q_{booster} (g)	Q_{booster} (g)	Qt_{emulsão} (Kg)
203	5,5	5,5	14,2	3,2	1,8	16	400	800	107000

Tabela 11 - Pega de fogo utilizada para o Bloco 32

Diâmetro (mm)	a (m)	b (m)	H (m)	Lt (m)	Ls (m)	Pf (m)	Q_{booster} (g)	Q_{booster} (g)	Qt_{emulsão} (Kg)
203	5,5	5,5	14	3	1	15	400	800	172000

❖ Primeiro Experimento

Dos experimentos realizados, o primeiro foi no bloco que se situa no extremo nordeste da Chaminé kimberlítica de Catoca, precisamente no horizonte +780 m (Bloco 33-21), vide figura 20.



Figura 20 – Localização da detonação do bloco 33-21

A continuação apresenta-se a informação técnica utilizada para a execução da detonação do maciço rochoso do Bloco 33-21:

- Volume do Bloco: 108.000 m³;
- Furos executados: 252;
- Perfuração realizada: 3.780 mL;
- Malha de furacão: 5,5x5,5m
- Quantidade de Emulsão: 107.000 kg;
- Intensificador de carga de 800g (reforçador): 252 un;
- Intensificador de carga de 400g (reforçador): 252 un;

Accessórios utilizados na detonação

- Tubos de choque (Detonador Sup. não eléctrico (Primadet 8.4M/42ms): 70 un;
- Tubos de choque (Detonador Sup. não eléctrico (Primadet 8.4M/25ms): 213 un;
- Tubos de choque (Detonador Sup. não eléctrico (Primadet 10.5M/67ms): 07 un;



Figura 22 – Localização da detonação do Bloco 32

A continuação apresenta-se a informação técnica utilizada para a execução da detonação do maciço rochoso do Bloco 32.

- Malha de furacão: (5,5 x 5,5) m
- Poços carregados: 415;
- Total profundidade dos poços carregados: 6192 m;
- Volume dos poços carregados em função do levantamento das profundidades:
187 308 m³;
- Quantidade de Emulsão: 172.000 kg;
- Carga específica em função das profundidades dos poços carregados:
0,92 kg/m³;
- Intensificador de carga de 800g (reforçador): 414 un;
- Intensificador de carga de 400g (reforçador): 416 un;

Accessórios utilizados na detonação

- Tubos de choque (Detonador Prof. não eléctrico Primadet 20.4M/500ms):
415 un;
- Tubos de choque (Detonador Prof. não eléctrico Primadet 15.0M/500ms):
415 un;

- Tubos de choque (Detonador Sup. não eléctrico (Primadet 8.4M/42ms): 368 un;
- Tubos de choque (Detonador Sup. não eléctrico (Primadet 8.4M/25ms): 120 un;
- Cápsula detonadora simples: 2 un;
- Linha de chumbo (Lead in line): 500 m;
- Rastilho plástico: 12 m.

