



**UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE MINAS**



**TRABALHO DE FIM DE CURSO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA DE MINAS**

**IDENTIFICAÇÃO DOS FENÓMENOS NATURAIS QUE ORIGINAM A  
RUPTURA DE TALUDES NAS ROCHAS KIMBERLITICAS**

**CASO DE ESTUDO: MINA DE CATOCA**

**Elaborado por:** Manuel Jaime Miguel

Nº: 94194

**LUANDA, FEVEREIRO DE 2022.**

**UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE MINAS**

**IDENTIFICAÇÃO DOS FENÓMENOS NATURAIS QUE ORIGINAM A  
RUPTURA DE TALUDES NAS ROCHAS KIMBERLITICAS**

**CASO DE ESTUDO: MINA DE CATOCA**

Trabalho de fim de curso apresentado à Universidade Agostinho Neto, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia de Minas, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de licenciatura em engenharia de minas.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Augusto Domingos Cazola

**LUANDA, FEVEREIRO DE 2022.**

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, a quem dedico este trabalho, em especial a minha esposa Albertina Miguel, pelo apoio e paciência, e por todos os momentos que compartilhou e se dispôs incansavelmente para me ajudar. Aos meus filhos que expressam a razão da minha existência, reconheço aquele abraço que num dado momento tanto desejaram, mas não puderam merecê-lo, por conta da minha ocupação e dedicação aos estudos.

Ao meu irmão António Miguel, pelo sábio pensamento que tiveste de me ter colocado na escola, fazendo o papel de meu pai (de feliz memória), garantindo assim o início da minha carreira estudantil.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Augusto Domingos Cazola, por todo o apoio e disponibilidade demonstrada durante a execução deste trabalho e por ter sido incansável na orientação do mesmo, através da partilha do seu enorme conhecimento e experiência na área.

Aos meus amigos e colegas, pela alegria nas horas boas e pelo apoio nos momentos que sempre precisei, o meu muito obrigado.

## RESUMO

A estabilidade de um talude está relacionada não só com factores hidrogeológicos (presença de água), mas também com factores geométricos (altura e inclinação), factores geológicos (presença de planos e zonas de fraca resistência e anisotropia do talude) e factores geotécnicos relacionados com o comportamento mecânico do terreno (resistência e deformabilidade). A combinação dos factores citados pode determinar as condições de ruptura ao longo das superfícies cinematicamente mais viáveis. É possível agrupar este conjunto de factores em dois tipos: condicionantes e desencadeadores (Tabela 1). Os factores condicionantes ou passivos são factores intrínsecos a rocha que podem provocar a ruptura. Os factores desencadeadores ou activos são factores externos que actuam sobre o maciço rochoso modificando as suas características, propriedades e condições de equilíbrio do talude. O conhecimento de todos estes factores permite ao (projetista da mina para o nosso caso) uma correcta análise do talude, assim como a avaliação da estabilidade do mesmo, tomando medidas correctivas que deverão ser adoptadas para evitar ou estabilizar os movimentos do talude durante a escavação, (Margarida 2012). No presente trabalho para nos ser possível a descução de dados, foi necessário o calculo do índice SMR (Slope Mass Rating) ou seja, Classificação de Massa de inclinação, que nos permitiu fazer a comparação entre o fator de segurança calculados pelo **rocplane** e o SMR por nós calculado, permitindo assim classificar a qualidade do maciço rochoso da mina de Catoca.

**Palavras-chaves:** Estabilidade de talude, Instabilidade de talude, Kimberlito, Talude

## **ABSTRACT**

The stability of a slope is related not only to hydrogeological factors (presence of water), but also to geometric factors (height and slope), geological factors (presence of planes and zones of weak resistance and slope anisotropy) and geotechnical factors related to slope. the mechanical behavior of the terrain (strength and deformability). The combination of the aforementioned factors can determine the failure conditions along the most kinematically viable surfaces. It is possible to group this set of factors into two types; conditioners and triggers (Table 2.1). The conditioning or passive factors are factors intrinsic to the rock that can cause the failure. Triggering or active factors are external factors that act on the rock mass, modifying its characteristics, properties and slope equilibrium conditions. The knowledge of all these factors allows the (mine designer in our case) a correct analysis of the slope, as well as the evaluation of its stability, taking corrective measures that must be adopted to avoid or stabilize the slope movements during digging , (Daisy 2012). in the present work, for us to be able to describe data, it was necessary to calculate the SMR index, that is, slope mass classification, which allowed us to make a comparison between the safety factor calculated by rocpane and the SMR calculated by us, thus allowing the classification of the quality of the rock massif of the Catoca mine.

**Key words:** Stability of Tallude, Instability of Tallude, Kimberlito, Slope, Rock.

## **LISTA DE FIGURAS**



## **LISTA DE TABELAS**

## EPÍGRAFE

Só tem o direito de criticar aquele que pretende ajuadr. E antes de começar a criticar os defeitos dos outros, enumere ao menos dez dos teus.

Abraham Lincoln

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS .....	IV
LISTA DE TABELAS .....	VI
EPÍGRAFE.....	VII
1. INTRODUÇÃO .....	8
2- Tema .....	9
3- Problema .....	9
4- Objecto de estudo.....	9
5- Objectivo.....	9
5.1- Objectivo geral.....	9
5.2- Objectivos específicos .....	9
6- Hipótese .....	9
7 – Justificativa .....	9
8-Metodologia de trabalho .....	10
8.2- Técnicas e instrumentos de pesquisa no campo.....	11
CAPÍTULO I – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	12
1.1-Generalidade sobre os fenómenos naturais que originam a ruptura de taludes .....	12
1.2- Conceitos e definições .....	12
1.3- Estratigrafia e Litologia .....	14
1.4- Factores condicionantes e desencadeantes das instabilidades nos taludes nas Brechas Tufo Kimberlíticas e Granito Gnaiss Alterado.....	15
1.4.1- Influência da Água nos Taludes.....	16
<b>1.4.2- Porosidade</b> .....	17
1.4.3- Teor em água .....	17
1.4.4- Peso Volúmico e Densidade .....	18
1.4.5- Permeabilidade.....	18
1.5- Propriedades Geomecânicas dos Maciços Rochosos.....	18
1.6- Estado de Tensão .....	18
1.7-Análise de Estabilidade de Taludes .....	19
1.7.1- Mecanismos de ruptura.....	19

1.7.1.2- Ruptura Planar .....	20
1.7.1.3- Ruptura em Cunha .....	20
1.7.1.4- Ruptura por toppling.....	20
1.7.2- Ocorrências de ruptura na mina de Catoca .....	21
1.8- Instrumentação geotécnico usado para o monitoramento de talude.....	21
1.8.1- Análise da Estabilidade dos Taludes da Mina de Catoca.....	21
1.8.2- Localização dos taludes .....	22
1.8.3- Metodologia Adotada.....	23
1.8.4- Técnicas para estabilização de taludes.....	24
1.8.4.1 - Contenção de rupturas nos taludes da mina de catoca .....	24
1.9 – Reabilitação ambiental .....	24
<b>CAPÍTULO II – CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA MINA DE CATOCA .....</b>	<b>26</b>
2.1- Localização geográfica e administrativa da mina de Catoca .....	26
2.2 – localização do kimberlito da mina de catoca.....	26
2.2.1 – Vias de acesso .....	27
O local de estudo é acessível por diversas vias secundárias de terra batida que se encontram em constante manutenção, facilitando deste modo a deslocação das viaturas para a chaminé kimberlítica. ....	27
2.2.2 – Relevo .....	27
2.3– Morfologia e estrutura interna do corpo mineralizado.....	27
2.4 – Condições climáticas.....	28
2.5- Fauna e a flora.....	28
2.6- Enquadramento Geológico.....	29
2.7- Hidrografia e Características Climáticas da Região .....	31
2.8 – Enquadramento Geológico do jazigo .....	32
2.8.1- Rochas Encaixantes da mina de Catoca.....	32
2.8.2- Rochas Subjacentes da mina de Catoca .....	34
2.8.3- Métodos de desmonte .....	34
<b>CAPÍTULO III-CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS ...</b>	<b>36</b>
3.1 – Graus de fissuras .....	36
Tabela 2: Resultados do processamento das medições de fissuras efectuadas na zona aberta de rochas gnaisses no Kimberlito de Catoca.....	38
3.2- Classificação do maciço.....	38
3.2.1- Classificação do maciço rochoso segundo o seu estado de alteração .....	39
Tabela 3: Estado de alteração do maciço rochoso (ISRM, 1981). ....	39

Tabela 4: Estado de fracturação do maciço rochoso (ISRM, 1981).....	40
3.2.3- Classificação do maciço rochoso segundo a sua espessura.....	40
Tabela 5: Espessura das camadas (ISRM, 1981). .....	40
3.2.4- Classificação do maciço rochoso segundo a sua Resistência à compressão.....	41
Tabela 6: Resistência à compressão uniaxial da rocha (ISRM, 1981). .....	41
Tabela 7: Ângulo de atrito das descontinuidades (ISRM, 1981).....	41
3.2.5- Classificação do maciço rochoso segundo RQD .....	41
Tabela 8: Qualidade do maciço segundo o índice RQD. ....	42
3.2.6- Classificação de Bieniawski (Sistema RMR) .....	43
3.3 – Classificações das rochas encaixantes de acordo com as descontinuidades .....	43
3.4- Propriedades físicas das rochas da mina de Catoca .....	43
3.4.1 – velocidade de propagação de ondas longitudinais.....	44
Tabela 9: velocidade de propagação de ondas longitudinais $V_p^*$ ( $n = 0\%$ ).....	45
<b>CAPÍTULO IV- ANÁLISE DE DADOS</b> .....	46
4.1 Caracterização Realizada no Laboratório.....	46
4.1.1- Densidade pelo Método Hidrostático.....	46
4.1.2- Resistência à Compressão Uniaxial e Resistência à tração.....	47
4.1.3- Cálculos do Peso Específico Pelo Método do Picnómetro .....	49
4.1.4- Resultados obtidos nos ensaios.....	51
<b>Tabela 10:</b> Resultados do ensaio do peso volumétrico. ....	51
Tabela 11: Resultados do ensaio do peso específico com método picnómetro.....	51
Onde: .....	52
$P_{picnvazi}$ = Peso do picnométrico vazio; .....	52
4.1.5- Cálculo do Índice SMR.....	52
Tabela 12: Cálculo da frequência das descontinuidades. ....	53
Tabela 13: Cálculo do índice RMR.....	53
Tabela 14: Cálculo do índice SMR Romana (1993). ....	54
4.1.6 Dados comparativos .....	55
4.1.7 Análise e discussão dos resultados.....	55
Conclusões .....	57
Recomendações.....	58
Referência Bibliográfica .....	59





## 1. INTRODUÇÃO

A busca do material útil que se encontra no subsolo para a satisfação da necessidade humana constitui um dos desafios no mundo da mineração. Assim sendo, o homem preocupou-se em saber como atingir estes bens. Foi assim que encontrou dois métodos para alcançá-los: a céu aberto e subterrâneo.

Quanto ao primeiro método, importa-nos dizer que para o processamento do mesmo é dependente da execução de taludes, sobretudo nas rochas kimberlíticas. Neste caso, a análise de estabilidade de taludes chega a ser um tema com relevante importância na área de exploração de minério.

Tendo em conta a crescente necessidade de ocupar novos espaços ao longo da exploração resultantes do aumento da cava, provocando assim a instabilidade dos taludes, pondo em riscos a vida humana, os equipamentos, provocando assim, grandes prejuízos por parte do empreendedor, no caso de ter ocorrido ruptura de talude numa mina.

A busca de conhecimento sobre os fenómenos naturais que originam a ruptura de talude nas rochas “kimberlíticas” venha a ser o nosso objectivo.

Apesar de terem existido vários exemplos onde este tipo de análise é fundamental, tais como: em taludes naturais, taludes por bancadas, aterros, vias de comunicação, barragens, etc. O presente trabalho limitar-se-á na abordagem sobre os fenómenos naturais que originam a ruptura nos taludes das rochas Kimberlíticas, que tem como caso de estudo a Mina de Catoca.

