



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



**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TALUDES NAS FORMAÇÕES  
SEDIMENTARES E KIMBERLÍTIICAS, TENDO EM CONTA A COMPLEXIDADE**



**GEOTÉCNICA E HIDROGEOLÓGICA DO KIMBERLITO CAMATCHIA.**

**Elaborado por:** Dito Mateus Dala Cazacala

**Estudante nº:** 109792

**Luanda, 2021**

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

*Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Minas, apresentado à Faculdade de Engenharia - Universidade Agostinho Neto, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.*

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TALUDES NAS FORMAÇÕES SEDIMENTARES E KIMBERLÍTIICAS, TENDO EM CONTA A COMPLEXIDADE GEOTÉCNICA E HIDROGEOLÓGICA DO KIMBERLITO CAMATCHIA**

**Autor:**

Dito Mateus Dala Cazacala

**Orientador:**

Prof. Doutor Laureano Receado Paulo

**Co-Orientadores:**

Doutor Nlandu Kiambote

Eng. Adérito Gaspar

**Luanda, 2021**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho de monografia aos meus pais, Mateus Dala e Luisa Teca Maza pelo amor incondicional que a mim tenham demonstrado, fazendo de tudo para que eu pudesse me tornar uma pessoa melhor. Amo vocês.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pela sua misericórdia que se renova todos os dias na minha vida; por ser ele quem me dirige todos os passos, desde o meu levantar até ao meu deitar e no teu livro ter sido escrito todos os meus dias, cada um deles escrito e determinado.

Agradeço à todos aqueles que de forma direta ou indireta, tornaram propício a minha formação, particularmente aos meus familiares que me têm prestado atenção e que de forma amorosa e persistente têm me apoiado.

Agradeço a todos os professores do departamento de minas, que tiveram um papel fundamental na minha formação de engenheiro, sou eternamente grato a tudo que aprendí com vocês.

Agradeço especialmente ao meu orientador: Doutor Laureano Receado Paulo e ao Director do projecto Lunhinga Sr. Egenheiro Adérito Gaspar, pelo apoio desde a selecção do meu tema até a fase final do projecto e por serem os responsáveis pelo acompanhamento das etapas desta monografia.

Agradeço ao meu Co-Orientador: Doutor Nlandu Kiambote, pelo acompanhamento, fornecimento de dados e paciência em transmitir os seus conhecimentos para a materialização desta monografia.

Agradeço ao colectivo dos Engenheiros e Geólogos do projecto Lunhinga: Manuel Das Flores, Nsingui Dietuvova, Éric Samuel Bafumu, Armando Neves de Castro e Alvaro Mafuani. Ao Doutor Adjair P. Santos e ao técnico mestre das operações António Henriques Tavares Barros.

A empresa Mineira Projecto Lunhinga, pela oportunidade do estágio, muito obrigado.

## RESUMO

Os estudos geotécnicos sobre taludes de escavações são extremamente importantes e essenciais para a mineração que visa segurança nas operações, sustentabilidade e previsibilidade dos projectos. Optimizar a produção com os devidos cuidados sobre os impactos ambientais e controle rigoroso sobre a segurança operacional são obrigações e vêm em primeiro lugar. Sendo assim, as questões geométricas devem ser determinadas buscando a economicidade sob a luz da segurança. Esta geometria contempla a determinação dos ângulos dos taludes individuais, ângulos gerais da cava, alturas de bancadas e dimensões das bermas. No caso de bancadas a avaliação da estabilidade na mina de camatchia envolveu conhecimentos prévios sobre a geologia, a topografia, as características mecânicas das rochas, além do estabelecimento de hipóteses sobre as condições hidrogeológicas. Assim, os parâmetros necessários para atingir os objectivos neste trabalho, foram calculados com base no software GEOSLOPE e na retroanálise comparados com os parâmetros de resistência atribuídos no projecto original. Esta obra procura assim apresentar aos estudantes e aos profissionais de engenharia os temas importantes relacionados ao estudo de estabilidade de taludes. Sendo assim a proposta desse trabalho consistiu na avaliação determinística da estabilidade dos taludes da mina de camatchia no projecto lunhinga.

**Palavras-chaves:** Estabilidade, Taludes, Mineração, Factor de Segurança.

## ABSTRACT

Geotechnical studies on excavation slopes are extremely important and essential for mining, aiming at operational safety, sustainability and predictability of projects. Optimizing production with due attention to environmental impacts and strict control over operational safety are obligations and come first. Thus, the geometric issues must be determined seeking economy in the light of security. This geometry includes the determination of individual slope angles, general pit angles, bench heights and berm dimensions. In the case of benches, the evaluation of stability in the Camatchia mine involved prior knowledge about the geology, topography, mechanical characteristics of the rocks, in addition to establishing hypotheses about the hydrogeological conditions. Thus, the necessary parameters to achieve the objectives in this work were calculated based on the GEOSLOPE software and on the retro-analysis compared with the resistance parameters assigned in the original project. This work thus seeks to introduce students and engineering professionals to important issues related to the study of slope stability. Therefore, the proposal of this work consisted in the deterministic evaluation of the stability of the slopes of the Camatchia mine in the Lunhinga project. .

**Key-words:** Stability, Slope, Mining, Factor of safety.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura (2.1)</b> - Estabilidade de taludes em encostas naturais.....	12
<b>Figura (2.2)</b> - Atrito entre dois corpos no instante do deslizamento .....	13
<b>Figura (2.3)</b> - Resistência ao cisalhamento devido à coesão .....	14
<b>Figura (2.4)</b> - Cálculo de $\sigma_{v0}$ em solo com água.....	15
<b>Figura (2.5)</b> - Exemplo 2.1: cálculo de $\sigma_{v0}$ .....	16
<b>Figura (2.6)</b> - Critério de rotura de Mohr-Coulomb .....	17
<b>Figura (3.1)</b> - Representação do talude tendo em conta segurança vs economia .....	23
<b>Figura (3.2)</b> - Geometria das bancadas em mineração.....	24
<b>Figura (3.3)</b> - Desenho da mina de camatchia modelo geológico 2011.....	26
<b>Figura (3.4)</b> - Taludes formados por gnaisses resistentes.....	27
<b>Figura (3.5)</b> - Taludes formado por gnaisses maciços, zona nordeste da mina .....	28
<b>Figura (3.6)</b> - Variáveis actuaentes no movimento rotacional.....	31
<b>Figura (3.7)</b> - Variáveis que influenciam no movimento translacional.....	32
<b>Figura (3.8)</b> - Canalização de águas pluviais ao redor de uma bancada.....	35
<b>Figura (3.9)</b> - Sistema de drenagem por valas. ....	35
<b>Figura (3.10)</b> - Representação esquemática dos metodos.....	35
<b>Figura (3.11)</b> - Drenagem das águas no interior da mina de camatchia .....	37
<b>Figura (4.1)</b> - Origem e ciclo de formação dos solos .....	42
<b>Figura (4.2)</b> - Modelo magmático de um kimberlito .....	47
<b>Figura (4.3)</b> - Graben do Lucapa e as ocorrências kimberlíticas de Angola .....	49
<b>Figura (4.4)</b> - Localização dos corpos kimberlíticos do projecto lunhinga .....	51
<b>Figura (4.5)</b> - Esquema da estratificação do kimberlítico Camatchia.....	52
<b>Figura (4.6)</b> - Rochas encaixantes da chaminé camatchia .....	53
<b>Figura (4.7)</b> - Perfil do corte vertical da linha diagonal chaminé de camatchia .....	54

<b>Figura (5.1)</b> - Mapa de enquadramento geográfico do projecto Lunhinga .....	56
<b>Figura (5.2)</b> - Área da concessão coberta por savanas e arbustos. ....	58
<b>Figura (5.3)</b> - Mapa geomorfológico da concessão do projecto Lunhinga .....	59
<b>Figura (5.4)</b> - Rede hidrográfica de camatchia .....	60

<b>Figura (5.5)</b> - Esquema de alimentação hidráulica na chaminé camatchia.....	62
<b>Figura (5.6)</b> - Erosão na extremidade da chaminé Camatchia .....	64
<b>Figura (5.7)</b> - Rochas encaixantes em volta dos blocos na mina de camatchia .....	68
<b>Figura (5.8)</b> - Vista de perfil de uma bancada da formação Kalahari segurança .....	69
<b>Figura (5.9)</b> - Diagrama da fatia (19) e poligonos de forças actuantes.....	70
<b>Figura (5.10)</b> - Intersecção entre forças e momentos vs factor de segurança .....	71
<b>Figura (5.11)</b> - Vista de perfil de uma bancada, de Gnaisses alterados.....	72
<b>Figura (5.12)</b> - Diagrama da fatia (15) e poligonos de forças actuantes .....	73
<b>Figura (5.13)</b> - Intersecção entre forças e momentos vs fator de segurança.....	74
<b>Figura (5.14)</b> - Vista de perfil de uma bancada de gnaisses resistente.....	75
<b>Figura (5.15)</b> - Intersecção entre os momentos e forças vs factor de segurança .....	76
<b>Figura (5.16)</b> - Vista de perfil de uma bancada de gnaisses muito resistentes. ....	77
<b>Figura (5.17)</b> - Intersecção entre os momentos e forças vs factor de segurança .....	78
<b>Figura (5.18)</b> - Largura da estrada para pista em linha recta.....	79
<b>Figura (5.19)</b> - Impactos na paisagem, mina de camatchia.....	81
<b>Figura (5.20)</b> - Bacia de rejeito da central de tratamento do projecto lunhinga .....	82