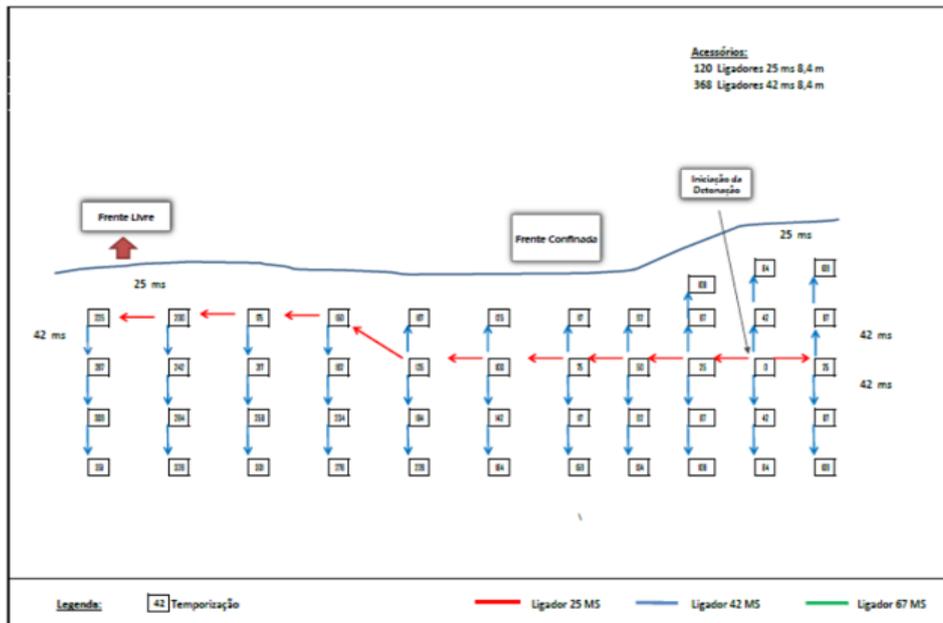


Figura 23 - Sequência de detonação do Bloco 32

5.2.3 Resultados das granulometrias obtidas nas detonações experimentais

A análise dos resultados do grau de fragmentação pela saída de fragmentos de rochas superiores a 1,5 m³ (figuras 24 e 26) considerados pedaços de rochas maiores aos admitidos pela cadeia tecnológica, realizou-se utilizando o método linear (Pedro Alexandre 2006), realizando medições com fita métrica na superfície da pilha, estabelecendo uma relação entre a soma do comprimento dos pedaços de rochas grandes que caíram na linha de medição e o comprimento total desta linha, obtendo os resultados que aparecem na tabela nº 12.



Figura 24 - Resultado da fragmentação do Bloco 33-21



Figura 25 - Remoção dos escombros após detonação no Bloco 33-21



Figura 26 - Resultado da fragmentação do Bloco 32



Figura 27 - Remoção dos escombros no Bloco 32

Tabela 12 - Resultados da percentagem de pedaços de rochas sobredimensionados

Bloco	Percentagem (%)
33-21	6,87
32	7,0

6 IMPACTE AMBIENTAL PROVOCADO PELAS DETONAÇÕES NA MINA DE CATOCA

6.1 Principais Impactes Causados pelas Detonações

Na indústria extractiva a céu-aberto, a principal fonte de impactes ambientais provém da escavação de maciços rochosos com recurso a explosivos, devido aos efeitos que originam.

Cabe ao responsável pelo plano de fogo, ajustar o explosivo ao ambiente geológico, procurando as soluções que melhor se adaptem, otimizando cada aplicação e conseqüentemente, verificando menor impactes ambientais (Bernardo, 2004). Os impactes ambientais inerentes ao desmonte são: projecção de fragmentos, produção de poeiras, propagação de onda aérea ao ambiente envolvente e vibrações ao maciço.

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

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

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

6.1.1 Projecção dos Fragmentos

Entende-se projecção de fragmentos como, o deslocamento de volumes do maciço rochoso a distâncias superiores às previstas. Esse efeito ocorre devido à rede de fracturação pré-existente e à energia libertada na detonação (Bernardo, 2004). A projecção de fragmentos resultante do desmonte de rocha com explosivos constitui um dos impactes mais perigosos, podendo originar acidentes graves, envolvendo pessoas, equipamentos ou infraestruturas.

As principais causas de projecções são: o excesso de carga explosiva por furo, insuficiente afastamento dos furos à face livre, definição incorrecta dos tempos de retardo ou, existência de alterações geológicas no maciço rochoso. A projecção de fragmentos não pode ser completamente eliminada, portanto, a melhor forma de mitigar a sua existência prende-se com acções preventivas, evitando as situações anteriormente descritas (Bernardo, 2004).

6.1.2 Produção de Poeiras

No instante após uma detonação gera-se uma grande quantidade de poeiras, mas, dado que esta situação ocorre normalmente uma vez por turno de trabalhos, faz com que as detonações não sejam uma fonte significativa de poeiras, quando comparadas com as restantes operações associadas à exploração. Sendo as actividades de carácter contínuo tal como carga, transporte e britagem, mais relevantes na emissão de poeiras. A afectação das comunidades envolventes à exploração está dependente da sua proximidade às detonações e a localização face aos ventos dominantes.