Para a avaliação das condições de estabilidade de taludes têm sido usadas e revistas classificações geomecânicas, como a de Bieniaswlki que calcula o Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1989).

A estabilidade de um talude é directamente ligada à resistência da rocha e ao ângulo de talude. As discontinuidades geológicas constituem um fator determinante a instabilidade da massa rochosa nos taludes da mina.

As modificações geométricas induzidas pela escavação afectam a estabilidade do talude. (Fontinhas 2012).

## **2- Tema**

Identificação dos fenómenos naturais que originam a ruptura de taludes nas rochas kimberlíticas.

Caso de estudo: Mina de Catoca.

## **3- Problema**

O problema surge com o aparecimento de rupturas de taludes nas rochas kimberlíticas, provocando a instabilidade de taludes nas minas e consequentemente o risco de desabamento das bancadas.

## **4- Objecto de estudo**

Taludes da mina de Catoca.

## **5- Objectivo**

Para o presente estudo, traçou-se os seguintes objectivos:

### **5.1- Objectivo geral**

Estudar os fenómenos naturais que originam a ruptura de taludes nas rochas kimberlíticas.

### **5.2- Objectivos específicos**

- Identificar os fenómenos naturais que influenciam na ruptura dos taludes das rochas kimberlíticas;
- Caracterização geomecânica do maciço rochoso (kimberlítico);
- Classificação do maciço rochoso segundo as suas propriedades e características;
- Avaliação geomecânica do maciço rochoso (Kimberlítico);

## **6- Hipótese**

Se se identificar detalhadamente a origem da ruptura de taludes nas rochas kimberlíticas, será possível garantir a estabilidade de talude nas minas kimberlíticas.

## **7 – Justificativa**

A província da Lunda Sul é considerada uma das mais ricas com um potencial de ocorrências de diamantes e estas ocorrências é de origem primária e secundária.

Sendo que em alguns depósitos primários (hipogénicos cujo minério de origem profunda) e secundários (supergenéticos cuja formação de minério ocorre num meio estranho diferente daquele em que se originaram, embora não tenha sofrido qualquer modificação para além de uma individualização), foram feitos alguns trabalhos de pesquisa e prospecção que terminou com a delimitação e cálculo das reservas, tendo começado com a exploração do kimberlito de Catoca aos 11 de Fevereiro de 1997 com um tempo de vida inicialmente previsto para 40 anos até a profundidade de 400 m.

A existência de rochas de baixa dureza, descontinuidade das rochas, bem como o grau de fissuras das rochas em vários pontos da mina, constituem entre outras, as grandes complexidades para o processamento normal da execução de taludes, e esta complexidade aumenta a medida que vai aumentando a profundidade da mina. Por esta razão, pretendemos investigar sobre os fenómenos naturais que originam a ruptura de taludes das rochas kimberlíticas, concretamente na Mina de Catoca. De modo a contribuímos na eficiência dos trabalhos de mineração.

## **8-Metodologia de trabalho**

### **8.1- Colecta de informações pré-existente**

O trabalho científico deve ser iniciado por esquema prévio, discutido com o orientador directo da tese, com quem foi revisto gradualmente ao longo do desenvolvimento da presente investigação.

A análise de dados foi feita, com base nos dados obtidos em laboratório e observações de campo que posteriormente permitiram a determinação das famílias existentes no maciço rochoso, a resistência do material, e outros parâmetros necessários para a utilização dos programas Dip's, Roctopple e Rocplane.

Para os ensaios obtiveram-se 10 amostras de gnaisse e 8 amostras de granito recolhidos in situ em cada talude. O gnaisse foi retirado nos taludes da parte Norte da mina e as restantes amostras foram recolhidas nos taludes Sul, Sudeste e Sudoeste da mina.

A pesquisa bibliográfica teve como fontes principais as publicações em livros, apontamentos didácticos, trabalhos académicos como: monografias, teses, dicertações, publicações e revista de mineração. Essas fontes foram utilizadas no momento inicial

para identificar a relevância da pesquisa e os trabalhos similares publicados sobre o tema, objecto da nossa investigação, permitindo-nos a familiarização com o tema, de modo progressivo e crítico.

## **8.2- Técnicas e instrumentos de pesquisa no campo**

Para o presente trabalho, pela força imperativa da covid-19, não foi realizado um conjunto de observações directas tais como: entrevistas, com os chefes de departamentos, engenheiros, geólogos, supervisores, técnicos e trabalhadores da empresa (Mina de Catoca), etretanto, o conjunto das informações que o presente trabalho despõe, foi obtido de forma indirecta, por meio de Internet, descarga de fotografias e informações diversas por via whatsapp, com vista a obter os dados requeridos no presente trabalho.

## **CAPÍTULO I – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **1.1-Generalidade sobre os fenómenos naturais que originam a ruptura de taludes**

A ruptura de talude está ligada a vários fenómenos e forças que actuam sobre o maciço rochoso, diminuindo assim a sua resitência.

Vários acontecimentos de desabamento das encostas se deram a nível do mundo e verifica-se que estes acontecimentos catastróficos não acontecem apenas nas encostas, mas também pode ocorrer nos taludes de corte ou artificial, quando não se tem em conta a estabilidade de uma referida inclinação, na qual se pretende efectuar diferentes tipos de trabalho de engenharia (mineração para o nosso caso).

### **1.2- Conceitos e definições**

Fenómeno: é qualquer modificação dos corpos (rocha) por acção de agentes físicos ou químicos. Entre vários fenómenos que actuam numa rocha, em alguns casos podem actuar de forma combinada desencadeando o fenómeno que se chama Intemperismo.

Intemperismo: conjunto de fenómenos físicos e químicos que levam à degradação e enfraquecimento das rochas.

Intemperismo físico: consiste na ocorrência de processos que são responsáveis pelas fragmentações ou fissuras nas rochas, separando minerais antes ordenados de forma coesa e transformando uma superfície então homogênea em uma rocha descontínua.

Intemperismo químico: é a dissolução das rochas ou a alteração **química** dos minerais que fazem parte delas. Esse processo é geralmente causado pela água, que se mistura com materiais orgânicos, reage com o gás carbônico e forma uma substância ácida que dissolve nas rochas.

Talude: pode ser definido como uma superfície inclinada que delimita um maciço terroso ou rochoso. O talude possui cinco (5) elementos ou parâmetros principais que são: talude, crista, pé de talude, ângulo de talude ou ângulo de inclinação e a altura. Como mostra a figura 1.



**Figura 1:** Talude com os seus parâmetros

O Talude pode ser natural ou artificial como podemos verificar nas figuras 2 e 3.



**Figura 2:** Talude natural



**Figura 3:** Talude Artificial

Ruptura: corresponde a abertura, buraco ou fenda que aparece nas rochas.



**Figura 4:** Exemplo de ruptura nas rochas

**Rocha:** é agregado compactado de um ou mais minerais com estrutura uniforme ou não, que faz parte da crosta terrestre.



**Figura 5:** Exemplo de uma rocha ígnea

### 1.3- Estratigrafia e Litologia

A Litologia do material de talude está intimamente ligado ao tipo de instabilidade que neste pode ocorrer. Diferentes tipos de litologias geram distintas superfícies de deslizamento ou de ruptura. As propriedades físicas e resistentes do material, juntamente com a presença de água, condicionam os estados de tensão e deformação e, como tal, a sua estabilidade. Aspectos como a estratigrafia do terreno, competência e grau de alteração ou a presença de camadas de material mais brando ou de estratos duros controlam os tipos e a posição das superfícies de ruptura o que torna a caracterização e análise do comportamento de um talude muito mais complexa.

A estrutura geológica tem um papel decisivo nas condições de estabilidade em maciços rochosos, nomeadamente em taludes. A combinação dos elementos estruturais e dos parâmetros geotécnicos de talude (altura, inclinação e orientação) definem os problemas de instabilidade. A estrutura do maciço é definida pela distribuição espacial das discontinuidades que individualizam blocos mais ou menos competentes que se mantêm unidos entre si dependendo das propriedades resistentes das superfícies de discontinuidades. A presença destes planos de fraqueza inclinados em direcção à face de talude supõe a existência de potenciais planos de deslizamento e superfícies de ruptura.

A orientação e disposição desses planos de fraqueza condicionam os modelos e mecanismos de instabilidade. A Influência da estrutura geológica vai mais além que o condicionamento geométrico das rupturas, podendo as modificações geométricas induzidas pela escavação afectar a estabilidade da talude. (Fontinhas 2012).

#### **1.4- Factores condicionantes e desencadeantes das instabilidades nos taludes nas Brechas Tufo Kimberlíticas e Granito Gnaisse Alterado**

São vários os factores ou mecanismo que levam a ruptura de um talude, tais factores, levam um aumento dos esforços actuantes ou uma diminuição da resistência do material que compõe o talude ou do maciço rochoso como um todo.

O material que compõe um talude tem a tendência de escorregar sob a influência da força da gravidade, entre outras que são suportadas pela resistência ao cisalhamento do próprio material.

Os factores mais importantes que condicionam as instabilidades dessas formações kimberlíticas são:

Factores externos:

- Mudança da geometria de talude (inclinação e/ou altura), devido a cortes ou aterros, no talude ou em aterros adjacente, erosão;
- Aumento das cargas actuantes (por sobrecargas na superfície ou incremento da altura por exemplo, ou seja, aumento da altura do talude, através da escavação no pé ou da construção de um aterro na crista);
- Variação da temperatura e humidade, podendo conduzir a abertura de fendas superficiais no solo, que favorecem a infiltração de água nos terrenos.
- Choques e vibrações;
- Erosão interna, provocada pela circulação de água no interior de talude;
- Diferentes tipos de erosão superficial do terreno, favorecendo a infiltração de água;
- Efeito da sobrecarga que causa uma perda de resistência do maciço de talude;

Factores internos:

- Variação do nível de água (N.A), que pode gerar:
- Aumento do peso específico do material;
- Aumento da poro-pressão – diminuição da pressão efectiva;
- A saturação das areias faz desaparecer a coesão;
- Rebaixamento rápido do N.A – forças de percolação...
- Diminuição da resistência do solo (ou rocha), ou do maciço rochoso como um todo, com o tempo (por mudança nas discontinuidades, etc.);
- Aumento das tensões de origens tectónicas.

A instabilidade de um talude está relacionada não só com factores hidrogeológicos (presença de água), mas também com factores geométricos (altura e inclinação), factores geológicos (presença de planos e zonas de fraca resistência e anisotropia de talude) e factores geotécnicos relacionados com o comportamento mecânico do terreno (resistência e deformabilidade). A combinação dos factores citados pode determinar as condições de ruptura ao longo das superfícies. É possível agrupar este conjunto de factores em dois tipos: condicionantes e desencadeadores como anteriormente dito.

Os factores condicionantes ou passivos são factores intrínsecos à rocha que podem provocar a ruptura. Os factores desencadeadores ou ativos são factores externos que actuam sobre o maciço rochoso modificando as suas características, propriedades e condições de equilíbrio de talude. O conhecimento de todos estes factores permite tomar medidas correctivas que deverão ser adoptadas para evitar os movimentos ou deslize de talude durante a escavação.

**Tabela 1: Factores que influenciam a instabilidade de taludes**

<b>Factores condicionantes</b>	<b>Factores desencadeadores</b>
<b>Estratigrafia e litologia</b>	Sobrecargas estáticas
<b>Estrutura geológica</b>	Cargas dinâmicas
<b>Condições Hidrológicas</b>	Mudança nas condições hidrológicas
<b>Propriedades físicas</b>	Factores climáticos
<b>Resistência e deformabilidade</b>	Variação na geometria
<b>Tensões naturais e estado de tensão-deformação</b>	Redução de parâmetros resistente

**Fonte:** Adaptado por Vallejo et al. (2002).

#### **1.4.1- Influência da Água nos Taludes**

A maioria das rupturas em taludes ocorre essencialmente devido ao efeito da presença de água no terreno. A geração de pressões, o arraste e erosão (superficial ou interna) dos materiais que formam o talude, são algumas causas dessa instabilidade. Em

geral, é possível afirmar que a água é um factor potenciador da instabilidade de taludes. As acções humanas quando são realizadas escavações inadequadas, sem critérios geotécnicos, são também, evidentes fenómenos potenciadores de instabilidade. (Vallejo-2002).