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela (2.1)</b> - Parâmetros para classificação das rochas no sistema RMR .....	6
<b>Tabela (2.2)</b> - Classes definidas pelo RMR e parâmetros de resistência dos maciços .....	7
<b>Tabela (2.3)</b> - Qualidade dos maciços segundo o índice RQD .....	8
<b>Tabela (2.4)</b> - Parâmetro de resistência a compressão simples .....	11
<b>Tabela (2.5)</b> - Parâmetros para classificação das rochas em função da sua coesão .....	12
<b>Tabela (3.1)</b> - Factores causadores dos movimentos de massa .....	21
<b>Tabela (3.2)</b> - Condição dos taludes em função do factor de segurança .....	29
<b>Tabela (3.3)</b> - Largura das estradas na mina .....	38
<b>Tabela (4.1)</b> - Unidades estratigráficas da região nordeste de Angola.....	39
<b>Tabela (4.2)</b> - Rochas de origem detriticas .....	45
<b>Tabela (5.1)</b> - Coordenadas geográficas que delimitam a área de estudo.....	56
<b>Tabela (5.2)</b> - Propriedades de filtração das rochas na área do jazigo .....	63
<b>Tabela (5.3)</b> - Propriedades físicas-mecânicas dos sedimentos friáveis. ....	65
<b>Tabela (5.4)</b> - Propriedades físicas-mecânicas das rochas e dos minérios. ....	66
<b>Tabela (5.5)</b> – Valores das propriedades das rocha encaixantes .....	67
<b>Tabela (5.6)</b> - Fatias (19), dados.....	70
<b>Tabela (5.7)</b> - Resultados da análise na formação kalahari.....	71
<b>Tabela (5.8)</b> - Fatias (15), dados.....	73
<b>Tabela (5.9)</b> - Resultados da análise nos gnaisses alterados.....	74
<b>Tabela (5.10)</b> - Resultado da análise nos gnaisses resistentes. ....	76
<b>Tabela (5.11)</b> - Resultado da análise nos gnaisses muito resistentes.....	78
<b>Tabela (5.12)</b> - Quadro geral dos resultados das análises feitas. ....	80
<b>Tabela (5.13)</b> - Quadro resumido dos impacto ambientais e medidas mitigadoras.....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

ISRM - International Society for Rock Mechanics

RMR - Rock Mass Rating

RQD - Rock Quality Designation

SRF - Stress Reduction Fator

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NA - Nível de Água

NT - Nível do Terreno

$\sigma$  - Tensões normais

$\tau$  - Tensões cisalhantes

$\sigma'$  - Tensão efetiva

u - Poro-pressão

$\varphi$  - Ângulo de atrito interno

c - Coesão

$c'$  - Coesão efetiva

$\varphi^b$  - Ângulo de atrito relativo à sucção

H - Altura do talude

$L_B$  - Largura da Berma

$h_B$  - Altura da Bancada

F.S - Fator de Segurança

l - Comprimento da fatia

b - Espessura

$\gamma$  - Peso específico

Z - Profundidade

$L_r$  - Largura da Estrada

$L_v$  - Largura Veículo

TKB - Tufo Kimberlito Brecha

PK - Kimberlito Porfirico

RVS - Rochas Vulcânicas Sedimentares

B - Blocos

## LISTA DE ANEXOS

<b>Tabela (1)</b> - Valores de <b>Jn</b> para o sistema Q. ....	89
<b>Tabela (2)</b> - Valores de <b>Jr</b> para o sistema de classificação Q. ....	89
<b>Tabela (3)</b> - Valores de <b>Jw</b> para o sistema de classificação Q.....	90
<b>Tabela (4)</b> - Valores de <b>Ja</b> para o sistema de classificação Q.....	90
<b>Tabela (5)</b> - Valores de <b>SRF</b> para o sistema de classificação Q.....	91
<b>Figura (1)</b> - Erosão nos taludes da formação kalahari.....	92
<b>Figura (2)</b> - Desabamento de taludes nas rochas vulcânicas sedimentares.....	92
<b>Figura (3)</b> - Taludes formado por gnaisses alterados cobrindo os blocos B1B2B .....	93
<b>Figura (4)</b> - Talude formado por gnaisses alterados, zona norte da mina .....	93

# ÍNDICE

## CAPÍTULO I - PROBLEMA

---

Introdução .....	1
Objectivos do estudo .....	2
Justificativa.....	2
Hipótese.....	3
Metodologia de Trabalho.....	3
Delimitação .....	3

## CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Definições de Termos e Conceitos.....	4
Caracterização geomecânica dos maciços rochosos.....	5
Classificação de maciços rochosos.....	5
Sistema Rock Mass Rating (RMR).....	6
Sistema (Q. ....	7
Descontinuidades.....	8
Parâmetros de resistência de maciços rochosos .....	10
Caracterização geomecânica dos solos.....	12
Atrito.....	13
Coesão.....	14
Tensões no solo.....	14
Pressões verticais totais.....	15
Crítérios de ruptura de Mohr-Coulomb .....	17

## CAPÍTULO III - ESTABILIDADE DE TALUDES

Generalidades.....	19
Movimentos de massas.....	19
Causas dos movimentos de massa.....	19
Estudo da estabilidade dos taludes e caracterização da geometria dos taludes.....	21

Parâmetros geométricos antes dimensionados na mina de camatchia .....	25
Geometrias actuais dos taludes de camatchia .....	26
Análise da estabilidade de taludes.....	28
Teoria do equilíbrio limite.....	29
Medidas para a estabilização de taludes.....	33
Drenagem .....	33
1.3.1 Técnicas usadas para o controlo das águas superficiais.....	34
Técnicas de controle das águas subterrânea em minas a céu aberto .....	35
Drenagem das águas na mina de camatchia.....	37
Vias de acessos. ....	37

## CAPÍTULO IV - GEOLOGIA

---

Enquadramento geológico regional.....	39
Sistema Karroo .....	40
Continental Intercalar .....	40
Formação Calonda.....	40
Depósito de cobertura .....	41
Origem e formação dos solos.....	42
Formações sedimentares.....	43
Classificação das Rochas Sedimentares.....	44
Intemperismo .....	45
Kimberlitos. ....	46
Morfologia dos kimberlitos.....	46
Classificação segundo Clement e Skinner .....	47
Ocorrencia dos kimberlitos em angola .....	48
kimberlito camatchia.....	50
Esquema de estratificação das formações do kimberlítico de camatchia .....	51
Extrutura geológica do jazigo camatchia.....	54

## CAPITULO V - ESTUDO DE CASO (MINA DE CAMATCHIA)

Breve historial.....	55
Localização da área de concessão do projecto lunhinga .....	56
Situação económica da província.....	57
Clima e flora regional.....	57
Geomorfologia.....	58
Hidrologia da Área.....	59
Hidrografia .....	60
Condições hidrogeológicas no jazigo camatchia .....	60
Propriedades de filtração das rochas .....	63
Condições e fenómenos geológicos desfavoráveis na exploração .....	64
Propriedades das rochas encaixantes e Kimberlíticas do jazigo de camatchia .....	65
Resultados e discussões.....	67
Secção B1B2B5 .....	68
Secção B3B6 .....	75
Estradas na mina .....	79
Impactos ambientais causadas pelas actividade mineira .....	81

## CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusão .....	84
Recomendações .....	85

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## ANEXOS



# **CAPÍTULO I - PROBLEMA**

## **1.1 Introdução**

O processo de estudo da estabilidade de taludes consiste numa sequência de actividades para o desenvolvimento de um projecto ou entendimento de um evento indesejado. Neste sentido esta monografia vêm exemplificar o desenvolvimento desta actividade, em um estudo de caso referente à estabilidade de taludes da mina de camatchia e pretende-se abordar os aspectos geomecânicos envolvidos no desmorte acéu aberto em maciços rochosos kimberlíticos, com vista a definição das medidas de prevenção e estabilização mais correctas a aplicar no talude. Com isso, foi utilizado o programa GEOSTUDIO, para a análise da estabilidade dos taludes em causa, com vista a determinação do factor de segurança e a correção da geometria dos taludes da mesma, tendo em conta a melhoria da segurança nas operações mineiras e o maior aproveitamento das reservas antes condicionadas pelas condições de segurança dos taludes da mina. Sendo assim recorreu-se a revisão de trabalhos anteriores.

A presente monografia está estruturado em seis capítulos.

Primeiro capítulo – Problema: apresenta o estudo inicial para a definição dos objectivos, definição do plano de pesquisa e organização do trabalho.

Segundo capítulo – Fundamentação teórica: são descritas os conceitos geomecânicos aplicadas aos maciços rochosos e solos, enfatizando a influência das descontinuidades no comportamento dos maciços rochosos.

Terceiro capítulo – Estabilidade de taludes: é abordado a teoria geral de estudo dos taludes de mineração.

Quarto capítulo – Geologia: é feito uma brevecaracterização geológica regional e dos kimberlitos com destaque a de camatchia.

Quinto capítulo - Estudo de caso: A partir da caracterização do estudo de caso, é determinado o factor de segurança para estudar a estabilidade e dimensionar a geometria nos taludes de camatchia.

Sexto capítulo - Conclusões e recomendações: traz as conclusões alcançadas com esta pesquisa, sugerindo alguns horizontes novos para continuação e melhoria da pesquisa.

## **1.2 Objectivos do estudo**

Este trabalho tem como objectivo geral é analisar a estabilidade e propor geometrias finais nos taludes do kimberlito camatchia. Tendo em conta os aspectos geotécnicos e hidrogeológicos na mina.