Nos desmontes de rocha com explosivo, os poluentes atmosféricos de maior relevância são as partículas em suspensão, principalmente as de menor dimensão (diâmetros inferiores a 10 μm), que podem ter maiores implicações na saúde dos seres humanos.

A redução da produção de poeiras pode ser conseguida com rega prévia da zona de desmonte. Possível apenas em desmontes cujos explosivos utilizados apresentem resistência à presença de água. Deste modo as medidas a tomar para a diminuição de emissão de poeiras em detonações, são:

- Redução ao mínimo da frequência dos disparos, se possível para uma periodicidade semanal;
- Adiar a detonação até se verificar as condições atmosféricas ideais, particularmente a direcção do vento;
- Evitar usar pó resultante da furação para o tamponamento;
- Molhar o material fino no exterior do furo, após o tamponamento e imediatamente antes da detonação;
- Molhar as frentes antes da detonação;

6.1.3 Disseminação das Vibrações

Entende-se por vibração como um movimento oscilatório de um material, sólido ou fluido, que foi afastado da sua posição de equilíbrio. No âmbito deste estudo, a vibração é tida como uma resposta elástica do terreno, constituído por solos e/ou rochas, à passagem de uma onda de tensão, com origem directa ou indirecta numa solicitação dinâmica (Bernardo, 2004).

O uso de explosivos provoca a propagação de ondas de choque através da atmosfera, gerando ruído e vibrações (aertransportadas), denominada onda aérea. O ruído resulta principalmente da libertação dos gases da detonação dos explosivos, pela colisão dos fragmentos entre si e com o piso. As vibrações aertransportadas resultam, essencialmente, da vibração refractada na face livre (talude). A intensidade da onda aérea permite compreender os efeitos que se podem fazer sentir, consoante a distância à zona de detonação.

Tabela 13 - Efeitos da onda aérea sobre estruturas (Bhandari, 1997)

Intensidade (kPa)	Pressão (dB)	Efeito
0,05	128	Existência de queixas
0,13	136	Limite admissível (USBM)
0,20	140	Quebra de vidros soltos
0,63	150	Quebra de alguns vidros de janelas
6,30	170	Quebra de grande parte dos vidros de janelas
14,00	177	Quebra de todos os vidros de janelas

Do ponto de vista da geração, após a libertação súbita de qualquer forma de energia no terreno, desencadeia-se a propagação radial de ondas volumétricas e superficiais, que perturba pessoas e atinge estruturas próximas, com amplitudes de vibração que dependem de vários factores (Dinis da Gama, 2003):

- Quantidade de energia libertada no fenómeno que as ocasionou;
- Distância entre a origem e o ponto onde se registam os seus efeitos;
- Propriedades transmissoras e dissipadoras dos terrenos envolvidos;
- Resistência dinâmica das estruturas e dos seus componentes mais frágeis.

6.2 Medidas de Precaução

Para cada um dos impactos adversos gerados pela actividade de desmonte de rocha com uso de explosivos, existe um grupo de medidas mitigadores que pode contribuir efetivamente para evitar possíveis impasses com as comunidades vizinhas e com os órgãos ambientais. Segundo Konya e Walter (1990), o controlo e a monitorização dos impactes decorrentes de detonações, resultam da consideração de dois pontos essenciais: a quantidade de carga explosiva detonada por volume de rocha e, o estabelecimento da carga explosiva máxima detonada por retardo, sem afectar as estruturas adjacentes.