A presença de água num talude em rocha pode induzir a instabilidade.

- As pressões intersticiais reduzem a resistência ao corte dos planos de ruptura;
- As pressões exercidas sobre fendas de tração aumentam as forças que facilitam o deslizamento;
- Aumento do peso do material por saturação.

#### 1.4.2- Porosidade

A porosidade é a propriedade índice que mais afecta as características resistentes e mecânicas da rocha, sendo esta inversamente proporcional à resistência e à densidade e directamente proporcional à deformabilidade, já que a existência de vazios pode dar lugar a zonas de fraqueza. A porosidade pode variar entre 0 e 100%, sendo comum apresentar valores entre 15 e 30% nas rochas. O valor da porosidade  $n$ , calcula-se pela expressão 1.1, sendo esta a relação entre o volume ocupado pelos vazios da rocha ( $V_v$ ) e o volume total ( $V_t$ ).

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \quad (1.1)$$

#### 1.4.3- Teor em água

O teor em água na rocha é um índice de muita utilidade no estudo do comportamento geotécnico de rochas brandas. Esta grandeza afecta significativamente a resistência à compressão da rocha, isto porque a presença de água no interior do maciço leva a uma redução de tensões efectivas e consequente diminuição de resistência do maciço rochoso (Romana & Vásárhelyi, 2007). É recomendado que a resistência da rocha intacta, seja calculada com o ensaio à seco. Por isso, as pressões intersticiais instaladas e a sensibilidade do maciço perante a presença de água devem ser contabilizadas aquando efectuado o projeto de estabilidade (Vásárhelyi & Ván, 2006). O teor em água ( $w$ ) é quantificado pela razão entre o peso da água presente numa determinada amostra ( $W_w$ ) e o seu peso seco ( $W_s$ ), dado em percentagem (%):

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1.2)$$

#### **1.4.4- Peso Volúmico e Densidade**

O peso volúmico ( $\gamma$ ) é definido como o peso por unidade de volume da rocha. Este parâmetro depende da composição mineralógica, porosidade e quantidade de água podendo ser definido pela expressão:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1.3)$$

Em que W é o peso total da amostra e V é o volume da amostra de rocha. O valor do peso volúmico é de extrema importância, pois permite determinar o estado de tensão do maciço em qualquer ponto.

#### **1.4.5- Permeabilidade**

Os ensaios mais comuns e mais versáteis para determinar a permeabilidade de maciços rochosos são os Lugeon, que consistem em injectar água sob patamares de pressão num troço do furo de sondagem de comprimento conhecido e em medir a absorção de água do maciço durante um certo tempo. A realização do ensaio permite traçar curvas caudal versus pressão (Q-P) em cada patamar de pressão, dando informação sobre o regime de percolação do maciço rochoso, assim como obter informação quanto ao estado de fracturação nas imediações do trecho ensaiado.

#### **1.5- Propriedades Geomecânicas dos Maciços Rochosos**

A instabilização de um talude numa determinada superfície de ruptura depende da resistência ao corte dessa mesma superfície, que é definida pelos parâmetros resistentes: coesão (c), e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ). Nos maciços rochosos, são as propriedades resistentes das discontinuidades, da matriz rochosa, ou ambas, que controlam o comportamento do talude. Os parâmetros resistentes dependem da estrutura geológica e das condições das discontinuidades presentes no maciço.

#### **1.6- Estado de Tensão**

O estado de tensão do terreno tem um papel importante na estabilidade de taludes rochosos. A libertação de tensões em resultado da escavação de um talude origina uma descompressão do material rochoso induzindo deslocamentos e promovendo a fragmentação do material rochoso. Outros factores que podem causar instabilidade nos taludes, resultam das sobrecargas estáticas e das cargas dinâmicas. Estas modificam a distribuição de tensões e podem potenciar a instabilidade. Entre as

primeiras, estão o peso das estruturas, ou mesmo a passagem de veículos pesados. Nas cargas dinâmicas incluem-se principalmente movimentos sísmicos, naturais ou induzidos, como vibrações produzidas por explosões próximas de talude. Em taludes sujeitos a este tipo de cargas que devem ser incluídas na análise de estabilidade.

## **1.7-Análise de Estabilidade de Taludes**

O objectivo, numa análise de estabilidade de taludes, é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento do maciço em taludes naturais ou de escavação. A análise de estabilidade permite definir a geometria da escavação ou as forças externas que devem ser aplicadas de forma que o factor de segurança seja conseguido. No caso de taludes instáveis, a análise permite desenvolver medidas correctivas ou de estabilização, de forma a evitar novos movimentos de talude.

### **1.7.1- Mecanismos de ruptura**

Diferentes mecanismos de ruptura de taludes estão associados às diferentes estruturas geológicas encontradas no terreno, como discutido anteriormente, é importante que o projetista seja capaz de identificar o potencial mecanismo de ruptura a que o talude está sujeito numa fase inicial do projecto (Wyllie & Mah, 2004).

A identificação do mecanismo de ruptura mais provável é feita através da análise dos dados mais relevantes da estrutura geológica, em sobreposição com a geometria de talude, com o objectivo de determinar padrões que representem o tipo de ruptura provável. Para o projectista, é importante conseguir distinguir entre os quatro tipos de ruptura aqui apresentados, isto porque para cada ruptura, a análise de estabilidade é efectuada de modo distinto (Hoek & Londe, 1974).

Contudo, há que referir que nem todos os potenciais modos de ruptura podem ser antecipados, pois algumas características geológicas podem não se encontrar expostas ou podem não ter sido detectadas na prospecção geotécnica. Como tal, o projectista deve, por isso, fazer uma previsão financeira de forma a conseguir tratar de problemas inesperados que podem surgir durante a fase de exploração. Devem também ser garantidos meios a curto prazo para a implementação de qualquer medida correctiva que possa ser necessária (Hoek & Londe, 197).

### **1.7.1.2- Ruptura Planar**

A ruptura planar é um acontecimento relativamente raro em taludes de rocha, isto porque só ocasionalmente é que se reúnem todas condições geométricas para que este tipo de ruptura aconteça. Contudo, este tipo de ruptura não pode ser ignorado. Uma ruptura planar ocorre quando as descontinuidades do maciço vão de encontro à face de talude, permitindo o deslizamento do material acima da descontinuidade, seja por gravidade, seja pela acção de outras forças.

### **1.7.1.3- Ruptura em Cunha**

A ruptura em cunha é gerada a partir de duas famílias de descontinuidades distintas, cuja intersecção proporciona o colapso de parte de talude. Neste caso, as condições e orientações das diferentes famílias de descontinuidades é que determinam o acontecimento.

Quando as superfícies de descontinuidades se intercetam, definem um bloco potencialmente instável. Este tipo de ruptura, contrariamente ao da ruptura planar, é bem mais frequente em taludes rochosos.

### **1.7.1.4- Ruptura por toppling**

A ruptura por toppling envolve a rotação de estratos de rocha para a face do talude. Cada coluna tende a rodar segundo o seu peso próprio em direcção ao pé de talude. Para uma ruptura por toppling (quedas de blocos) ocorrer, a inclinação da estratificação à face de talude tem que ser suficientemente grande para que haja deslizamento interior. Caso estas rupturas não sejam controladas, um grande volume de material rochoso pode estar envolvido. Vale dizer que podem ser encontradas diferentes formas de toppling, tais como:

- Toppling por flexão: relacionado com estratos contínuos de rocha, separados por descontinuidades com forte inclinação que se quebram por flexão ao dobrarem-se para a frente. O início do toppling pode ocorrer através do deslizamento ou erosão do pé de talude, criando fendas de tracção largas e profundas;

- Toppling de blocos: verifica-se em estratos individuais com descontinuidades espaçadas. Os blocos que se encontram no pé de talude recebem o esforço dos blocos acima (transferência de carga), empurrando-os para frente. Degraus formados na base do maciço são característicos desta classe de desmoronamento.

### 1.7.2- Ocorrências de ruptura na mina de Catoca

Importa-nos aferir que apesar das rochas kimberlíticas serem de origem magmática e considerada bastante dura, ainda assim ocorrem rupturas nos taludes efectuados nestas rochas como podemos observar na figura abaixo. De notar que as rupturas em taludes na mina de Catoca, ocorrem predominantemente nos taludes de rochas do tipo kalahari.

Zona de ruptura de um talude na mina de Catoca



**Figura 6:** Zona de ruptura de um talude na mina de Catoca (Fonte: Catoca)

### 1.8- Instrumentação geotécnica usado para o monitoramento de talude

- Estações reflectores e extensómetros de cabo: detecta deslocamento superficial através de prisma;
- Inclínómetros: são usados para localizar a profundidade da superfície de ruptura com deslocamento horizontal;
- Piezómetros: utilizado para o controlo da variação do lençol freático.

#### 1.8.1- Análise da Estabilidade dos Taludes da Mina de Catoca

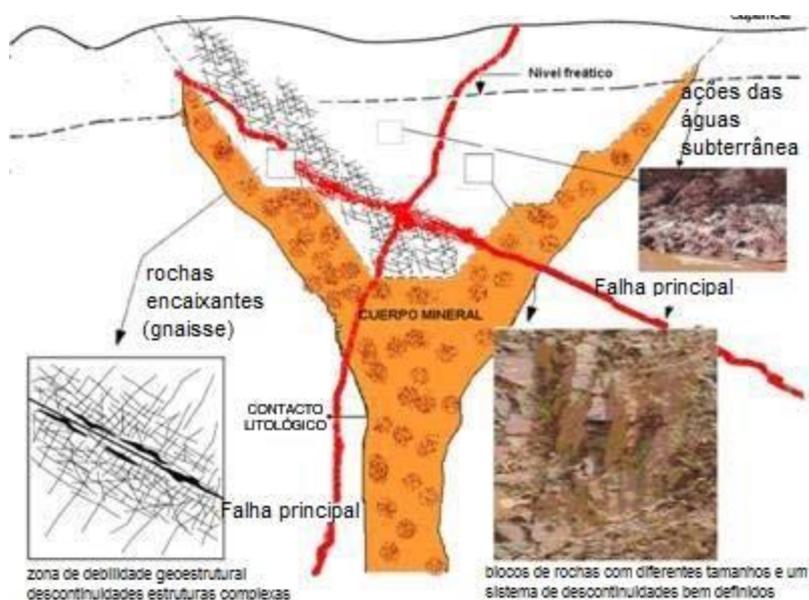
Segundo (Margarida 2012), ocorrem deslizamentos de formas diversas nos taludes e nas encostas. Refere-se a existência de mecanismos complexos, condicionados pelas características intrínsecas dos solos e rochas (geologia, estrutura, comportamento geotécnico, influenciado pelas condições climáticas e acções humanas). As condições geológicas do jazigo são a principal condicionante da instabilidade, dada a existência de uma grande diversidade litológica.

O estado de tensão efetiva é condicionado pela presença de águas subterrâneas, por sua vez o nível freático é condicionado pelos rios da região em particular o rio Lova. A abertura e exploração da mina de Catoca provocou uma mudança brusca no

nível freático originando movimento da água para os taludes operacionais, originado uma carga hidrostática e hidrodinâmica que contribui para instabilização dos taludes.