Para atingir esse objectivo foram traçados os seguintes objectivos específicos:

1. Caracterizar as propriedades das rochas encaixantes e das formações de cobertura, com vista a definição dos parâmetros geométricos nos taludes da mina de camatchia;
2. Propiciar um conhecimento actual e abrangente do comportamento geotécnico dos taludes, associados as diferentes frentes de lavra, garantindo adopção de geometrias finais que garantem as premissas fundamentais de economia e segurança;
3. Definição de um valor de FS, a partir do software SLOPE/W, para análise da estabilidade dos taludes em causa.

## **1.3 Justificativa**

Os taludes em minas acéu aberto, encontram-se expostas a factores que apresentam mudanças inerente à sua natureza, causando incertezas ao longo da elaboração de projeto e exploração de lavra, tendo em conta a insegurança que

os mesmo podem apresentar. No caso de camatchia as inclinações e altura dos taludes operacionais e finais da mina constituem um dos factores de extrema importância tanto para a produção quanto para a segurança deste projecto. Os taludes da mina chegam a apresentar alturas e ângulos de inclinação superiores que o estabelecido pelas normas de segurança, levando ainda em consideração que estes materiais podem vir a se instabilizar o que torna necessário o estudo das condições da estabilidade dos taludes da mina, para que se possam projectar taludes operacionais e finais de forma adequada, tornando-os estáveis com inclinações e alturas máximas admissíveis.

#### **1.4 Hipótese**

Dependendo das características de resistência das formações rochosas e solos, como também o tamanho e inclinação dos taludes estudados, pode-se determinar a sua estabilidade através dos métodos de equilíbrio limite aplicados no programa SLOPE/W.

#### **1.5 Metodologia de trabalho**

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados dois métodos de procedimento:

##### **1º Pesquisa Bibliográfica**

A revisão bibliográfica abrangiu as literaturas relacionadas com o tema de estudo da estabilidade de taludes.

##### **2º Pesquisa de Campo**

Consistiu na realização de estudo de caso da mina de camatchia,(Projecto Lunhinga)abrangindo visitas técnicas ao terreno para colheitas de dados, entrevistas com diversos agentes envolvidos directamente no processo para a materialização deste projecto.

## **1.6 Delimitação**

O trabalho delimita-se ao estudo da estabilidade de taludes, para o desenvolvimento de um projecto em exploração de jazigo kimberlítico.

## CAPÍTULO II– FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

### 2.1 Definições de Termos e Conceitos

**Rocha:** é um conjunto de substâncias minerais que formam massas, sendo que esses constituem grande parte da crosta terrestre.

**Maciço rochoso:** consiste em unidades geológicas que compõem a superfície terrestre. São formados por aglomerados de rochas, sejam elas ígneas, sedimentares ou metamórficas.

**Rochas encaixante:** diz-se das rochas que se alojam no corpo do minério.

**Descontinuidades:** define-se como a separação entre os maciços rochosos, com a sua tensão seja ela pouca ou nula quanto à resistência à tração, sendo este um plano de fraqueza.

**Juntas:** são fendas de retração que ocorrem nas massas magmáticas já consolidadas durante o arrefecimento

**Solos:** materiais que resultam do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. (CAPUTO, 1988).

**Intemperismo:** é o conjunto de processos físicos (desintegração) e químicos (decomposição) das rochas e minerais submetidos à ação dos agentes atmosféricos e biológicos

**Mineral:** é um sólido natural, macroscopicamente homogêneo, possuindo uma estrutura atômica ordenada e uma composição química definida.

**Minério:** toda substância ou agregado de mineral, rocha ou solo que pode ser aproveitado tecnicamente.

**Jazida:** denominação de depósito mineral passível de ser aproveitado economicamente. Não sendo possível seu aproveitamento econômico denomina-se de ocorrência mineral.

**Jazigo:** são acumulações ou concentrações anômalas locais de rochas e mineirais úteis ao homem.

**Cava:** escavação destinada à obtenção de substâncias úteis ao homem como minérios, combustíveis água, etc.

**Taludes:** são superfícies inclinadas em relação a horizontal que delimita uma massa de solo, rocha ou outro material qualquer. Podendo ser natural ou artificial como na mineração.

**Resistência ao cisalhamento:** define-se como resistência ao cisalhamento do solo como a máxima pressão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento.

**Factor de segurança (FS):** é o factor pelo qual os parâmetros de resistência podem ser reduzidos de tal forma a tornar o talude em estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície.

## **2.2 Caracterização dos maciços rochosos**

O crescente desenvolvimento de obras geotécnicas tem levado ao reconhecimento da relevância da caracterização geológica e geotécnica dos maciços e solos. Em obras cuja implantação interfere com a estabilidade, especialmente obras de projectos de taludes, escavações, barragens etc, deve dar-se especial atenção ao comportamento do maciço rochoso, com isto é importante que se tenha o conhecimento das propriedades dos maciços rochosos e solos bem como as suas características de auto-sustentação (GONÇALVES, 2016). Do ponto de vista geotécnico, o estudo das rochas dá lugar ao estudo dos maciços rochosos. Do ponto de vista geológico, as rochas são unidades estruturais mais ou menos bem definidas, que constituem a crosta terrestre.

### **2.2.1 Classificação geomecânica dos maciços rochosos**

Minas à céu aberto assim como as obras geotécnicas de forma geral, encontram-se expostas a factores que podem variar as suas características de auto-sustentação ou seja as características que garantem a resistência geotécnica dos materiais, assim como incertezas ao longo da elaboração do projecto e execução dos trabalhos. A classificação dos maciços rochosos é importante para auxiliar na definição das características geotécnicas de determinada área. As classificações são feitas com base nas seguintes etapas de estudo:

1. Fazer um mapeamento geológico da área, com vista a classificação das rochas;

2. Estudar as características das discontinuidades por observação e ensaio in situ;
3. Caracterizar mecanicamente as rochas em laboratório e em campo;
4. Definir a descrição de propriedades físicas, composição mineralógica, grau de saturação, peso específico, porosidade, resistência a compressão e tracção etc.

O interesse destas classificações consiste também em sistematizar um conjunto de elementos geotécnicos que interessa caracterizar num determinado maciço rochoso.

### 2.2.1.1 Sistema Rock Mass Rating(RMR)

O Sistema de classificação RMR, tem por objectivo caracterizar os parâmetros que são condicionantes do comportamento dos maciços rochosos, esta classificação foi desenvolvida por Bieniawski (1973). O sistema considera cinco parâmetros para a sua classificação, sendo estes representados na tabela.

Tabela (2.1) - Parâmetros para classificação dos maciços rochosos no sistema RMR

Parâmetros		Valores					
Resistência da compressão intacta	puntiforme	> 10Mpa	4 – 10 Mpa	2 – 4 Mpa	1 – 2 MPa	Ver comp. Uniaxial	
	uniaxial	>250 Mpa	100–250MPa	50 –100 MPa	25 – 50 MPa	5–25 MPa	1–5 MPa
RQD		90-100%	75 – 90%	50 – 75%	25 – 50%	< 25%	
		superfícies muito rugosas sem separação, paredes de rocha	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm	Superfícies ligeiramente rugosa, separação <1mm,	Superfícies com espessuras <5mm ou juntas contínuas com	Enchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com	

Padrão das descontinuidades		não alterada	paredes ligeiramente alterada	paredes muito alteradas	separação 1-5mm	separação >5mm
Espaçamento das descontinuidades		> 2mm	2 - 0,6m	0.6 – 0.2m	0.2 – 0.06m	< 0.06m
presença de água subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	Nenhum	< 10L/min	10 - 25L/min	25- 125L/min	> 125L/min
	Pressão da água na fratura/tensão principal	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5
	Condições gerais	Seco	Água intersticial	Húmido	Escorregamentos	Entrada de água

Fonte: Bieniawski (1973)

Para a determinação dos parâmetros de resistência da rocha, no sistema RMR básico, o maciço rochoso pode ser classificado segundo a tabela abaixo.

Tabela (2.2) - Correlação entre as classes definidas pelo RMR e parâmetros de resistência dos maciços rochosos.

<b>Classificação dos maciços rochosos de acordo com o RMR</b>					
Valor	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre
Coesão(KPa)	> 400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	<100
Ângulo de atrito	> 45°	35 a 45°	25 a 35°	25 a 15°	< 15°

Fonte: Bieniawski Z. T., (1989)

### 2.2.1.2 Sistema (Q)

Este sistema analisa seis parâmetros, a partir da expressão matemática abaixo a que atribuem pesos (BARTON, 1974), (tabelas ver nos anexos).

$$Q = [RQD/J_n] \times [J_r/J_a] \times [J_v/SRF]$$

Onde:

RQD---Designa a Qualidade da Rocha

Jn-----Influência do número de famílias de descontinuidades

Jr----- Influência da rugosidade das paredes

Ja----- Influência da alteração das paredes

Jv----- Influência da acção das águas subterrânea

SFR--Influência do estado de tensões (Valor variável de 0,001 a 1000).

Para determinar a qualidade no maciço segundo o índice RQD, foram propostos os intervalos apresentados na tabela abaixo.

Tabela (2.3) - Qualidade dos maciços segundo o índice RQD

<b>RQD (%)</b>	<b>Qualidade do maciço</b>
90 – 100	Excelente
75 – 90	Bom
50 – 75	Razoável
25 – 50	Fraco
0 – 25	Muito fraco

Fonte: Deere et al. (1967).

Com base no número de descontinuidades por unidade de volume num maciço rochoso, a estimação do RQD, pode ser feita pela equação a baixo:

$$\text{RQD} = 115 - 3.3J_v$$

Sendo que  $J_v$  corresponde ao índice volumétrico, é determinado apurando o número de descontinuidades que interceptam um bloco de volume igual a  $1\text{m}^3$ .