O Código Mineiro Angolano (Artigo 64º.), prevê que os titulares de direitos mineiros de acordo a regras sobre protecção do ambiente, estão especialmente obrigados a observar os seguintes preceitos:

- Cumprir as obrigações decorrentes do estudo de impacte ambiental e do plano de gestão ambiental, nos termos neles estabelecidos;
- Tomar as medidas necessárias para reduzir a formação e propagação de poeiras; resíduos e radiações nas áreas de exploração e nas zonas circundantes;
- Prevenir ou eliminar a contaminação das águas dos solos, utilizando os meios adequados a esse fim;
- Não reduzir nem, de qualquer outro modo, prejudicar o abastecimento normal de água às populações;
- Executar as operações mineiras de forma a minimizar os danos aos solos;
- Reduzir o impacto do ruído e das vibrações a níveis aceitáveis, determinados pelas autoridades competentes, quando usar explosivos na proximidade das povoações;
- Não lançar ao mar; correntes de água e lagoas; resíduos contaminantes nocivos à saúde humana, fauna e flora;
- Informar as autoridades sobre qualquer ocorrência que tenha provocado ou seja susceptível de provocar danos ambientais.

CONCLUSÕES

1. As investigações realizadas permitiram estabelecer uma metodologia para o desenho dos padrões de explosão na qual se considerem as propriedades físico-mecânicas das rochas, as propriedades da substância explosiva e a acção da explosão no maciço rochoso.
2. Com as pegas de fogo propostas, realizaram-se os trabalhos experimentais na Mina de Catoca que permitiu reduzir os pedaços de rochas com dimensões superiores aos admitidos pela cadeia tecnologia instalada, logrando-se diminuir de 12,45% - 13,3%, que eram obtidos com os padrões utilizados, até 6,87 % a 7,0%.
3. As dificuldades no processo de carregamento e transporte na frente de lavra bem como o desgaste rápido de alguns acessórios de equipamentos de carga e transporte é ocasionado pela presença de blocos maiores resultantes do desmonte realizados naquela unidade de produção, resultando em maiores custos de manutenção dos equipamentos.

RECOMENDAÇÕES

- Investigar a utilização de metodologias com cargas compactas em outros tipos de maciços rochosos.
- Desenvolver mais estudos sobre o comportamento do maciço rochoso, aquando da utilização de substâncias explosivas do tipo emulsão a granel.
- Projectar as pegas de fogo, de acordo com as características dos diferentes blocos da chaminé kimberlítica de catoca.
- Controlar as vibrações geradas na Mina de Catoca, durante o processo de desmonte de rochas com explosivos.

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. 3^{as} Jornadas Científico-Técnica da Sociedade Mineira de Catoca, Lunda-Sul, 2007.
3. Alexandre Pedro, A.M; Otaño Noguel, J; Seidu Baba, A.J. (2005). Propiedades físicas del yacimiento de calizas El Cacao. Geología y Minería. 33 (4).448-463. <http://revista.ismm.edu.cu>
4. Alexandre Pedro, A. M; Otaño Noguel, J; Seidu Baba, A.J. (2005). Perfeccionamiento de los trabajos de voladura en la cantera de áridos El Cacao. Primera Convención Internacional de las Geociencias y la Química aplicadas a la Construcción, Santiago de Cuba, Cuba.
5. Alexandre Pedro, A. M; Otaño Noguel, J; Seidu Baba, A.J. (2005). Acción de la explosión en el medio provocado por cargas compactas. Geología y Minería, <http://revista.ismm.edu.cu>
6. ARAUJO, L.A. (2020) Desmonte de Rocha com o Uso de Explosivos: Estudo de Caso em Trecho da Ferrovia Nova Transnordestina; Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Cajazeiras.
7. BULA, V. (2017) Proposta de Melhoramento do Plano de Fogo na Pedreira de BCB, Niassa, LDA: Monografia apresentada a Divisão de Engenharia de Minas no Instituto Superior Politécnico de Tete, curso de Engenharia de Minas.
8. CAVADAS, P.M. (2012) Optimização do Desmonte Numa Mina a Céu Aberto com Aplicação de Air Decks: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
9. CARDOSO, J.G (2015) Estudo Comparativo entre Diversas Técnicas de Desmonte para Optimização Económica e Ambiental: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