A permeabilidade do maciço rochoso é um dos factores mais importantes que regem a estabilidade dos taludes na mina de Catoca, a distribuição espacial dos tipos de rocha as descontinuidades e a presença da água no talude fazem com que os mesmos sejam motivos de grande preocupação na exploração e na sua estabilidade. Na figura 7, distinguem-se três elementos importantes na análise de estabilidade:

1. Descontinuidades existentes que actuam formando zonas com diferentes respostas à estabilização;
2. A intersecção de descontinuidades formando blocos com diferentes tamanhos, estrutura e textura, grau de alteração;
3. A presença da água subterrânea principalmente em épocas chuvosas aumenta a instabilidade do maciço e potencia os movimentos de massas nos taludes da mina.



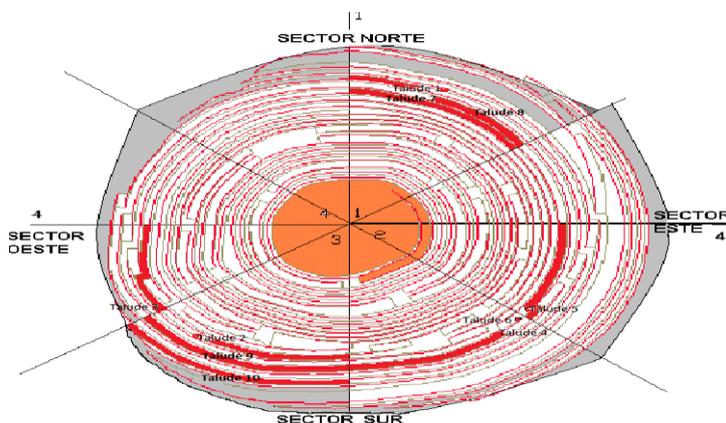
**Figura 7:** Esquema do maciço rochoso na Mina de Catoca.

Fonte: (adaptado Margarida 2012).

### 1.8.2- Localização dos taludes

A zona de estudo selecionada para analisar a instabilidade de taludes rochosos kimberlíticos localiza-se nos horizontes 910 e 920 da mina nas direcções Norte, Sul,

Sudoeste e Sudeste (figura 8). Selecionaram-se 10 taludes para a realização de medições e ensaios assim como recolha de amostras.



**Figura 8:** Representação dos taludes estudados

**Fonte:** (Margarida 2012).

### 1.8.3- Metodologia Adotada

Para este trabalho foi realizado um conjunto de observações para cada talude selecionado com vista à determinação dos parâmetros físicos e geométricos dos maciços rochosos. As medições das aberturas e espaçamentos foram executadas com auxílio de fita métrica. Para a orientação dos taludes foi utilizada uma bússola eletrónica. A rugosidade, o estado de meteorização e preenchimento foram determinados por observação em campo e recorrendo classificações propostas pela ISMR (1981) e por Bieniawski (1989) para essas características. Para a determinação da resistência do material (rocha), recorreu-se a recolha de blocos a fim de em laboratório, se proceder à execução de ensaios de resistência à compressão uniaxial.



**Figura 9:** Metodologia utilizada para medições de abertura e espaçamento.

**Fonte:** Catoca

#### **1.8.4- Técnicas para estabilização de taludes**

- Redução do peso do talude: corresponde a suavização de inclinação do ângulo de talude; Execução de patamares;
- Berma de talude: são aterros complementares ao pé do talude consiste em aumentar o peso no pé do talude;
- Drenagem superficial ou profunda: é uma das técnicas de estabilização e é uma das primeiras a serem pensadas, porque é mais barata, porque antes de se fazer uma contenção linda e maravilhosa, é importante pensar nas técnicas mais económicas e viáveis. Consiste apenas em criar canaletas no interior do maciço, assim como sucção de água com bobas hidráulica;
- Revestimento de talude com vegetação: protecção sobre erosão superficial;
- Adição de material estabilizante como injeção de naves de cimento bem como outros produtos químicos e a inserção também de grampos, ancoragem ou um outro modo de contenção.

##### **1.8.4.1 - Contenção de rupturas nos taludes da mina de catoca**

- Conforme as recomendações do departamento de mina do Catoca, para prevenir desprendimentos de rochas, de infiltração e arrastamentos de erosão interna de taludes das banquetas construídas em areias do kalahari e em sedimentos de inter-formações, as banquetas devem ser carregadas por toda a altura com uma camada de rochas filtrantes, da possança (espessura) não menos que 0,5m.
- É necessário construir bermas de protecção para as banquetas completamente drenadas construídas em areias do kalahari e em sedimentos de inter-formações de rochas fracas iguais a 2m.
- É necessário continuar o estudo de estrutura tectónica do maciço, elementos de jazigo da xistocidade, paraclases, de carácter e grau da fissuração de gnaisses por área e profundidade de seu desenvolvimento dentro de bordos da mina aberta.

#### **1.9 – Reabilitação ambiental**

Tratando-se de um projecto kimberlítico em que as actividades estão confinadas numa só área, em termos ambiental, o projecto não apresenta riscos avultados.

A maior actividade ambiental tem sido o combate contra a contaminação das águas do rio Lova e a constante manutenção das bacias de decantação.

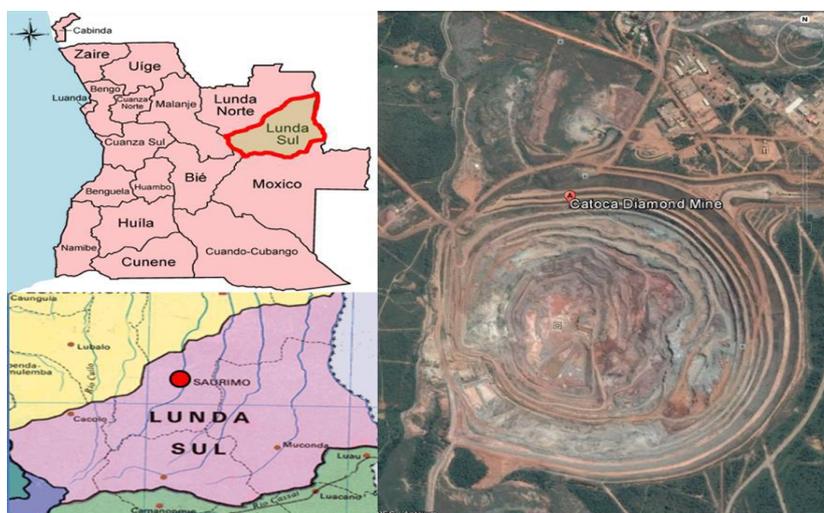
A mina possui 4 escombreyras (Escombreyra: Norte, Sul, Este e Oeste), das quais actualmente só a escombreyra Oeste está activa devido a redução do volume de estéril e contenção de custos.

## CAPÍTULO II – CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA MINA DE CATOCA

### 2.1- Localização geográfica e administrativa da mina de Catoca

A Lunda- Sul é uma das 18 províncias de Angola, localizada na região leste do país, com capital na cidade de Saurimo no município do mesmo nome, fundada em 1895.

A província possui uma superfície de 77.636 km<sup>2</sup> com população estimada em cerca de 609.851 habitantes, que corresponde a uma densidade populacional igual a 1.67 ha/km<sup>2</sup>. É composta por quatro (4) municípios (Cacolo, Dala, Muconda e Saurimo).



**Figura 10:** Localização da área de estudo

**Fonte:** Relatório de Catoca [2001]

### 2.2 – localização do kimberlito da mina de catoca

A sociedade mineira de Catoca situa-se no Nordeste da República de Angola, na parte noroeste da província da Lunda Sul, próximo da cidade de Saurimo, numa distância de 35 km e cerca de 800 km de Luanda.

O território da área de concessão da SMC encontra-se dentro da folha topográfica 121-SG34 (escala 1:1.000.000) do Cadastro Topográfico do Estado Angolano, numa região situada nos limites entre as Lundas Norte e Sul, e ocupa uma área de 340 km<sup>2</sup>, delimitada por coordenadas de 20°15'00" – 20°24'15" de longitudes Este e 9°18'00" – 9°29'20" de latitudes Sul. As coordenadas geográficas da chaminé de Catoca são: 20°18' de longitude Leste e 9°25' de latitude Sul.

### **2.2.1 – Vias de acesso**

O acesso à região da Lunda Sul pode ser feito tanto por via aérea como terrestre. Por via aérea, utilizam-se aviões de pequeno e grande porte que aterram no aeroporto do Saurimo, e por via terrestre, através da estrada nacional nº 230.

O local de estudo é acessível por diversas vias secundárias de terra batida que se encontram em constante manutenção, facilitando deste modo a deslocação das viaturas para a chaminé kimberlítica.



**Figura 11:** Aeródromo da Sociedade Mineira de Catoca

**Fonte:** Relatório de catoca [2001]

### **2.2.2 – Relevô**

Está constatado que o campo kimberlito de Catoca encontra-se num nó de cruzamento de ramos pertencentes às zonas de fracturação abissal das categorias continental, regional e local. Esse nó é caracterizado também por presença de vestígios duma estrutura anelar de 40 km em diâmetro, no epicentro da qual está situada a chaminé de Catoca. O facto de quase todos esses acidentes perder a sua revelação em relevo, ao se aproximarem do centro da estrutura, pelo que o bloco inteiro aparenta pouca perturbação. É com ele que também se relaciona posicionalmente uma anomalia local do campo magnético de intensidade reduzida, o que confirma um possível desenvolvimento nessa área das rochas mais modificadas, resultante do funcionamento da coluna tectono-magmática transcrustal.

### **2.3– Morfologia e estructura interna do corpo mineralizado**

A chaminé kimberlítica de Catoca é um corpo kimberlítico sem pares, que no seu interior contem mais de 300 milhões de metros cúbicos de produtos de magmatismo kimberlítico. É caracterizada por disponibilidade do conjunto integral de todos os

elementos morfológicos (canal de adução, diatrema e cratera) e de todos tipos geológico-genéticos das rochas kimberlíticas (kimberlitos e brechas kimberlíticas com a textura maciça do cimento, brechas kimberlíticas autolíticas, brechas tufáceas kimberlíticas, formações vulcanogénico-sedimentares e epiclásticas de composições mistas).



**Figura 12:** Extrutura interna do corpo mineralizado

**Fonte:** Relatório do Catoca (2001)

#### **2.4 – Condições climáticas**

O clima da região é tropical, tendo duas principais estações típicas durante o ano: a época das chuvas, que predomina desde o final de Agosto até os primeiros dias de Maio, e a estação seca que se prolonga de Maio a Agosto. A temporada mais chuvosa incide nos meses de Novembro a Março. A máxima temperatura registada é de (+37,4°C), a mínima (+11,6 °C). A temperatura diária média, durante o ano, constitui (+22,5°C) (+22,8°C). A velocidade média do vento cifra-se em 2,0-2,5 m/s, enquanto os valores máximos vão até 16,6-18,4 m/s.

#### **2.5- Fauna e a flora**

A vegetação da área é representada por savana típica, estepe tropical com uma abundância de cobertura herbácea, raras árvores e arbustos que formam moitas nas bordas dos rios e vales. A diversidade da fauna compreende mamíferos de grande porte, aves diversas, reptéis, peixes e outros numerosos grupos de vertebrados.



**Figura 13:** Vegetação da região das Lundas  
**Fonte:** Relatório de catoca [2001]

## 2.6- Enquadramento Geológico

Em termos da estrutura tectónica, a região situa-se na parte Sudoeste do escudo cristalino Cassai, da idade arqueano-proterozoica, confinando com a parede da depressão meso-cenozoica do Congo. Geomorfologicamente, o território da região está localizado na parte Leste do planalto da Lunda, onde estão desenvolvidas as rochas da capa de plataforma. No Sector Angolano da Plataforma Africana, distinguem-se dois andares estruturais. (IVANOUCHKINE 1997):

- O inferior, representado por embasamento cristalino e composto por rochas do Arqueano e Proterozoico Inferior;
- O superior, representado por um complexo das rochas da capa de plataforma, do proterozoico superior, paleozoico, mesozoico e cenozoico.