### **2.2.2 Descontinuidades**

A estrutura de um maciço rochoso é representada em função da distribuição das descontinuidades e suas características geométricas, isso permite ter o conhecimento das variáveis que podem condicionar o comportamento de um maciço rochoso. As caracterizações geológicas classificam geralmente as descontinuidades de acordo com o modo da sua formação (RAFAELLA 2019). Isto é usual na geologia de engenharia porque descontinuidades de cada categoria têm propriedades similares no que respeita às dimensões e propriedades de resistência ao deslizamento que podem ser utilizadas nas análises preliminares das condições de estabilidade do local. A presença de descontinuidades no maciço bem como a alteração das rochas por processos intempéricos são os principais factores no controle de sua resistência mecânica e deformacional. A avaliação das propriedades geotécnicas de um maciço rochoso inclui o conhecimento da composição litológica, seu estado de alteração, sua coerência (tenacidade) e determinação em campo da ocorrência e características das descontinuidades no maciço.

Segundo Rafaella (2019), as descontinuidades comuns que ocorrem nos maciços rochosos, são representadas por juntas, falhas, contactos litológicos e foliações metamórficas. Tendo em conta as descontinuidades que os maciços podem apresentar, a que destacar a presença de alguns factores que actuam directamente na instabilização ou seja actuam como plano de fraqueza nos maciços rochosos, dos quais podem ser citados os seguintes:

✓ Presença de água

A presença de água, determina a existência e o fluxo de água que passa pela descontinuidade. O conhecimento do comportamento das águas no interior do maciço é importante, pois a presença de água diminui a resistência ao cisalhamento, servindo como uma espécie de lubrificante para a junta.

✓ Abertura

Esse aspecto é importante para definir se existe alteração, preenchimento ou fluxo de água na descontinuidade, factores que influenciam na resistência ao cisalhamento da descontinuidade. Ela é definida como a distância média dos blocos de uma junta, o espaço entre as paredes da junta.

✓ Espaçamento

É um parâmetro que influencia directamente na qualidade ou resistência do maciço rochoso como um todo. É definido como a média das distâncias das descontinuidades de uma família.

Apresentam-se de seguida os tipos mais frequentes de descontinuidades que se podem observar nos maciços rochosos.

- Falha

Fractura em que houve um deslocamento de grandeza significativa ao longo da superfície de separação das partes, esta é usualmente designada por superfície ou plano de falha.

- Superfície de estratificação

Descontinuidade paralela à superfície de deposição dos sedimentos, a qual pode ou não ter uma expressão física.

- Foliação

Descontinuidade determinada pela orientação paralela dos minerais lamelares ou bandas minerais nas rochas metamórficas.

- Diaclase

Fractura onde não observam deslocamento significativo ao longo da superfície de rotura. Em geral as diaclases intersectam superfícies primárias tais como superfícies de estratificação, de clivagem e de xistosidade.

### 2.2.3 Parâmetros de resistência de maciços rochosos

Para projectos de escavação em maciços rochosos, a resistência destes é um dos factores a ter em conta, já que a mesma influencia diretamente na estabilidade requerida. Este parâmetro é bastante importante para que se faça o cálculo ou seja para o estudo da resistência dos maciços rochosos. Com isso define-se a escolha ideal dos parâmetros de resistência para usar no estudo dos maciços, tendo em conta as escavações dos mesmo e principalmente do mecanismos de rotura e de vários factores que podem influenciar diretamente na alteração das características da resistência do maciço rochoso. Em projecto de taludes de rocha (análise da estabilidade), é importante ter informações relativamente a resistência ao cisalhamento estas informações são obtidas em função de ensaios dos maciços rochosos. Rafaella (2019), é de opinião que embora existam vários critérios para a determinação dos parâmetros de resistência de um material, o mais conhecido é o de Mohr-Coulomb. Neste critério existe um envoltório de rotura linear em relação a todos os círculos de Mohr que indicam combinações críticas ligadas às tensões principais. Existem entretanto, outros critérios para determinação de parâmetros de resistência do material, como o de Hoek e Brown (1980), sendo que estes são mais empíricos e precisos. Os parâmetros de resistência dos maciços ou das discontinuidades podem ser obtidos através de ensaios **in situ** nos quais todas as características do comportamento **in situ** da discontinuidade rochosa são reproduzidas tão precisamente quanto possível, ou através de ensaios de laboratórios na forma de ensaios sofisticados. Esses parâmetros de resistência são necessários para o cálculo da resistência dos maciços rochosos.

- Resistência a compressão simples da Rocha

Esse parâmetro é fundamental porque ela nos dá as informações acerca da resistência da rocha não alterada, são muito importantes porque esses parâmetros, estipulam através de métodos simples o valor aproximado da

resistência à compressão uniaxial.

Tabela (2.4) - Parâmetro de resistência a compressão simples

Fonte: Deere et al. (1967)

Referem-se em seguida algumas propriedades importantes para a classificação das rochas tendo em conta a sua consistência.

Tabela (2.5) - Parâmetro para a classificação das rochas em função da sua consistência

<b>Rocha</b>	<b>Característica</b>
Muito consistente	<ul style="list-style-type: none"><li>• Quebra com dificuldades ao golpe de martelo;</li><li>• O fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço;</li><li>• Superfície dificilmente riscada por lâmina de aço.</li></ul>

<b>Rocha</b>	<b>Resistência (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Muito resistente	> 1,200
Resistente	1,200 — 600
Pouco resistente	600 — 300
Branda	300 — 100
Muito branda	< 100

Consistente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quebra com relativa facilidade ao golpe de martelo;</li> <li>• O fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas com lâmina de aço;</li> <li>• Superfície riscável por lâmina de aço.</li> </ul>
Quebradiça	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quebra facilmente ao gope de martelo;</li> <li>• As bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos;</li> <li>• A lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento.</li> </ul>
Friável	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfarela ao golpe do martelo;</li> <li>• Desagrega sob pressão dos dedos.</li> </ul>

Fonte: ISRM (1981)

### 2.3 Caracterização geomecânica dos solos

Os problemas de rotura em mecânica dos solos normalmente envolvem uma superfície de rotura, na qual poderá ser definida como aquela onde em todos os seus pontos, a tensão de cisalhamento atinge o valor limite da resistência ao cisalhamento do solo. A resistência ao cisalhamento de um solo em qualquer direção é a tensão de cisalhamento máxima que pode ser aplicada à estrutura do solo naquela direção, quando este máximo é atingido diz-se que o solo rompeu, tendo sido totalmente mobilizada a resistência do solo. Exemplos típicos onde a determinação da resistência ao cisalhamento do solo é que condiciona o projecto são as análises de estabilidade de taludes (aterros e cortes). Na figura (2.1), estão representados de forma esquemática estas solicitações citadas acima.

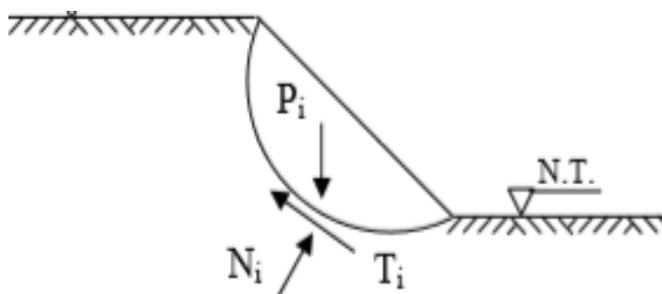


Figura (2.1) - Estabilidade de taludes em encostas naturais (TERZAGHI 1953)

O factor de segurança ( $F_s$ ) contra a rotura é calculado como a razão entre as forças estabilizadoras e as forças instabilizadoras:

$$F_s = \frac{\text{forças estabilizadoras}}{\text{forças instabilizadoras}}$$

Em mecânica dos solos a resistência ao cisalhamento envolve duas componentes: atrito e coesão.

### 2.3.1 Atrito

O atrito é função da interação entre duas superfícies na região de contacto. A parcela da resistência devido ao atrito pode ser simplificada demonstrada pela analogia com o problema de deslizamento de um corpo sobre uma superfície plana horizontal.



Figura (2.2) - Atrito entre dois corpos no instante do deslizamento (TERZAGHI 1953)

A resistência ao deslizamento ( $\tau$ ) é proporcional à força normal aplicada ( $N$ ), segundo a relação:  $T = N \cdot R$

onde ( $R$ ) é o coeficiente de atrito entre os dois materiais. Para solos, esta relação é escrita na forma de:

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}\phi$$

Onde:

$\phi$  --- Ângulo de atrito interno do solo;

$\sigma$  --- Tensão normal; e

$\tau$  --- Tensão de cisalhamento.

### 2.3.2 Coesão

A coesão é aquela resistência que a fracção argilosa empresta ao solo pelo qual ele se torna capaz de se manter coeso em forma de blocos e pode ser cortado em formas diversas e manter esta forma. Os solos que têm essa propriedade chamam-se coesivos. Os solos não-coesivos que são areias puras e pedregulhos, desfazem-se facilmente ao serem escavados. No caso dos solo saturados a sua coesão tende a zero.

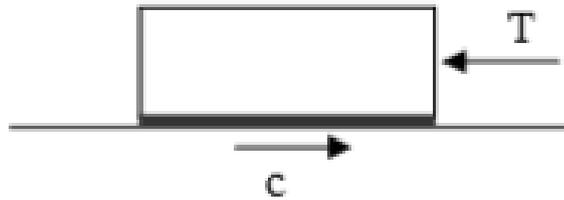


Figura (2.3) - Resistência ao cisalhamento devido à coesão (TERZAGHI, 1953)

### 2.3.3 Tensões no solo

Os problemas relacionados com a resistência dos solos normalmente são analisados pelos conceitos de equilíbrio limite, este parâmetro leva-nos a considerar o instante de rotura quando as tensões actuantes igualam a resistência do solo sem atentar para as deformações. Em qualquer ponto de uma massa do solo existem três planos ortogonais onde as tensões cisalhantes são nulas, estes planos são chamados: planos principais de tensões.