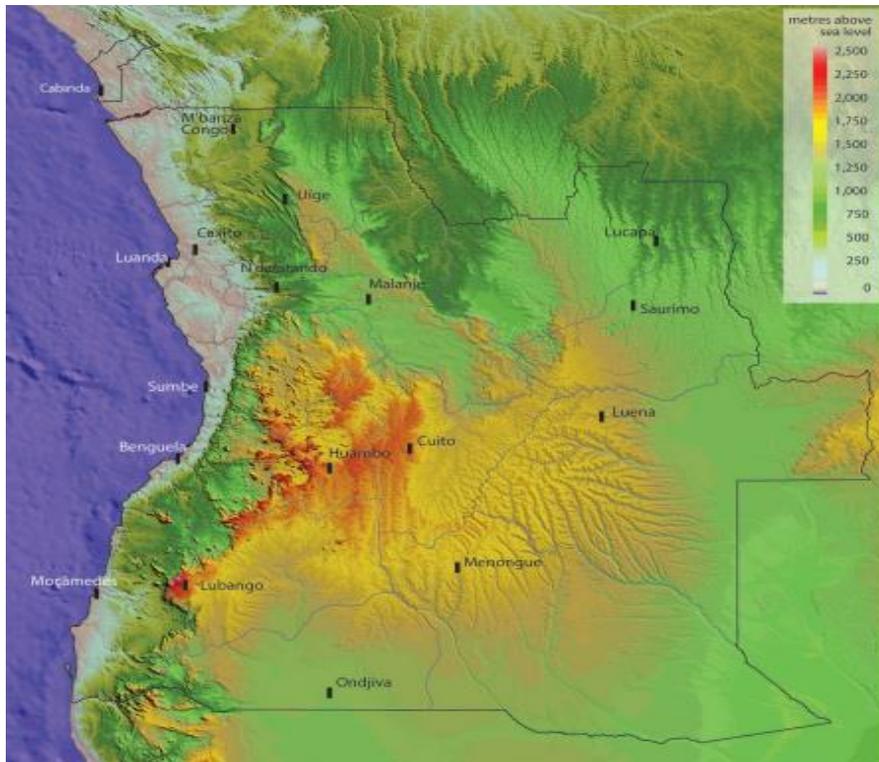
10. COQUEIA, S.A. (2014) Metodologia para o Controlo Geoambiental da Bacia de Contenção de Rejeitados da Sociedade Mineira de Catoca em Angola: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
11. CUNHA, L.E (2013) Estudo de Plano de Fogo para Otimização dos Custos de transporte e Britagem: Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juíz de Fora.
12. DOMINGOS, B.M (2016) Conceção e Desenvolvimento de uma Solução Informática para Dimensionamento, Análise e Otimização de Diagramas de Fogo em Bancada a Céu Aberto: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
13. FERREIRA, F.V. (2020) Ação Dinâmica do Desmonte de Rochas por Explosivos em Barragem de Rejeito: Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
14. MORAIS, J.L. (2004) Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos: Tese de doutorado apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minhas – Universidade Federal de Minas Gerais.
15. NUNES, F. (2022) Índice de Extinción de las Tensiones en el Macizo de Rocas Gnéisicas de la Mina Catoca al Detonar Cargas Compactas de Sustancias Explosivas. (Tesis Doctoral, Universidade de Moa).
16. Otaño Noguel, J.: Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Universitaria Félix Varela, La Habana, 2014.
17. Otaño Noguel, J.: Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Félix Varela, La Habana, 1998.
18. REAL, J.R. (2019) Análise do Poder Disruptivo de Explosivos Civis: Trabalho de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST).
19. SANDIN, M. V. F. (2015) Aplicação do modelo de fragmentação de rocha de Kuz-Ram em lavra de pedreira na produção de agregados para a

construção civil. Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora.

20. SILVA V. C. (2009) Operações Mineiras. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas Universidade Federal de Ouro Preto.