O Complexo Arqueano (AR) compreende as rochas da série metamórfica, das fácies granulítica e anfibólica do metamorfismo regional (gnaisses, xistos cristalinos, anfibolitos; mais raramente – eclogitos, quartzitos, leptitos e quartzitos ferruginosos) e rochas enderbito-tonalíticas da zona de granitização ultrametamórfica (tonalitos, plagiogranitos, enderbitos e charnoquitos) do Arqueano inferior e rochas metassedimentares das fácies anfibólica, epídoto-anfibólica e xisto verde. Dentro dos limites do escudo Cassai, estas últimas são referidas à parte superior do chamado “complexo basal”, ou à parte inferior das séries metamórficas do Nordeste de Angola. São insuficientes os conhecimentos da composição, espessura e estrutura interna das rochas do Arqueano Superior.

Proterozoico Inferior. Grupo Lunda e Luana. Rochas da origem metamorfogénico-sedimentar que jazem discordantemente nas rochas arqueanas. No Norte da região, no embasamento dessas rochas é observada a alternância dos gnaisses,

xistos anfibólicos e leptitos. Mais alto no corte, ocorrem xistos filíticos (com os conglomerados interformacionais); quartzitos e rochas carbonáticas silicificadas. A parte superior do corte é composta por conglomerados, xistos filíticos, grauvacas e grés. Na parte Sul da zona (na cabeceira do rio Cassai), o corte está representado por xistos argilosos, quartzitos, arcózios, chertes e grés, furados por intrusões de gabros e doleritos. No intervalo até o Cretáceo, não há formações geológicas na área de Catoca. Nas publicações os geólogos da DIAMANG destacam a existência, nas partes Norte do escudo Cassai, dos sedimentos da formação triássica, referidos ao sistema Karroo e sistema intercontinental.

Mesozoico. Sedimentos Continentais Cretáceos. Formação Calonda. As formações continentais cretáceas encontram-se preservados dentro dos limites da baixa do Congo e possuem uma especial importância, pois é com elas que se relacionam os plácemes diamantíferos. Estão situadas no Norte de Angola e são subdivididas em formações Calonda e Quango. Dentro da área em análise, estão desenvolvidas rochas da formação Calonda, essa formação foi destacada pelos geólogos da Cia DIAMANG e em termos da sua idade, foi vinculada ao intervalo apsiânico-álbico. É composta por sedimentos aluviais, alúvio-lacustres e lacustres (predominantemente arenitos arcósicos de grão fino até grosso). Mais abaixo, são observados conglomerados polimíticos, silitos e argilitos. As rochas são fracamente cimentadas, friáveis, a sua cor varia principalmente da parda-avermelhada à violeta. Ocorrem algures as intercalações pequenas ou lentes dos conglomerados diamantíferos interformacionais. A espessura da formação cresce na direção do Sul ao Norte e vai até 40-50 m.

Sedimentos Paleogéneo-Eocénicos. Grupo Calahári. Caracteriza-se por um vasto desenvolvimento de lateritos que se formaram nas superfícies pós-cretáceas de peneplanização. Estão representados por rochas silicificadas, arenitos polimorfos, conglomerados de cores branca, amarela, violeta, raramente vermelha.

O território mais estudado em termos de revelação dos corpos kimberlíticos e avaliação das perspectivas das mesmas, é a área que se estende ao longo dos rios Luembe, Chiumbe, Luachimo e Chicapa. Estruturalmente, essa região abrange a ladeira Oeste do escudo cassai. Nessa área são conhecidas mais de 70 chaminés agrupadas em quatro campos kimberlíticos: Camafuca-Camazambo (19 chaminés), Camútue (15 corpos), Camagia (8) e Catoca (32). O campo kimberlítico de Catoca está localizado na

bacia do rio Chicapa e tem a orientação submeridional entre os "pipes" conhecidos do campo, o maior é a chaminé de Catoca. (IVANOUSHKINE et al 1997).

## **2.7- Hidrografia e Características Climáticas da Região**

A rede hidrográfica da região também está orientada na direcção Norte e faz parte da bacia duma grande artéria fluvial – rio Congo. São os rios Luembe, Chicapa, Luachimo, Chiumbe, Luxico e outros que correm sob paralelamente do Sul ao Norte. Os vales dos mesmos são abertos e têm formas de U e V. São rios de médio comprimento, frequentemente com pedregais, são impróprios para navegação, possuem recursos hídricos potenciais, neste aspecto, o mais atractivo é o rio Chicapa que corre ao longo do limite Leste da área de concessão de Catoca, onde foi construída uma Central Hidroeléctrica que fornece a energia eléctrica para SMC e para a cidade de Saurimo, sede da província da Lunda Sul. O caudal destes rios varia segundo as estações do ano. No período seco (Junho-Agosto) apresentam um caudal mínimo, enquanto no tempo chuvoso (Setembro-Novembro), o caudal aumenta consideravelmente.

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. A caldeira está encerrada no Norte, Leste e Sul e aberta no Oeste. As cotas absolutas do relevo na superfície terrestre rondam de 1065 m (área do aeroporto) até 950 m no leito do rio Lova.



**Figura 14:** Quedas do rio Chicapa

**Fonte:** Relatório de Catoca [2001]

## 2.8 – Enquadramento Geológico do jazigo

A chaminé de Catoca está localizada na ladeira Oeste do escudo cassai, como já dito, composto pelos complexos cristalino pré-cambriano de rochas, furado pelos kimberlitos cretáceos. As rochas encaixantes da chaminé são gnaisses pré-cambrianos de diferentes composições e graus de meteorização, as rochas sobrejacentes de cobertura são areias de formação Paleogeno-neogénica de Calahári, areias e arenitos interformacionais paleogénicos e sedimentos aluviais. Os kimberlitos e as rochas vulcanogénicas-sedimentares (RVS) diamantíferas, das fácies crateral do jazigo, geneticamente vinculadas à formação do próprio corpo mineralizado, está representado pelos seguintes tipos principais: brechas kimberlíticas com textura maciça do cimento (BKM); brechas kimberlíticas autolíticas (BKA) tufos kimberlíticos, brechas tufáceas e tufos-gravelíticos com intercalações de arenitos tofáceos (BTK); arenitos, arenitos tofáceos, 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), (ZVONAROV 1991).



**Figura 15:** Parte central da chaminé Kimberlítica de Catoca

**Fonte:** Adaptado

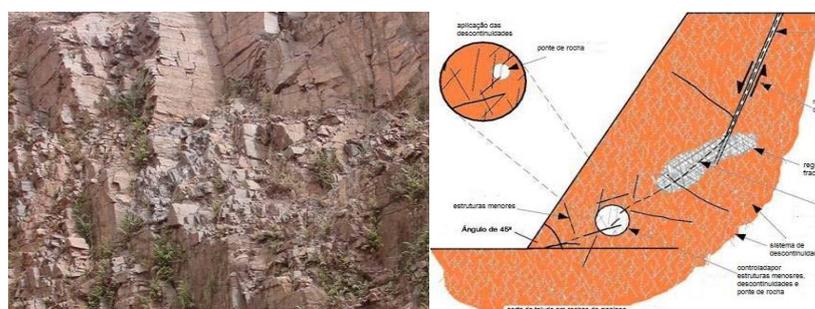
### 2.8.1- Rochas Encaixantes da mina de Catoca

Os gnaisses encaixantes da composição feldspato-piroxénica com os veios e intercalação de quartzitos e xistos quártzico-biotíticos são caracterizados por diferentes graus de meteorização e desintegração de saprolitos argiláceos até as variedades monolíticas altamente resistentes. Os ângulos de mergulho 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°, o ângulo de mergulho constitui 50-90°. O seu contacto com os kimberlitos é acentuado. As cotas de superfície do tecto de maciço de gnaisse encaixantes coincidem com as cotas da superfície de kimberlitos da chaminé 960-970 m de altitude absoluta. A transição duma superfície para outra não tem desníveis

acentuados. À medida de afastamento do contorno do “pipe”, a superfície do gnaiss se sobe até as cotas de 980 m, e possivelmente um pouco mais alto (até 985-988m).

Na parede Oeste da caldeira erosiva natural, ocupada pela chaminé do Catoca os gnaisses da superfície são intensamente meteorizados à espessura da zona intemperizada que constitui 30-50 m, esse valor sendo possível ainda maior na parte Sudoeste da parede. A espessura máxima da aluvião gnáissico revelada na parede Oeste da chaminé, incide numa área sobre a foz do riacho Catoca, o que possivelmente é originado por existência duma zona tectónica nessa área. Essa zona revela-se na direcção do nordeste a sudeste nos kimberlitos da chaminé e provavelmente nos gnaisses encaixantes. Ao longo de contorno da parte restante do perímetro do “pipe” à espessura da zona de meteorização dos gnaisses costuma ser de apenas uns metros e não é tão representativa como na parede Oeste.

Estudos anteriores revelam que os gnaisses encaixantes na parte Oeste da chaminé, tem um determinado zoneamento, a sua parte superior até as cotas 950-930 m, sujeita a uma profunda decomposição química, está representada por saprolitos da cor parda avermelhada, raramente laranja, argilas arenáceas densas, resistentes e pouco plásticas, hidrófugas, gordurosas às apalpadelas por abundância das micas semidecompostas, contendo veios friáveis de quartzitos, de matizes brancos e azuláceos. É nitidamente observada a textura herdada dos gnaisses bandados corrugados de mergulho abrupto, ricos de espelhos de escorregamento, cobertos com uma película argilosa húmida e gordurosa às apalpadelas. Os espelhos de escorregamentos são frequentemente planos, com uma extensão visíveis de 20-50 m, são bem observados nas áreas de desprendimentos e deslizamentos, os quais aparecem nos trechos onde tais fendas são orientadas na direcção às frentes de mineração (parte sudoeste da mina), (Margarida 2012).



**Figura 16:** Esquema dos cortes de talude nos gnaisses na Mina de Catoca.

**Fonte:** (Catoca- 2012).

### 2.8.2- Rochas Subjacentes da mina de Catoca

O corpo kimberlítico de Catoca está coberto por rochas friáveis, areias finas e muito finas e sedimentos arenoso-argilosos. No sector Oeste da mina, estes sedimentos são de 0-5 m, no sector Norte e Sul aumenta até 35-45 m e no Este até 50-55 m. Nos limites da mina, estes sedimentos subjacentes, formam duas camadas com uma possança média de 20 m. O estrato superior é composto por arenitos da formação Calahári, seguindo-se um segundo extrato composto por areias interformacionais nas quais se observam limites intercalados de conglomerados finos que oferecem estabilidade suficiente às bermas e taludes da mina. (Margarida 2012)



**Figura 17:** Figura-Distribuição dos sedimentos sobrejacentes  
**Fonte:** Relatório Catoca (2008).

### 2.8.3- Métodos de desmonte

O desmonte inclui a remoção directa do material rochoso com escavadoras de 5-18 m<sup>3</sup> que é transportado em camiões de 40-100 toneladas. As rochas duras como o gnaisse são desmontados com recursos explosivos produzidos na mina de Catoca figura 18.



**Figura 18:** Desmonte dos gnaisses com explosivos.

Os principais parâmetros geométricos da mina são:

- Altura dos taludes (10-20 m);
- Altura das bancadas de trabalho (10 m);
- Altura das bancadas provisórias não operacionais (10-30 m);
- Ângulo de inclinação dos taludes ( $45^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ ) para gnaisses consistentes ( $30^\circ$ ) para bancos triplos e ( $35^\circ$ ) para bancos duplos;
- Largura das frentes de trabalho (30-60 m);
- Largura de bermas de segurança (2-3 m).

## CAPÍTULO III-CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS

### 3.1 – Graus de fissuras

Analisou-se o grau das fissuras que apresenta o maciço, com vista a determinar o tamanho de bloco natural formado pelas diferentes famílias de fissuras. Entretanto, fissura é todo plano de ruptura da continuidade do meio cuja magnitude seja superior a distância entre os átomos da rede cristalina (aproximadamente  $10^{-10}$  m).