$\sigma$  = Tensões normais

$\tau$  = Tensões cisalhantes

O princípio básico introduzido por Terzaghi que em solos saturados a tensão efectiva é igual a diferença entre a tensão total e a tensão neutra ( $\sigma' = \sigma - u$ ).

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

Onde:

$\sigma'$  --- Tensão efectiva;

$\sigma$  ----Tensão total; e

$u$  ----Poro-pressão (tensão neutra).

A análise em termos efectivos é teoricamente mais correcta pois a resposta do solo a qualquer tipo de solicitação depende da tensão efectiva. É claro que a movimentação do solo e a instabilidade dele pode ser causada por mudanças na tensão total, devida as cargas de fundações ou escavações em geral. O princípio das tensões efectivas foi estabelecido por Terzaghi em (1953).

### 2.3.4 Pressões verticais totais

Foi visto anteriormente como calcular o valor da pressão vertical inicial  $\sigma_{v0}$  em um solo seco. Se o solo apresentar água, o cálculo das pressões também é muito simples, bastando considerar separadamente as camadas abaixo e acima do NA e aplicar a equação abaixo. Tem-se então, para o ponto **A** da figura (2.4).

$$\sigma_{v0} = \gamma Z + \gamma_{sat} Z_2$$

No solo a tensão vertical em uma determinada profundidade é devida ao peso de tudo que se encontra acima ou seja, grãos de solo, água, fundações, desta forma, a tensão normalmente aumenta com a profundidade, verifica-se que ( $\gamma$ ) é o peso de tudo (solo e água) por unidade de volume.

- Como  $\sigma_{v0}$  advém do peso total do solo ele é conhecido como tensão total.
- Existem também as tensões horizontais  $\sigma_h$ , mas não existe uma relação simples entre  $\sigma_{v0}$  e  $\sigma_{h0}$ .

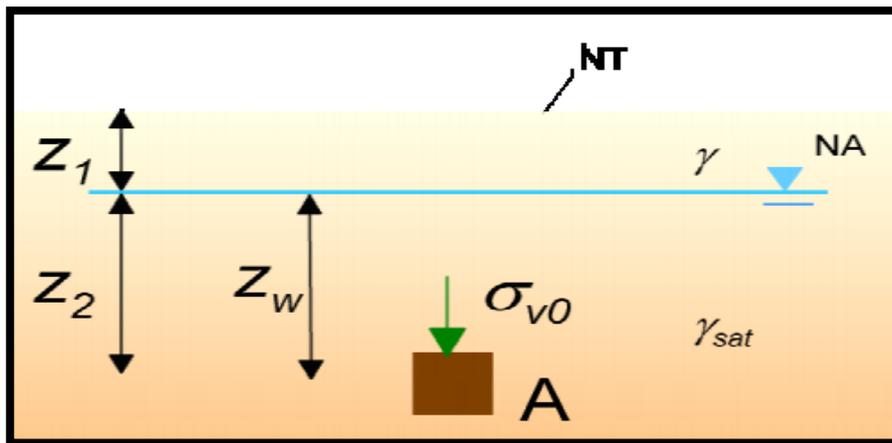


Figura (2.4) - Cálculo de  $\sigma_{v0}$  em solo com água (ORTIGÃO, 1995)

### Água no solo

O ingresso da água no solo através de infiltração no terreno e a ocorrência de um perfil estratificado com uma sucessão de camadas permeáveis e impermeáveis, permitem a formação de lençóis freáticos ou artesianos. Quando os vazios do solo estiverem preenchidos com água sob pressão  $u$ , as tensões totais são compostas por duas parcelas: uma parcela  $u$  que actua na água e nos grãos sólidos em todas as direções com mesma intensidade, denominada de pressão neutra ou poro-pressão; e a outra parcela é a tensão efetiva que é aquela suportada exclusivamente pela parte sólida do solo.

Note que a água aplica uma tensão total na superfície do solo da mesma forma que a água aplica uma tensão na base de um copo de água. Por sua vez o peso específico de solos varia aproximadamente entre  $20\text{kN/m}^3$  para um solo saturado e  $16\text{kN/m}^3$  para um solo seco e o peso específico da água vale  $10\text{kN/m}^3$  (ORTIGÃO, 1995).

### Exemplo 2.1

Para um perfil abaixo de solo saturado deseja-se a tensão total  $\sigma_{v0}$  no ponto A, com o NA na posição indicada na figura (2.5) e 2m acima do nível do terreno.

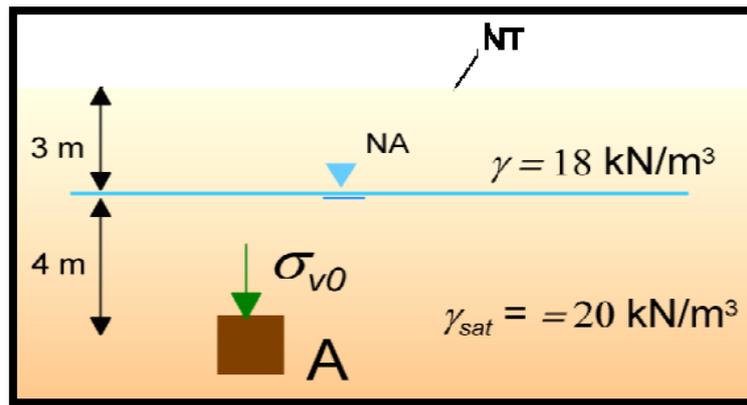


Figura (2.5) - Cálculo de  $\sigma_{v0}$  (ORTIGÃO, 1995)

Segundo Ortigão (1995), o valor de  $\sigma_{v0}$  é calculado considerando duas camadas de solo com diferentes valores do peso específico aparente:

$$\sigma_{v0} = 3\text{m} \times 18\text{kN/m}^3 + 4\text{m} \times 20\text{kN/m}^3 = 134\text{KPa}$$

Se o NA estiver 2m acima do NT, considera-se a pressão da água ao nível do terreno que será somada às parcelas do solo:

$$\sigma_{v0} = 2\text{m} \times 10\text{kN/m}^3 + 3\text{m} \times 18\text{kN/m}^3 + 4\text{m} \times 20\text{kN/m}^3 = 154\text{KPa}$$

### 2.3.5 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

O diagrama de Mohr, apresenta o estado de tensões em torno de um ponto da massa de solo, a linha que tangencia estes círculos é definida como envoltória de ruptura de Mohr, o envoltório de Mohr é geralmente uma curva embora com frequência ela seja associada a uma recta.

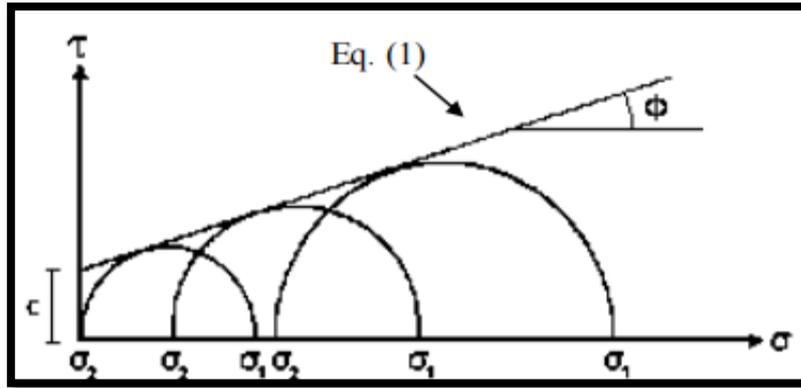


Figura (2.6) Critério de ruptura de Mohr-Coulomb (MATOS, 2006)

Nos solos estão presente os fenômenos de atrito e coesão, portanto, determina-se a resistência ao cisalhamento dos solos ( $\tau$ ), segundo a equação:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \text{ou} \quad S = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Onde:

$\tau$ --- Resistência ao cisalhamento do solo;

$c$ --- Coesão ou intercepto de coesão;

$\sigma$ --- Tensão normal vertical;

$\varphi$ --- Ângulo de atrito interno do solo.

Como princípio geral, deve se ter encontra que o fenômeno de cisalhamento é basicamente um fenômeno de atrito e que portanto a resistência ao cisalhamento dos solos depende predominantemente da tensão normal ao plano de cisalhamento.

Para solos não saturados a equação descrita anteriormente não se adequa, para melhor descrever o comportamento volumétrico do solos não saturados, os autores (Ng & Shi, 2003), introduziram os parâmetros  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ , os quais foram posteriormente adotados por Fredlund e Morgenstern para realizar análises em solos não saturados. Para o solo acima do nível freático, a pressão intersticial é negativa em relação à pressão atmosférica esta pressão negativa é comumente referida como sendo a sucção matricial do solo. Alguns autores desenvolveram uma expressão o chamado critério de ruptura de Mohr-Coulomb modificado para solos não saturados de modo a ter em conta a

influência desta pressão negativa na resistência ao corte do solo, a referida equação apresenta-se em seguida.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b$$

Onde:

$c'$ --- Coesão efetiva;

$\varphi'$ --- Ângulo interno de atrito do solo;

$\varphi^b$ -- Ângulo de atrito relativo à sucção, representando a contribuição para a resistência ao corte do material devido à sucção matricial;

$(\sigma - u_a)$  --- Tensão normal líquida; e

$(u_a - u_w)$  -- Sucção matricial.