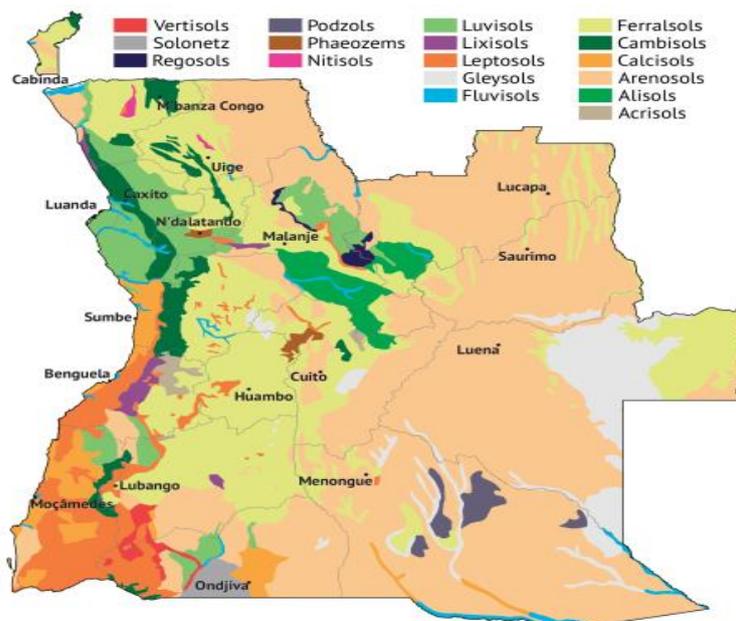
ANEXOS

ANEXO I – Mapa topográfico de Angola



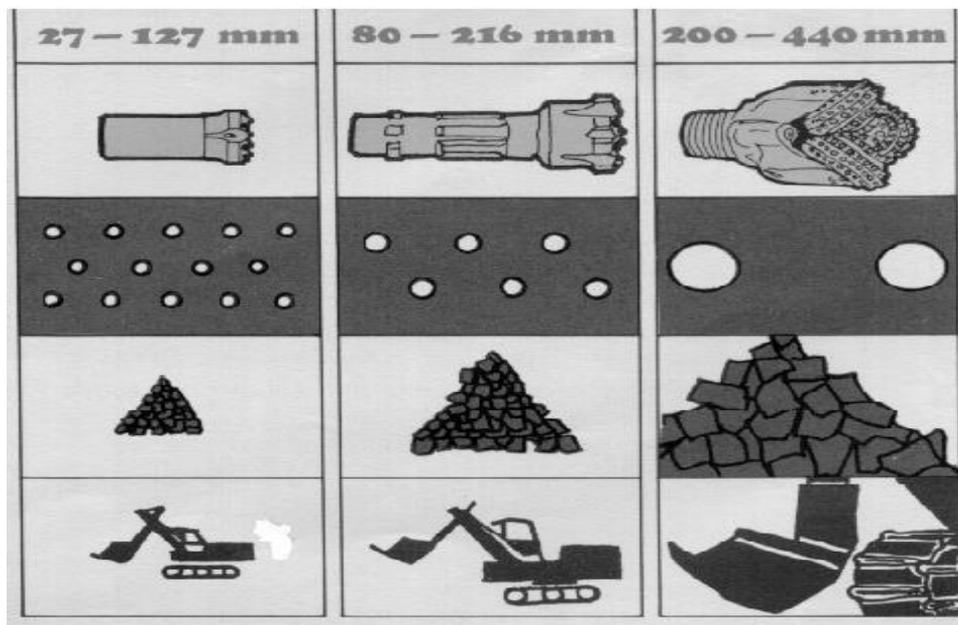
Fonte: Google.com

ANEXO II – Mapa de solos de Angola



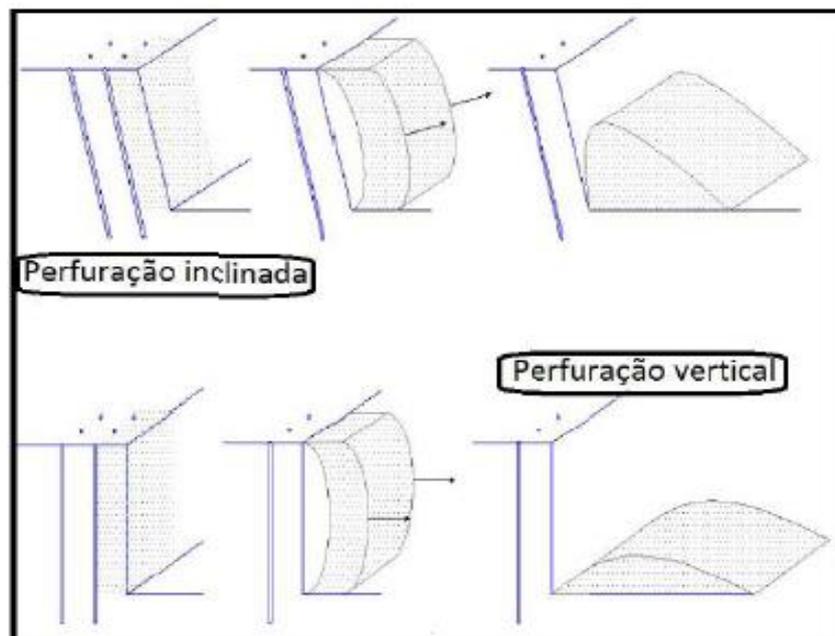
Fonte: Google.com

ANEXO III - Influência do diâmetro no nº de furos, na fragmentação da rocha, na geometria da pilha e no porte do equipamento de carregamento



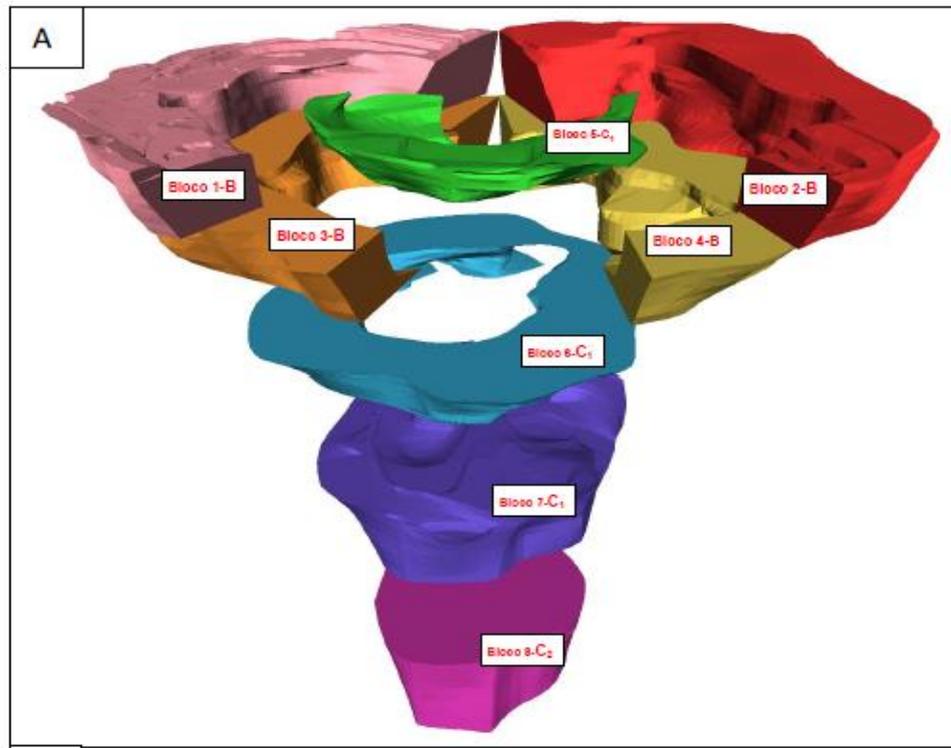
Fonte: SILVA (2009)

ANEXO IV - Efeito da inclinação dos furos no perfil da bancada e no lançamento do material desmontado



Fonte: Correia (2011)

ANEXO V - Blocos da chaminé da Mina de Catoca



Fonte: Coqueia, 2014

ANEXO VI – Emulsão encartucha do tipo Riogel Kupula usada na SMC



Fonte: Adaptado pela Autora

ANEXO VII – Retardadores de 25 ms usados na SMC



Fonte: Adaptado pela Autora

ANEXO VIII – Detonador Nonel (Não eléctrico) usado na SMC



Fonte: Adaptado pela Autora