De acordo com a sua magnitude os graus de fissuras classificam-se em:

- a) Primeira ordem: suas dimensões variam entre  $10^{-9}$  e  $10^{-5}$  m, aparece no interior dos cristais, em dependência das condições, surgimento e desenvolvimento destas;
- b) Segunda ordem: suas dimensões variam entre  $10^{-4}$  e  $10^{-1}$  m, aparece entre um e outro cristal. As fissuras destas duas primeiras ordens surgem no processo de diagéneses dos sedimentos ou de cristalização dos magmas. Sua orientação geralmente é caótica.
- c) Terceira ordem: apresenta longitudes consideráveis que vão desde alguns milímetros até centímetros. Surgem nos processos de: metamorfismo, esfriamento, intemperismo das superfícies desnudadas, tectonismo, assim como a realização do trabalho no maciço. Todas as fissuras de terceira ordem, ao cortar-se, dividem as rochas em blocos de forma mais ou menos regular. As fissuras tectónicas comumente formam um sistema bem definido de várias famílias de fissuras quase perpendiculares entre si.

Assim sendo, as fissuras de terceira ordem exercem uma influência substancial nos processos de: desmonte, fragmentação, deslocamentos, deslizamentos e derrubamentos. Pelo grau em que se revelam, classificam-se em: abertas, fechadas e ocultas. Podem estar preenchidas com outras substâncias ou não e são as que afectam os taludes ao estar construídos em gnaisses fissurados, como se observa na figura 3.1.



**Figura 19:** Gnaisse na Mina de Catoca (rocha encaixante)

**Fonte:** Relatório Catoca (2001).

Ao se fazer estudo nas fissuras de terceira ordem num determinado maciço rochoso, é necessário que consideremos as seguintes características:

1. Orientação das fissuras (direcção de mergulho);
2. Tamanho das fissuras (consistência ou comprimento e abertura);
3. Natureza das fissuras (rugosidade, carácter da parede e seu preenchimento);
4. Espaçamento das fissuras (o número das fissuras na área);
5. Condições de fluxo de água;
6. Número de famílias;
7. Tamanho dos blocos.

A influência destes parâmetros sobre as fissuras quantitativas valora-se por alguns dos índices de fissuras (abertura, quantidade etc.) por unidade de consistência ou comprimento, área ou volume de rocha, por isso os índices quantitativos de fissuras se dividem em: lineares, planos e volumétricos.

Uma das dificuldades para a elaboração de um sistema para caracterizar o grau de fissuras é a sua estrutura tridimensional. Quando a fissura está formada por famílias e se pode realizar as observações nas superfícies como espaçamento individual para cada uma das famílias de fissuras, este varia dentro de certos intervalos de limites. Calculando o conteúdo volumétrico das fissuras ( $J_v$ ) do menor e maior espaçamento, podendo encontrar para cada família o mínimo e o máximo grau de fissuras.

A localização da Chaminé de Catoca está associada a uma área semi-montanhosa, com algumas elevações de drenagem superficial que podem ser circular, com predomínio para a direcção sul-sudoeste, unindo-se às descontinuidades locais.

Como se pode observar na tabela nº 18, através das medições efectuadas nos horizontes gnáissico da mina, demonstram que neles predominam quatro famílias de fissuras principais, sendo as fissuras do tipo pouco rugosas, as de maior predomínio.

**Tabela 2:** Resultados do processamento das medições de fissuras efectuadas na zona aberta de rochas gnaisses no Kimberlito de Catoca

F.	Atit.	Abert ura	Dist â.	Tipo.	Perc.	Sup.	Obs.
1	80/180	0,05	2,56	Gnaisse	2,81	Rugosa	Continua
2	88/192	0,05	4	Gnaisse/água	1,34	Rugosa	Continua
3	23/284	0,5	0	Gnaisse	12,5	Plana	Limite
4	29/296	0,7	0	Gnaisse	0	Plana	Sist.

**Fonte:** Catoca

Vallejo et al. (2002), enumerou quatro etapas para a caracterização de um maciço:

1. Descrição das características gerais da superfície;
2. Divisão em zonas e descrição geral de cada zona;
3. Descrição detalhada de cada zona;
4. Caracterização global do maciço rochoso;

A utilização deste sistema de Caracterização tem em conta os seguintes aspectos:

- Descrição litológica e estado de alteração (W)
- Duas características estruturais dos maciços rochosos: espessura das camadas (L) e espaçamento entre fraturas (F)
- Duas características mecânicas: resistência à compressão simples da rocha ( $\sigma$ ) e o ângulo de atrito das descontinuidades ( $\phi$ ).

### 3.2- Classificação do maciço

Basicamente, para **classificação do maciço rochoso**, é preciso descrever as propriedades da rocha intacta e das descontinuidades nele presentes.

O domínio da classificação dos maciços tem vindo a experimentar progressos consideráveis nos últimos anos. Nos maciços rochosos a classificação processa-se, fundamentalmente, através da realização de ensaios e da utilização de metodologias empíricas, como os sistemas RMR (Bieniawski, 1989), SMR Romana (1985) Q (Barton et al., 1974) e GSI (Hoek et al., 2002).

A utilização recorrente destas classificações obriga a constantes aperfeiçoamentos pelo que Hoek melhorou-as, dando origem ao critério de Hoek-Brown modificado de forma a ultrapassar alguns problemas classificados com as expressões anteriores. Douglas (2002) apresentou novas equações para o mesmo critério de forma a contemplar tipos de rochas e maciços para os quais o critério inicial não apresentava um desempenho satisfatório.

A classificação do estado de alteração do maciço pode ser avaliada através da maior ou menor facilidade com que este se parte, utilizando um martelo de mão, pela coloração e brilho, como consequência da alteração de certos minerais. (Fontinhas, 2012).

Na Basic Geotechnical Description of rock masses (BDG), estabelecida em 1981 pela ISRM definiu-se cinco estados de alteração do maciço rochoso (tabela 3.1) em alguns casos, pode simplificar-se esta classificação com três estados de alteração.

### 3.2.1- Classificação do maciço rochoso segundo o seu estado de alteração

**Tabela 3:** Estado de alteração do maciço rochoso (ISRM, 1981).

<b>Simbologia</b>	<b>Designação</b>	<b>Característica</b>
<b>W<sub>1</sub></b>	Sã	A rocha não apresenta sinais de alteração
<b>W<sub>2</sub></b>	Pouco Alterado	Sinais de alteração apenas nos planos e bordas das descontinuidades
<b>W<sub>3</sub></b>	Mediamente Alterado	Alteração visível em todo maciço( mudança de cor) mas a rocha não é friável
<b>W<sub>4</sub></b>	Muito Alterado	Alteração visível em todo maciço e a rocha é parcialmente friável
<b>W<sub>5</sub></b>	Decomposto	O maciço apresenta-se completamente friável (comportamento de Solo)

O estado de fracturação do maciço é caracterizado, pelo espaçamento entre diaclases. A classificação é também feita recorrendo a cinco classes de fracturação,

podendo resumir-se a apenas três classes. Na Tabela 4 encontra-se indicado a classificação elaborada pelo ISRM quanto ao estado de fracturação.

### 3.2.2- Classificação do maciço rochoso segundo o seu estado de fracturação

**Tabela 4:** Estado de fracturação do maciço rochoso (ISRM, 1981).

Simbologia	Intervalo	Afastamento	Estado de fraturação
F <sub>1</sub>	> 200	Muito afastadas	Muito pouco fracturado
F <sub>2</sub>	60 a 200	Afastadas	Pouco fracturado
F <sub>3</sub>	20 a 60	Mediamente	Mediamente fracturado
F <sub>4</sub>	6 a 20	Próximas	Muito fracturado
F <sub>5</sub>	< 6	Muito Pequenas	Fragmentado

### 3.2.3- Classificação do maciço rochoso segundo a sua espessura

**Tabela 5:** Espessura das camadas (ISRM, 1981).

Simbologia	Intervalo de espeçuras	Espeçuras das camadas
L <sub>1</sub>	> 200	Muito espessas
L <sub>2</sub>	60 a 200	Espeças
L <sub>3</sub>	20 a 60	Mediamente espessas
L <sub>4</sub>	6 a 20	Delgadas
L <sub>5</sub>	< 6	Muito Delgadas

Os parâmetros referentes à resistência, à compressão uniaxial da rocha ( $\sigma_{ci}$ ) e ao ângulo de atrito das discontinuidades ( $\varphi$ ).

### 3.2.4- Classificação do maciço rochoso segundo a sua Resistência à compressão

**Tabela 6:** Resistência à compressão uniaxial da rocha (ISRM, 1981).

Simbologia	Intervalos de resistência	Resistência
S <sub>1</sub>	> 200	Muito Elevada
S <sub>2</sub>	60 a 200	Elevada
S <sub>3</sub>	20 a 60	Média
S <sub>4</sub>	6 a 20	Baixa
S <sub>5</sub>	< 6	Muito Baixa

**Tabela 7:** Ângulo de atrito das discontinuidades (ISRM, 1981).

Simbologia	Intervalo de ângulo de atrito interno	Ângulo de atrito
φ <sub>1</sub>	> 45°	Muito elevado
φ <sub>2</sub>	40 a 45	Elevado
φ <sub>3</sub>	35 a 40	Médio
φ <sub>4</sub>	30 a 35	Baixo
φ <sub>5</sub>	< 30	Muito Baixo

### 3.2.5- Classificação do maciço rochoso segundo RQD

A designação (RQD) foi desenvolvida por Deere (Deere et al. 1967), para fornecer uma estimativa quantitativa da qualidade do maciço rochoso a partir de registros de sondagens. O RQD é a percentagem de fragmentos de sondagem mais longos do que 10 cm relativamente ao comprimento total da sondagem (equação 3.1).

$$RQD = \frac{\sum(l_i > 10\text{cm})}{L} \times 100$$

**onde:**

L - Comprimento total furado numa manobra;

$l_i$  - Troços de amostragem superiores a 10 cm.

Os intervalos propostos por Deere et al. (1967), para determinar a qualidade no maciço segundo o índice RQD apresentam-se na Tabela 3.6.

**Tabela 8:** Qualidade do maciço segundo o índice RQD.

Adaptado de Deere et al. (1967).

RQD	Qualidade do maciço
90-100	Excelente
75-90	Bom
50-75	Rasoável
25-50	Fraco
0-25	Muito Fraco

Palmström (1982), sugeriu a estimação do RQD a partir do número de descontinuidades por unidade de volume,  $RQD = 115 - 3,3J_v$ .

Onde  $J_v$  corresponde ao índice volumétrico, é determinado apurando o número de descontinuidades que intercetam um bloco de volume igual a  $1m^3$ .

Com base nesta análise, o RQD pode ser calculado pela expressão

$$RQD = 100 e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1).$$

O uso da aplicação deste índice, combinado com outros sistemas ganha maior importância quando utilizado como um dos parâmetros para a determinação da qualidade do maciço rochoso. Exemplo disso é a classificação proposta por Bieniawski (1989).

### **3.2.6- Classificação de Bieniawski (Sistema RMR)**

A classificação de Bieniawski ou Sistema RMR (“*Rock Mass Rating*”), é muito divulgada e tem sido sucessivamente refinada à medida que são incluídos os resultados de análises de um maior número de casos práticos.

A classificação originalmente incorporava oito parâmetros geológico-geotécnicos, sendo posteriormente constituída por seis, que influenciam de modo determinante o comportamento dos maciços rochosos.

Esta classificação tem em conta os seguintes parâmetros geomecânicos:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. Grau de fracturação do maciço através de RQD (“*Rock Quality Designation*”)
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Influência da água;
6. Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação.

De modo a aplicar a classificação geomecânica RMR, divide-se o maciço em secções que apresentam características geológicas uniformes e cada região é classificada separadamente, de acordo com dados de campo.