## **CAPITULO III -ESTABILIDADE DE TALUDES**

### **3.1 Generalidades**

A mineração à céu aberto pode ser definida como o processo de escavação de qualquer depósito de minério perto da superfície por meio de uma escavação ou corte, usando uma ou mais bancadas horizontais para extrair o minério enquanto a deposição de estéril e rejeitos é feita em um local dedicado à sua eliminação fora do limite de cava final. Na mineração à céu aberto um dos aspectos muito importantes a ter em conta no projecto implantado é a geometria da cava, sua importância se verifica nos aspectos económicos do empreendimento incluindo as questões relacionadas à segurança

Os taludes construídos são resultantes de cortes em encostas, de escavações ou de lançamentos de aterros. *Quando se tratam de cortes, deve-se tomar o cuidado para que sejam executados de maneira a garantir altura e inclinação adequada para manter a estabilidade do mesmo (GERSCOVICH, 2016).*

#### **3.1.1 Movimentos de massas**

Em determinadas circunstâncias uma parte do material de um talude pode desarticular-se em relação ao maciço restante provocando o processo denominado de movimentos de massa que ocorre ao longo de uma determinada superfície denominada superfície de rotura. Os movimentos de massa podem evoluir de maneira muito lenta até eventos catastróficos.

Tipos diferentes de roturas de taludes são associadas com tipos diferentes de estruturas geológicas e é importante que o projectista de taludes seja capaz de reconhecer o potencial de instabilidade durante o primeiro estágio do projecto. Sendo assim, os movimentos colectivos de solo e de rocha podem ser classificados em: escorregamentos em ruptura circulares, ruptura planar, ruptura em cunha e ruptura em tombamento.

### 3.1.2 Causas dos movimentos de massa

As principais causas de movimentos de massa recorrente nos taludes de mineração são nomeadamente o aumento de peso do talude, provocado pela sobrecarga imposta sobre o topo das encostas e alteração de geometria do mesmo ocasionado principalmente pelo descalçamento do seu pé através de cortes ou escavações. A infiltração de água que elevam as pressões neutras reduzem a resistência do solo ou seja provocam o amolecimento dele que consequentemente diminui os parâmetros de resistência, principalmente a coesão aparente. De um modo geral pode-se dizer que os processos de instabilização são controlados por uma cadeia de eventos geralmente de comportamentos cíclicos que tem origem na própria formação da rocha e na acção geológica e geomorfológica subsequente (intemperismo, erosão, acção antrópica, etc). Vários são os factores que podem causar os movimentos de massas, esses factores são classificadas como causas e agentes e podem ser definidos de seguinte forma:

**Causa:** é o modo de actuação de determinado agente ou seja quando um agente pode ocorrer por meio de uma ou varias causas. De acordo com Terzaghi (1953), essas causas podem ser classificadas em externas e internas:

**Causas externas:** são aquelas que alteram o estado de tensões actuantes sobre o maciço, resultando em um acréscimo das tensões cisalhantes que igualando ou superando a resistencia do solo ou rocha, levam o maciço a condição de ruptura, nomeadamente:

- Mudança da geometria do talude (inclinação e/ou altura), devido a cortes ou aterros, no talude ou em terrenos adjacentes;
- Aumento da carga actuante;
- Actividades sísmicas, e outras...

**Causas internas:** são aquelas que actuam reduzindo a resistencia ao cisalhamento do solo ou rocha constituinte do talude sem ferir o seu aspecto geométrico. Por sua vez a variação do nível de água (N.A.), que pode gerar:

- Aumento do peso específico do material;
- Aumento da poro-pressão diminuição da pressão efetiva;
- Rebaixamento rápido do NA;

- Diminuição da resistência do solo.

<b>Acção</b>	<b>Factores</b>	<b>Fenómenos geológicos</b>
Aumento da solitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão; Escorregamentos e Cortes
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, neve, granizo etc. Acúmulo natural de material (depósitos). Peso da vegetação, Construção de estruturas, aterros etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas, Congelamento e Material expansivo
Redução da resistência	Características inerentes ao material (geometria, estruturas etc.)	Características geomecânicas do material, Tensões
	Mudanças ou factores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito, Variação das poropressões.

Tabela (3.1) – Factores causadores dos movimentos de massa

Fonte: Varnes, (1978)

A instabilidade do talude será deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualarem à resistência ao cisalhamento, esta condição pode ser atingida com o aumento das tensões cisalhantes mobilizadas ou pela redução da resistência. Tendo em conta o raio de acção, os factores deflagradores dos movimentos de massa podem ser divididos em dois grupos, como mostra a tabela.

Tabela (3.1) – Factores causadores dos movimentos de massa

Fonte: Varnes, (1978)

### **3.2 Estudo da estabilidade e caracterização dos parâmetros geométricos dos taludes de mineração**

A estabilidade de taludes é um assunto que tem sido bastante estudado assim sendo as pesquisas relacionadas a este campo do conhecimento concentram-se no desenvolvimento técnico-científico relacionado as diversas áreas do conhecimento. A instabilidade nos taludes podem envolver perdas económicas e de vidas humanas. Com isso, verifica-se que caso haja o rompimento de taludes, os impactos podem ser resumidos em três factores:

#### **1) Segurança / factores sociais**

- Perdas de vidas / invalidez
- Perda de confiança dos trabalhadores
- Perda de credibilidade da corporação tanto externamente como os accionistas.

#### **2) Factores económicos**

- Interrupção das operações
- Perdas de minérios
- Perdas de equipamentos
- Aumento de remoção de estéril

### 3) Factores ambientais

- Impactos ambiental
- Impacto no fechamento da mina

A aplicação de estudo de estabilidade dentro da área de exploração mineral é necessária principalmente quando a extracção realizada não é subterrânea ou seja, quando é feito em uma mina acéu aberto com escavação de cavas composto de taludes e bancadas. Na mineração à céu aberto, um dos aspectos muito importante do projecto implantado é a geometria da cava, sua relevância se estende desde aspectos econômicos do empreendimento até as questões relacionadas à segurança, uma das variáveis que influenciam directamente na geometria da cava é o ângulo geral de talude.

#### Ângulo geral de talude

O ângulo geral de talude é um dos elementos mais influentes sobre o tamanho e a forma da mina. O ângulo geral de talude de uma secção pode ser determinado de acordo com a equação a baixo.

$$\alpha = \arctg\left(\frac{H}{P}\right)$$

Onde:

H --- Altura da bancada;

P --- Projecção horizontal do talude geral na secção;

Segundo Vásquez et al. (1998), o ângulo de inclinação pode restringir a operação de lavra, isso porque a sua pequena variação pode gerar dois efeitos diretos:

- Alterações na estabilidade da inclinação e da exploração.
- Alterações nos benefícios econômicos da exploração.

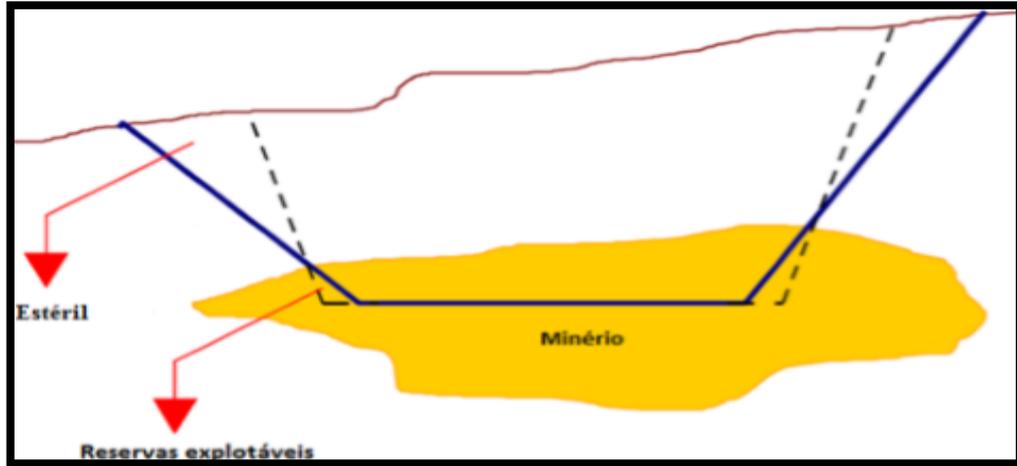


Figura (3.1) - Representação do talude segundo a componente segurança vs economia Vázquez et al. (1998).

Os ângulos de taludes determinam o formato final da cava, quanto maior for o ângulo, menos estéril deve ser retirado para o mesmo volume de minério. Um dos aspectos a ter em conta são os ângulos muito altos, sendo que estes podem ser os factores principais para a instabilização dos taludes em questão. Os ângulos de taludes, normalmente são determinados pelo estudo das condições dos maciços através da mecânica de rochas e é adoptado o maior valor que seja seguro o suficiente para a operação.

- Parametros geométricos das bancadas de mineração e as nomenclaturas usadas.

Os parâmetros mostrados na figura(3.2), são definidos segundo os factores explicados a seguir.