### **3.3 – Classificações das rochas encaixantes de acordo com as descontinuidades**

O espaçamento entre as descontinuidades (fracturas) existentes nos gnaisses encaixantes do maciço de catoca varia de 2 a 5 m, razão pela qual podemos classificá-la muito afastada, e nos gnaisses se encontram construídos os taludes e essas rochas apresentam normalmente superfícies lisas, às vezes rugosas. Tem em norma três ou mais sistemas de fracturamento (vertical, horizontal e oblíqua), podendo ser secas ou húmidas consoante a existência de percolação de água ou não.

### **3.4- Propriedades físicas das rochas da mina de Catoca**

A SMC realizou no período de 1998-1999, uma investigação das diversas rochas do kimberlito de Catoca, incluindo as rochas encaxantes e de cobertura da chaminé, e foram obtidos por método de amostragem e de testes laboratoriais, desde os parâmetros de hidraulicidade, densidade e resistência mecânica das rochas.

A solução das tarefas geológicas apresentada é garantida pela realização dos seguintes estudos geofísicos:

Carotagem por raios gama (CG);

Carotagem de sensibilidade magnética (CSM);

Carotagem espectrométrica por raios gama (CEG);

Carotagem acústica (CA);

Carotagem de resistência eléctrica (CRE);

Medição de porosidade cavernosa (MPC);

Inclinometria (ICM);

Termometria (TRM);

Control metrológico;

Medição da influência de água;

### 3.4.1 – velocidade de propagação de ondas longitudinais

Este ensaio consiste em submeter a rocha à pulsos de ondas ultra-sônicas, para conhecer o tempo que a onda leva para atravessar a amostra. A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (m/s) permite avaliar, indirectamente, o grau de alteração e de coesão das rochas. Matematicamente se expressa:

$$\frac{1}{v_p} = \sum_i \frac{C_i}{V_{p,i}} \times 100 ; m/s$$

**Onde:**  $v_p$  = a velocidade de propagação;

$C_i$  = a percentagem em volume do constituinte mineral e da rocha;

$V_{p,i}$  = a velocidade das ondas longitudinais no mineral.

**Tabela 9:** velocidade de propagação de ondas longitudinais  $V_p^*$  ( $n = 0\%$ )

<b>Rocha</b>	<b><math>V_p</math> (m/s)</b>
<b>Gabro</b>	7000
<b>Basalto</b>	6500 – 7000
<b>Calcário</b>	6000 – 6500
<b>Dolomite</b>	6500 – 7000
<b>Arenito e quartzo</b>	600
<b>Rochas graníticas</b>	5500 – 6000

## CAPÍTULO IV- ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi feita com base nos dados obtidos em laboratório e observações de campo que posteriormente permitiram a determinação das famílias existentes no maciço rochoso, a resistência do material e outros parâmetros necessários para a utilização dos programas Dip's, Roctopple e Rocplane.

### 4.1 Caracterização Realizada no Laboratório

Para a determinação das propriedades físicas-mecânicas das amostras previamente obtidas no campo realizaram-se ensaios laboratoriais. Nos ensaios, utilizaram-se as normas brasileiras (NBR) e a americana (ASTM). Alguns procedimentos próprios do laboratório da mina de Catoca. Descrevem-se os ensaios realizados no decorrer deste estudo.

Para os ensaios obtiveram-se 10 amostras de gnaiss e 8 amostras de granito recolhidos in situ em cada talude. O gnaiss foi retirado nos taludes da parte Norte da mina e as restantes amostras foram recolhidas nos taludes Sul, Sudeste e Sudoeste da mina.

#### 4.1.1- Densidade pelo Método Hidrostático

Para este ensaio, utilizaram-se as amostras recolhidas in situ, fez-se a pesagem dentro e fora da água por meio de uma balança hidrostática, para calcular a massa da amostra seca e saturada, com a finalidade de determinar a densidade da amostra.



**Figura:** 20 Pesagem da amostra seca e na água por meio da balança hidrostática

**Fonte:** Catoca (2012)

Após pesagem das amostras, foram obtidos os valores do peso volúmico, através da seguinte expressão:

$$\gamma_s = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{saturada}}$$

Onde:

$\gamma$  – densidade;

$m_{seca}$  – massa da amostra seca;

$m_{saturada}$  – massa da amostra saturada.

#### 4.1.2- Resistência à Compressão Uniaxial e Resistência à tração

O ensaio de resistência à compressão uniaxial é um ensaio comum para a determinação da resistência de provetes de rocha intacta. O valor da resistência à compressão uniaxial, directa ou indirectamente, é utilizado em grande parte das classificações geomecânicas dos maciços rochosos. O ensaio consiste em levar à ruptura através de uma força axial compressiva, um provete de rocha de geometria regular, normalmente cilíndrica, mas nesse caso as amostras recolhidas in situ foram cortadas em formas de cubos e placas de acordo às normas NBR e ASTM. Obtiveram-se 10 placas (6 de gnaiss e 4 de granito) usadas no ensaio viking e 8 cubos (4 de gnaiss e 4 de granito) usados em uma prensa automatizada (figuras 23 e 24).



**Figura 21:** Amostras de granito e gnaiss usadas no ensaio

**Fonte:** Catoca (2012)

O valor da resistência à compressão uniaxial, é obtido através da expressão abaixo que relaciona a força aplicada(kN) na ruptura e a área transversal à aplicação da força.

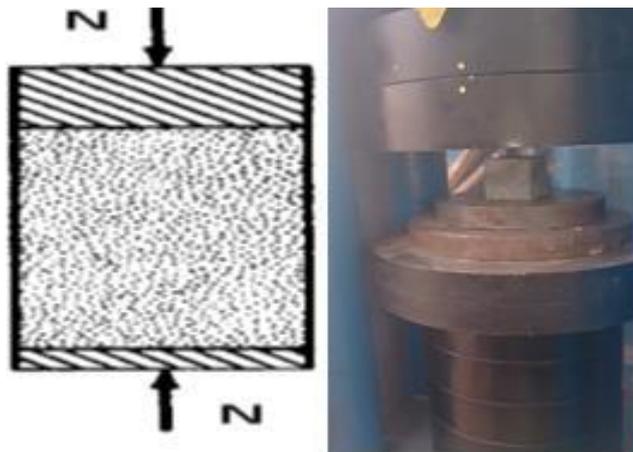
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Foi utilizada uma prensa automatizada digital (**CYBER-PLUS EVOLUTION, C089-21 N**).



**Figura 22** Prensa automatizada digital cyber-plus evolution

**Fonte:** Catoca (2012)



**Figura 23:** Amostras de granito e gnaissse em cubos para os ensaios.

**Fonte:** Catoca (2012)

De seguida fizeram-se os ensaios com as placas no aparelho viking que é um aparelho standard para medição da resistência à tracção, (procedimento da mina de Catoca) onde o ensaio teve como objectivo medir a resistência à tração do material. As amostras foram mergulhadas num recipiente com água com finalidade de ensaiar as amostras 100% de saturação.



**Figura 24:** Ensaio de resistência à tração do material com o aparelho viking.

**Fonte:** Catoca (2012)

#### 4.1.3- Cálculos do Peso Específico Pelo Método do Picnómetro

Com um triturador de metal, procedeu-se a trituração das amostras de Granito, com ajuda de peneiros definiu-se a dimensão das partículas, de seguida repartiram-se as amostras trituradas em quatro partes iguais (figura 25) e levou-se 1/4 delas para pesagem e colocou-se num recipiente designado cápsula e foram para estufa num período de 24 horas.



**Figura 25:** Trituração e Quartejamento da amostra

**Fonte:** Catoca (2012)

Utilizaram-se picnómetros de 20 ml, foram pesados numa balança digital para obter o peso do picnómetro vazio e posteriormente pesado com amostra. Após o período de 24 horas, as amostras foram retiradas da estufa, com ajuda de um funil colocaram-se as amostras nos picnómetros (figura 26).



**Figura 26:** Pesagem do picnómetro com as amostras

**Fonte:** Catoca (2012)

Adicionou-se água destilada de forma a obter uma polpa e levou-se o picnómetro para um fogão eléctrico com areia, num período de uma hora, com uma temperatura de 150 °C (a areia serve para que não haja contacto directo dos recipientes com o aquecedor, este método serve para desfragmentar as partículas sólidas da amostra).



**Figura 27:** Pesagem do picnómetro **Figura 28:** Picnómetros no aquecedor.  
com as amostras

**Fonte:** Catoca (2012)

$$\gamma_s = \frac{\text{Picamostra} - \text{Picvazio}}{\text{Picamostra} - \text{Picvazio} + (\text{Picágua} - \text{Picamostra} + \text{água})}$$

**Onde:**

$\gamma_s$ : Peso específico

**Picamostra:** peso do picnómetro com amostra;

**Picvazio:** peso do picnómetro vazio;

**Picágua :** peso do picnómetro com água;

**Picamostra+água :** peso do picnómetro com amostra + água.

#### 4.1.4- Resultados obtidos nos ensaios

No final do ensaio para o cálculo do peso específico, consideraram-se quatro amostras, duas de granito e duas de gnaisse. As tabelas (13 e 14) apresentam a síntese dos resultados quantitativos obtidos no ensaio das quatro amostras.

**Tabela 10:** Resultados do ensaio do peso volumétrico.

Nº de amostra	Amostra	Peso amostra seca (g)	Peso na água (g)	Peso volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
T <sub>1</sub>	Gnaisse	3390	2150	2,73
T <sub>2</sub>	Gnaisse	5600	3590	2,62
T <sub>3</sub>	Granito	4420	2730	2,79
T <sub>4</sub>	Granito	8850	5620	2,74

**Tabela 11:** Resultados do ensaio do peso específico com método picnómetro

Talude	Amostra	P <sub>picnvazi</sub>	P <sub>picnamostra</sub>	P <sub>picnamostra+água</sub>	P <sub>picn+água</sub>	P <sub>específico</sub>
T <sub>1</sub>	Granito	29,931	36,322	139,17	129,674	2,67
T <sub>2</sub>	Granito	32,702	47,673	142,275	132,749	2,75
T <sub>3</sub>	Granito	33,096	48,224	142,628	133,063	2,73
T <sub>4</sub>	Granito	36,322	51,53	145,725	136,1	2,72

**Onde:**

$P_{\text{picnvazi}}$  = Peso do picnométrico vazio;

$P_{\text{picnamostra}}$  = Peso do picnométrico com amostra;

$P_{\text{picnamostra+água}}$  = Peso do picnométrico com amostra + água;

$P_{\text{picn+água}}$  = Peso do picnométrico com água;

$P_{\text{específico}}$  = Peso específico;

**4.1.5- Cálculo do Índice SMR**

Com a recolha dos dados de todos os elementos, foi possível avaliar o índice SMR para os diferentes taludes estudados, dividindo-se essa avaliação em duas partes: obtenção do índice RMR, cujos resultados são apresentados na Tabela 13 seguido da determinação do índice SMR Tabela 14 e correspondentes medidas de contenção possíveis propostas por Romana (1993). Os valores atribuídos ao parâmetro envolvido no cálculo do RMR são provenientes das características médias observadas/medidas ao longo dos taludes estudados.

Para uma caracterização mais precisa de cada talude, executou-se o levantamento no terreno dos parâmetros possíveis que permitiram obter SMR, propostos por Romana (1993) e Bieniawski (1973) sendo a análise das famílias de descontinuidades realizadas através da descrição e medição, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura e enchimento. Toda esta informação foi posteriormente tratada, para a obtenção do valor SMR para cada talude, conforme propõe Romana (1993).

A tabela 13 apresenta os valores a utilizar no cálculo do índice RMR para cada talude, sendo que os valores da frequência foram obtidos pela expressão sugerida por Priest e Hodson (1976) através da frequência média das descontinuidades por metro linear ( $\lambda$ ).

Calcula-se um equivalente teórico do parâmetro RQD que quantifica o total de espaçamentos entre descontinuidades iguais ou superiores a 0,1 m.

$$\text{RQD} = e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda+1) \times 100$$

$$\text{tal que: } \lambda = \frac{1}{S} \quad [\text{m}^{-1}]$$

Assim de acordo com este procedimento determinou-se o RQD para os taludes estudados. Exemplifica-se o procedimento do cálculo da frequência de descontinuidades ( $\lambda$ ), para o talude.

$$\lambda = \frac{1}{0,12} = 8.3$$

Tabela 12: Cálculo da frequência das descontinuidades.