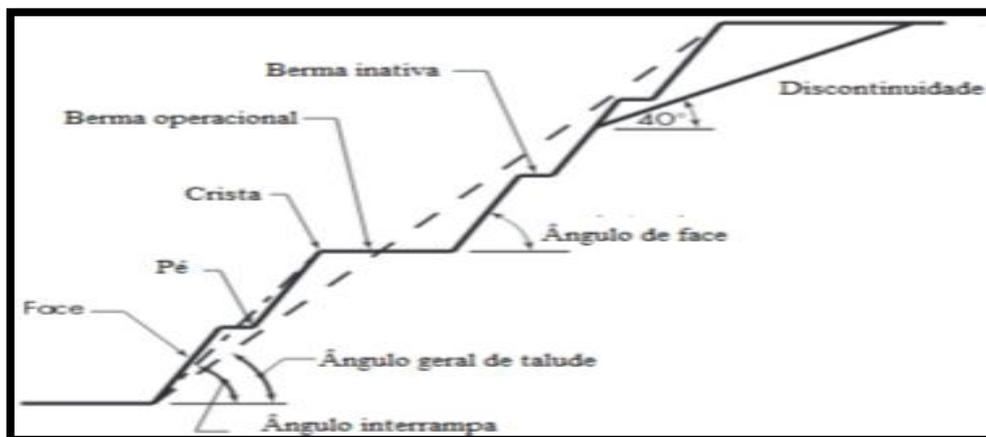


Figura (3.2) - Geometria das bancadas em mineração e a nomenclatura usada (KLICHE, 2011).

**Altura da bancada:** usualmente é definida por considerações de operação (eficiência da maquinaria e equipas de carga dentro da mina) e pelas condições geotécnicas.

**Ângulo de talude:** é o ângulo que forma o talude da bancada com o plano horizontal ou vertical, geralmente é definida segundo a geologia estrutural (geotecnia) presente no maciço rochoso no nível da bancada, mas também depende fortemente da qualidade do explosivo e o dano provocado por ele dentro do maciço rochoso.

**Crista de bancada:** é o limite superior do perfil do banco ou bancada.

**Pé de bancada:** é o limite inferior do perfil do talude.

**Berma:** superfície compreendida entre o pé da bancada superior e a crista da bancada inferior. Distinguem-se duas bermas de trabalho a superior e inferior; a berma superior é conhecida como TOPO sendo a superfície onde operam os equipamentos de perfuração; a berma inferior é conhecida como PRAÇA sendo a superfície onde operam os equipamentos de carga.

**Largura da berma:** é definida pelo volume dos deslizamentos causados pelas instabilidades controladas estruturalmente no nível das bancadas, os quais devem ser contidos pelas bermas.

**Ângulo inter-rampa:** corresponde à inclinação entre uma linha horizontal e a linha imaginária que une o pé das bancadas.

**Largura da rampa:** normalmente é definido por razões operacionais, associadas às equipes de transporte.

- **Altura da Bancada**

Este parâmetro é fundamental tendo em conta a segurança e economicidade das operações, deve ser tal que qualquer perturbação do equilíbrio dos níveis tenha efeitos apenas locais, além de adequado ajuste entre a escala de produção desejada e os equipamentos de lavra disponíveis. A altura

das bancadas é determinada, geralmente em função do tamanho do equipamento de escavação e carregamento, das características do maciço, das exigências de selectividade e do resultado do desmonte (FERREIRA, 2013).

- Largura da Berma

A bancada é feita para a divisão do talude geral, quebrando sua continuidade com dimensões e posicionamento em níveis adequados, também servindo de acesso aos diferentes níveis. A largura da berma é dimensionada de tal maneira que permita o acesso de equipamentos destinados à remoção dos materiais desmontados, mas evitando que os materiais desmontados atinjam níveis inferiores, as bancadas são normalmente dimensionadas para reter algum material desagregado das paredes superiores evitando assim o seu deslocamento até as partes inferiores da mina (FERREIRA, 2013).

A largura das bermas é um parâmetro ligado a altura das bancadas. Sendo assim a equação abaixo apresenta esta relação:

$$L_B = 4,5m + 0,3.h_B$$

Onde:

$L_B$ - Largura da Berma;

$h_B$ - Altura da bancada.

Obs: Em algumas situações, esta relação pode variar em função das características geotécnicas do talude a ser estudado.

### **3.2.1 Parâmetros geométricos antes dimensionados na mina de camatchia**

A exploração mineira do jazigo é efectuada mediante a técnica de penetração por espiral em bancadas consecutivas de cima para baixo, como mostra a figura.

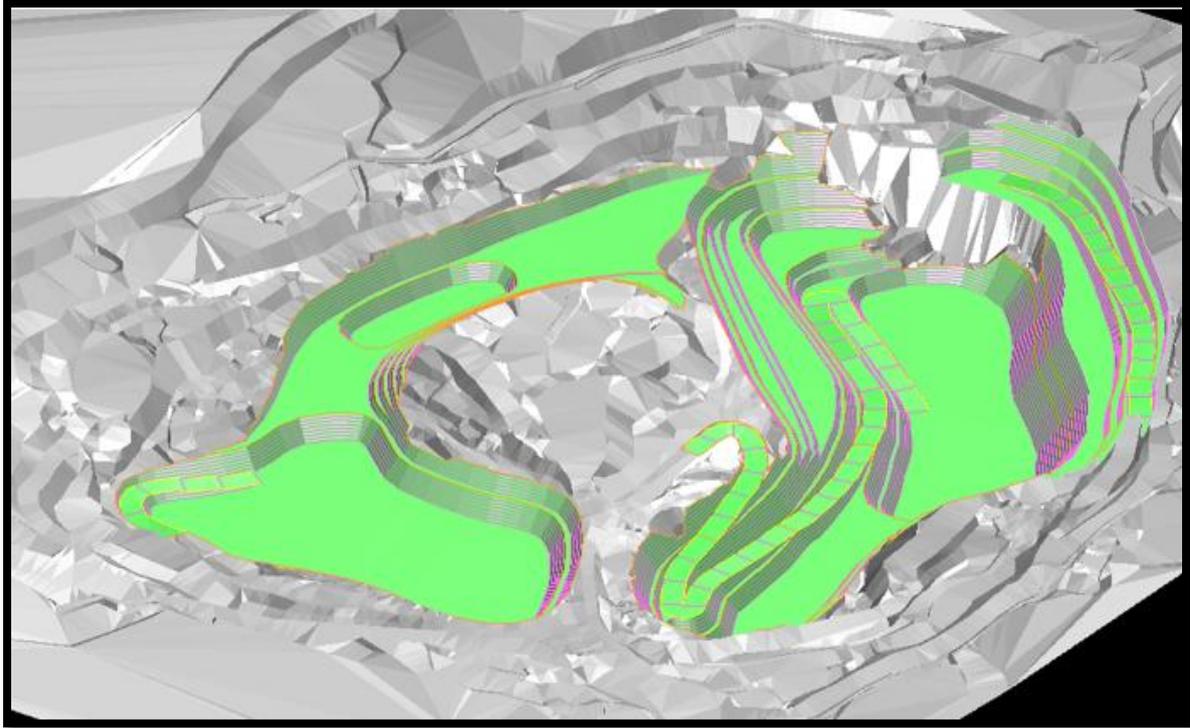


Figura (3.3) -Desenho da mina de camatchia modelo geológico 2011

Fonte: Projecto lunhinga

As alturas das bancadas foram dimensionados em 10m cada; com vista a garantir a segurança na estabilidade dos mesmos, os ângulo de talude das bancada não operacional nas rochas sobrejacentes (acima do horizonte +805m), foram estabelecidos em 40° a 45° para material menos consistentes, 60° a 65° para gnaisses menos consistentes e nos outros horizontes é de 75° a 80° para os gnaisses muito consistente.

A largura das bermas de transporte foi estabelecido em 30m, para zona superficial da mina

A largura das rampas para os acessos da superfície até ao fundo da cava (+760m) foi estabelecido em 30m; do horizonte (760 - 580m) em 28m; e de (580 – 535m) em 15m.O comprimento da superfície da mina é de 680m.

### 3.2.2 Geometrias actuais dos taludes de camatchia

Em função de vários factores como a exploração de lavra ambiciosa a que a mina esteve sujeita, problema de falta de licença de explosivo com vista a fragmentação de rochas e alguns factores de carácter geológicos, influenciaram negativamente na mudança da configuração geométrica da mina que antes foi projectado. Este factor se refletiu na mudança das alturas e dos ângulos dos taludes, o que resultou na mudança completa da estrutura da mina, Os exemplos são observados na figura.



Figura: (3.4) - Taludes formados por gnaisses resistentes limitando os blocos B1B2B5

Fonte: Foto tirada pelo autor

Na zona nordeste da mina, os ângulos dos taludes variam de  $85^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  e altura das bancadas variando entre 30 a 80m. Este facto constitui graves erros na geometria dos taludes da mina, estes fenómenos e ainda os problemas das águas que circulam nos taludes e ao longo do interior da cava, podem causar quedas de blocos, até mesmo gerar o rompimento dos taludes mais altos, esses elementos constituem os principais factores de instabilização dos taludes da mina, o que por sua vez constitui o problema para as operações.



Figura (3.5) – Taludes formado por gnaisses maciços, zona nordeste da mina

Fonte: Foto tirada pelo autor

Outro elemento a ter em conta à este fenómeno é o aprofundamento a mina, sendo que os estudos revelam que a profundidade da cava poderá atingir até 420m, com vista a exploração de minérios mais ricos. Com o avanço das operações a cava tende a funilar-se tornando mais complexo os acessos dos equipamentos para as operações e com isso, haverá então a necessidade de se alargar a mina no sentido de garantir o acesso dos equipamento com vista a continuação das operações com maior segurança e acessar as reservas antes condicionado pela segurança. Tendo em conta a estes problemas, surge então a necessidade que se faça o estudo da estabilidade e correção dos taludes da mina de camatchia.

### **3.2.3 Análise da estabilidade de taludes**

O objectivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo ou rocha presente em talude natural ou construído (mineração). Os métodos de análise de estabilidade desenvolvidos, buscam prever a possibilidade de rupturas pelo estudo das forças

que actuam ao longo de uma dada superfície potencial de ruptura, considerando estáveis taludes onde a relação entre os esforços resistentes e actuantes é maior que (1.0).