Taludes estudados	Espaçamento	Frequência das descontinuidades
Talude 1	0.12	8.3
Talude 2	0.14	7.1
Talude 3	0.10	10
Talude 4	0.08	12.5
Talude 5	0.09	11.1
Talude 6	0.10	10
Talude 7	3	33.3
Talude 8	5.6	43.4
Talude 9	7.9	12.6
Talude 10	6	16.6

Na tabela 13 apresentam-se os valores do índice RMR, calculados com base nos dados fornecidos pela empresa, permitindo assim determinar a classe do maciço.

Tabela 13: Cálculo do índice RMR.

Talude	$F_r$	RQD	RQD	$R_c$	D	P	A	R	E	$F_{rct}$	P <sub>água</sub>	RMR	Classe
1	8.3	79	17	7	15	4	5	1		5	15	75	II
2	7.1	84	17	7	15	4	5	1	6	5	15	75	II
3	10	73	17	7	15	1	5	1	6	5	10	67	II
4	12.5	64	13	4	8	1	4	1	6	5	15	57	III
5	11.1	69	13	12	5	2	4	5	6	5	15	67	II
6	10	72	20	7	5	6	5	5	6	1	4	59	III
7	33.3	15	3	2	15	4	1	5	6	3	5	44	III
8	43.4	7	3	12	20	3	1	5	4	3	5	56	III

9	12.6	64	13	7	20	4	4	5	6	3	5	67	III
10	16.6	31	8	4	20	4	1	5	6	1	1	50	III

**Onde:**

ARM= Classificação da maça rochosa

R<sub>c</sub>= Resistência a compressão;

D<sub>c</sub>= Descontinuidade;

P<sub>rc</sub>= Percistência da rocha;

A= Abertura da rocha;

R=Rugosidade da rocha;

E<sub>ec</sub>= Enchimento;

P<sub>água</sub>= Peso da de água contida na rocha.

Exemplo de cálculo do RQD (T1):  $e^{-0,1 \lambda(0,1 \lambda+1)} \times 100$  ;  $e^{-0,1} \times 8.3(0,1 \times 8.3 + 1) \times 100$   
= 78.6%

\*\*Exemplo de cálculo do RMR (T1):  $RMR = 17 + 7 + 15 + 4 + 5 + 1 + 6 + 5 + 15 = 75$ .

Apesar das recomendações propostas por Romana (1985), não serem de aplicação directa ao tipo de estabilização a efectuar, é um estudo mais cuidado ser necessário para se dimensionar correctamente as obras de contenção, é proposta uma síntese de possíveis medidas a executar para cada talude estudado na tabela que se segue que é a determinação do índice SMR.

**Tabela 14:** Cálculo do índice SMR Romana (1993).

Talude	RMR	F1	F2	F3	SMR	SMRfinal
T <sub>1</sub>	75	0.42	0.15	-6	72	Bom
T <sub>2</sub>	75	0.42	0.15	-6	72	Bom
T <sub>5</sub>	67	0.04	0.40	-25	66	Bom
T <sub>9</sub>	67	1.5	0.15	-25	61	Bom
T <sub>3</sub>	67	0.99	0.40	-30	53	Rasoável

<b>T<sub>4</sub></b>	57	0.11	0.15	-35	56	Rasoável
<b>T<sub>6</sub></b>	59	0.05	0.15	-60	58	Rasoável
<b>T<sub>8</sub></b>	56	0.93	0.40	-40	41	Rasoável
<b>T<sub>10</sub></b>	50	0.27	0.15	-65	47	Rasoável
<b>T<sub>7</sub></b>	44	1.04	0.40	-40	19	Muito Fraco

Onde:

$$SMR = RMR + F1 * F2 * F3 + F4$$

\*F4= 0 para todas as famílias estudadas.

Na tabela 14 observam-se as recomendações de acordo o valor do SMR para cada um dos taludes estudados.

#### 4.1.6 Dados comparativos

**Tabela 15:** fator de segurança calculados pelo **Rocplane**

Talude	F. de Segurança
T <sub>1</sub>	1.85
T <sub>2</sub>	1.13
T <sub>3</sub>	1.75
T <sub>4</sub>	1.27
T <sub>5</sub>	1
T <sub>6</sub>	1
T <sub>7</sub>	1.19
T <sub>8</sub>	1
T <sub>9</sub>	1
T <sub>10</sub>	1.150

**Tabela 16:** Resumo dos valores de SMR

Talude	SMR	SMRfinal
T <sub>1</sub>	72	Bom
T <sub>2</sub>	72	Bom
T <sub>5</sub>	66	Bom
T <sub>9</sub>	61	Bom
T <sub>3</sub>	53	Rasoável
T <sub>4</sub>	56	Rasoável
T <sub>6</sub>	58	Rasoável
T <sub>8</sub>	41	Rasoável
T <sub>10</sub>	47	Rasoável
T <sub>7</sub>	19	Muito Fraco

#### 4.1.7 Análise e discussão dos resultados

Da análise dos Resultados, obtidos podemos constatar que o SMR (Slope Mass Rating), permitiu a identificação clara de três classes para os taludes estudados, de acordo com Romana (1993).

Os taludes 1,2,5,9 que apresentam um SMR entre 61 e 72 são classificados como Bom, nos taludes 3,4,6,8, e 10 são classificados de acordo Romana (1993), como rasoáveis, com um SMR entre 41-58. O talude 7 se apresenta neste critério como instável, apresenta o valor do SMR de 19.

Com ajuda do Dip's 6.0 é possível proceder a observação das famílias de descontinuidades que mais contribuem para instabilidade dos taludes. No que respeita os taludes 1,2,5 e 9 observa-se, que as famílias não produzem instabilidade relativamente à formação de cunhas (wedge). No que respeita os taludes 5 e 9, ainda dentro da classe dos taludes de boa qualidade, observa-se a possibilidade de deslizamento por toppling.

O Rocplane foi utilizado para o estudo do plano de escorregamento mais viável na análise de estabilidade de cunhas, os valores de factor de segurança variam de 1 a 1.85, mostrando que apenas o talude 1 e 2 se poderiam considerar estáveis, no que respeita a esse tipo de deslizamento ( $F_S > 1.5$ ), todos os outros taludes demonstram que sua geometria não é a mais adequada para garantir a estabilidade deste maciço. Isto quer dizer que mesmo os taludes de classe II deve ser redimensionado ou diminuindo a altura das bancadas e o ângulo do talude.

O Roctopple foi usado para análise de estabilidade de quedas de blocos (toppling) e calcularam-se os factores de segurança que variam entre 0.7-0.97, revelando susceptibilidade de todos os taludes ao deslizamento por queda de blocos (toppling), esta susceptibilidade, pode ser devida à utilização sistemática de pegas de fogo no desmonte do material promovendo o aumento da fracturação já existente. Este aspecto fragmentado que se acaba de referir é visível, onde se recomenda utilizar o material para estabilização do pé de talude.

Romana (1993), recomenda na sua classificação a adopção de medidas corretivas sistemáticas para os taludes de má qualidade como é o caso de talude 7. Como se pode observar na tabela 14, este talude apresenta-se bastante instável, sendo a queda de blocos (toppling) é evidente. No que respeita as medidas de redimensionamento de taludes tais como alteração da sua altura ou alteração do seu ângulo de inclinação, não se aprofundou uma vez que precisariam ser estudados atendendo a lavra.

## **Conclusões**

Da análise dos resultados obtidos podemos concluir que:

O maciço que apresenta um SMR entre 61 a 72 é classificado como Bom. É o caso do maciço dos taludes 1,2,5 e 9;

O maciço que apresenta um SMR entre 41 a 58 é classificados como razoável. É o caso do maciço dos taludes 3,4,6,8 e 10;

O maciço que apresenta o valor do SMR igual a 19, é clasificado como instavel. É o caso do maciço do talude 7.

As rochas mais densas, menos porosas, menos fissuradas, mais secas são mais resistentes em relação as outras. Logo, apresentam maior resistência a ruptura;

A instabilidade de talude é deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam ou superam à resistência ao cisalhamento;

O maciço em céu aberto, a configuração geométrica da cava, vai depender basicamente da distribuição espacial do corpo mineral, em conjunto com as características geométricas do maciço rochoso;

Os factores mais importantes que condicionam as instabilidades de taludes de formações kimberlíticas são:

Factores hidrológicos (presença de água);

Factores geométricos (altura e inclinação de talude);

Factores geológico ( presença de planos e zona de fraca resistência);

Factores geotécnico. Está relacionado com o comportamento mecânico do terreno (resistência e deformabilidade);

A classificação do maciço rochoso depende das suas propriedades físicas e mecânica.

## **Recomendações**

Para prevenir desprendimentos de rochas, de infiltração e arrastamentos de erosão interna de taludes das banquetas construídas em areias do kalahari e em sedimentos de inter-formações, as banquetas devem ser carregadas por toda a altura com uma camada de rochas filtrantes, da possança (espessura) não menos que 0,5m;

Recomenda-se aos futuros licenciados a darem continuidade do estudo deste tema, visto que após a identificação de instabilidade de um talude, segue-se a busca de soluções que consiste em determinar a estabilidade do mesmo;

Propõe-se também que a faculdade de engenharia de minas, estabeleça mais contratos com as empresas de mineração, permitindo assim a admissão dos estudantes pré-finalistas/ finalistas aos estágios, a fim de garantir pelo menos uma percentagem mínima do conhecimento prático aos finalistas.

## Referência Bibliográfica

- (ABGE), A. B. (1998). *Geologia de Engenharia*. São Paulo.
- ABGE. (1983). *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços*. São Paulo.
- Brito, A. W. (2012). *Ensino Médio Integrado-Curso Técnico*. Porto: UFP.
- D'Agostini, L. R. (1999). *Erosão*. Trindade: Florianópolis.
- Dr., Z. (2002). *Serviços Geológicos Na Prospecção do Kimberlito de Catoca*. Saurimo: Sociedade Mineira de Catoca.
- Ferraz, J. L. (2012). *Análise de Estabilidade de Talude pelo Método de Jambu*. Porto: FEUP.
- Gabriel Zanela Veríssimo, L. G. (2014). *Caracterização Geológica, Tipos de rupturas e Estabilidade de Talude*. Ceará: UFC.
- GAMA, C. D. (1989). *Workshop de Mecânica de Rochas Aplicada à Mineração*. Belo Horizonte.
- Gilson, A. F. (2019). *Técnicas de Lavra a Céu Aberto*. Pará: UFP.
- Guidicini, G., & Nieble, C. M. (1984). *Estabilidades Naturais e de Estabilidade* (Vol. 2ª Edição). São Paulo: Edgard Blucher.
- Lopes, M. d. (2006). *Comportamento Geotécnico e Micanismos de Ruptura*. Porto: UFOP.
- Maia, J. C. (2012). *Método Probabilístico-Técnicas aplicada a estabilidade de Taludes e cavidades em rochas*. Brasília: UB.
- Ngola, D. (2018). *Caracterização Geomecânica das Rochas*. Luanda.
- Oliveira, S. G., & Silva, T. J. (2018). *Métodos e Técnicas para cálculos de estabilidade de taludes de aterros Sanitário*. Universidade São Francisco.

PINOTTI, A. M. (2011). *Técnicas De Geologia Estrutural Para Previsão E Contenção*. SÃO Paulo.

Sacarias, C. M. (2003). *Classificação do Maciço Rochoso da Mina do córego aplicando as operações de perfuração*. M G: UFMG.

TA, E. D. (s.d.).

Vinicius, A. (2013). *Projecto de Estabilização de Taludes e Estruturas de Contenção Com Dimensionamento Geotécnico e Estrutural*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.