Tabela (3.2) - Condição dos taludes em função do factor de segurança

<b>Factor de segurança (FS)</b>	<b>Condição do talude</b>
FS > 1.0	Talude estável
FS = 1.0	Estabilidade incerta
FS < 1.0	Talude instável

Fonte: geostudio

### **3.2.3.1 Teoria do equilíbrio limite**

O método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície e que todos os elementos ao longo desta superfície atingem a condição de FS simultaneamente, assim pode-se citar os seguintes métodos para a análise da estabilidade do talude:

- ✓ Método de Fellenius - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em lamelas e não considera forças interlamelares;
- ✓ Método de Bishop Simplificado - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em lamelas, considera a resultante das forças interlamelares horizontal e as forças cisalhantes entre lamelas como nulas;
- ✓ Método de Janbu Simplificado - considera uma superfície de ruptura qualquer, a resultante das forças interlamelares é horizontal e um factor empírico ( $f_0$ ) é utilizado para considerar as forças cisalhantes interlamelares;

- ✓ Método de Janbu Generalizado - considera uma superfície de ruptura qualquer e a resultante das forças interlamelares é determinada por uma linha de empuxo assumida;
- ✓ Método de Spencer - considera uma superfície de ruptura circular, sendo introduzida em 1973 a ruptura por uma superfície qualquer e a resultante das forças interlamelares tem inclinação constante através da massa deslizante;
- ✓ Método de Morgenstern-Price - considera uma superfície de ruptura qualquer, a direção da resultante das forças interlamelares é determinada pelo uso de uma função arbitrária, onde ( $\lambda$ ) é um factor da função que deve satisfazer o equilíbrio de forças e momentos;
- ✓ Método de Sarma - considera a massa deslizante dividida em lamelas e que a resistência interna entre lamela é mobilizada.

## 1 - Superfícies de rupturas circulares

Em taludes com características mecânicas homogêneas e sem descontinuidades marcadas, os escorregamentos aparentam ter a forma de uma concha, o que levou ao desenvolvimento de métodos que consideram superfícies de ruptura de forma circular. Esse método permite que a estabilidade do talude possa ser avaliada através do equilíbrio de momentos em relação ao centro de superfície de ruptura. São adotadas tradicionalmente em solos superfícies de ruptura circular, o que dificilmente ocorre em rochas, excepto em maciços rochosos muito fraturados.

Critérios de resistência - em solos é normalmente empregado o critério de Mohr-Coulomb, (parâmetros de resistência  $c$  e  $\phi$ ). Já nas rochas depende das características das descontinuidades podendo ser empregado os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb ou Hoek & Brown.

- Método das Fatias

Este método normalmente é aplicado para a análise de solos e rochas que apresentam as seguintes condições:

1. Superfície irregular;
2. Solo heterogêneo incluindo distribuição de poropressões; e

### 3. Rochas muito fracturadas.

Para o cálculo do factor de segurança este método obedece as seguintes etapas:

- I. Subdividir o talude em fatias e assumir a base da fatia linear;
- II. Efectuar o equilíbrio de forças de cada fatia, assumindo que as tensões normais na base da fatia são geradas pelo peso de solo contido na fatia;
- III. Calcular o equilíbrio do conjunto através da equação de equilíbrio de momentos.

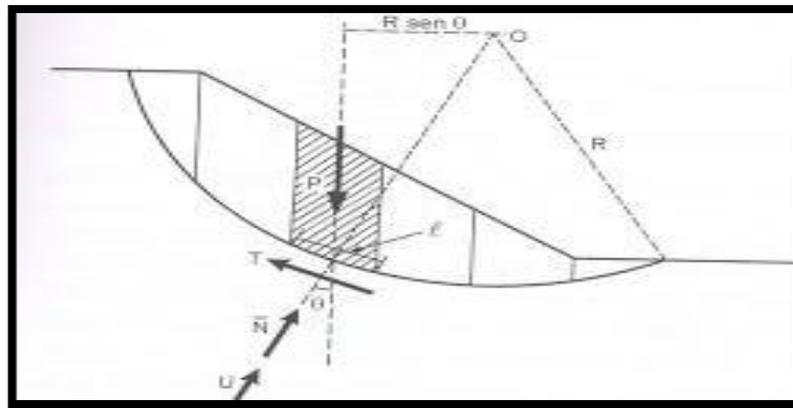


Figura (3.6) - Variáveis actuantes no movimento rotacional

Fonte: Massad, (2010)

Tendo em conta a figura (3.6), verifica-se então que este método analisa diversas superfícies de ruptura e aquela que apresentar o menor factor de segurança deverá realizar-se o cálculo. Na figura abaixo, estão representados alguns factores e variáveis que servem para análise do factor de segurança em cada fatia.

Tensão cisalhante mobilizada na base da fatia.

$$S = t_{mob} \cdot l$$

Onde:

Tensões efectivas

$$t_{mob} = c + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi$$

$$S = t_{mob} \cdot l = \frac{cl}{FS} + (N - ul) \frac{\operatorname{tg} \phi}{FS}$$

para tensões totais:

$$t_{m0b} = s_u \dots (\phi = 0)$$

$$S = t_{m0b} = \frac{s_u l}{FS}$$

Para casos de ruptura rotacional, o factor de segurança é determinado pela seguinte expressão matemática:

$$F_S = \frac{\sum [cl + (\gamma \cdot \cos \alpha - b \cdot \mu \cdot \sec \theta) \cdot \tan \phi]}{\sum (\gamma \cdot \sin \theta)}$$

Onde:

$c'$ ---Coesão efectiva do material;

$l$  ----Comprimento da fatia;

$\mu$ ----Pressão da água na superfície de ruptura;

$b$ ----Espessura da camada de água;

$\sec \theta$ -- Componente da poro pressão normal ao peso; e

$\gamma$ ----peso específico do material.

## 2- Superfícies de rupturas planas

Considera-se uma superfície de ruptura plana assumindo o bloco potencialmente instável conformado por uma descontinuidade cuja a direção é aproximadamente paralela à direção da face do talude e o mergulho é menor que o mergulho do talude de modo que esta intercepta a face do talude. Na análise da estabilidade de um talude deve-se levar em conta o equilíbrio entre estas três forças uma vez que a força peso dos materiais e a força de escoamento da água se somam e tendem a movimentar a massa de solo ou rocha para baixo enquanto a força de resistência ao cisalhamento é a força contrária as duas primeiras ou seja, é a força que faz com que o talude permaneça estático.

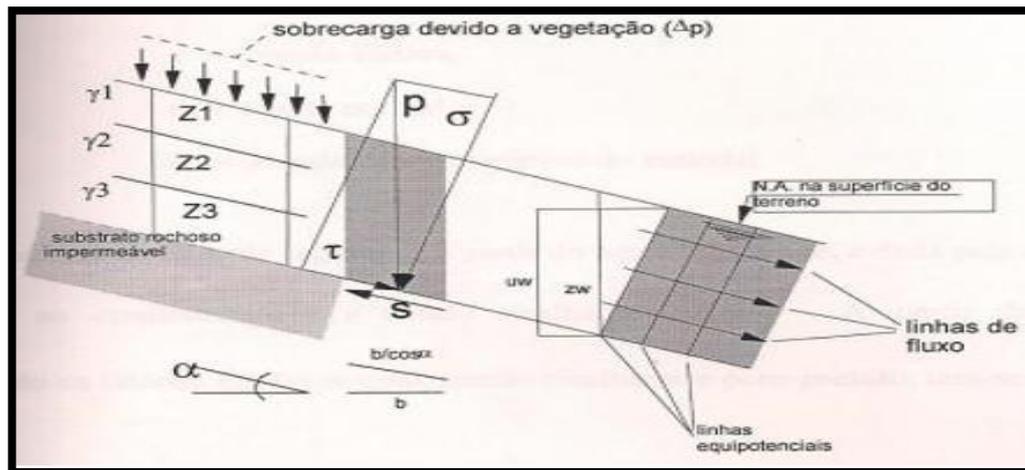


Figura (3.7) - Variáveis que influenciam no movimento translacional (FREIRE, 1965)

Com base figura (3.7), verifica-se então que o bloco é solicitado pelo seu peso ( $P$ ) e a componente tangencial ( $P \text{ sen } \alpha$ ) poderá então causar o movimento. A componente normal é igual a ( $P \text{ cos } \alpha$ ) e ( $S$ ) será então a força que poderá resistir qualquer movimentação do bloco e é caracterizado como a resistência ao cisalhamento do contacto fatia-plano inclinado. No caso de escorregamentos translacional do talude a ser analisado, pode se determinar o factor de segurança pela equação:

$$F_S = \frac{c + (\gamma_Z + \Delta p - \gamma_w Z_w) \text{cos}^2 \alpha \text{tan} \phi}{\gamma_Z \text{cos} \alpha \text{sen} \alpha}$$

Onde:

$c$ ---Coesão do material;

$\gamma_Z$ ---Peso específico do material;

$\Delta p$ ---Sobrecarga (vegetação ou equipamento);

$\gamma_w$ ---Peso específico da água;

$Z_w$ ---Espessura da camada de água (rede de fluxo);

$\text{tg} \phi$ ---Tangente do ângulo de atrito do material;

### 3.2.3.2 Medidas para a estabilização de taludes

O processo relativo a estabilização de taludes podem ser feito de vários métodos dos quais podem ser destacados os mais utilizados na contenção

permanente de taludes, sendo esses a correção dos taludes ou seja diminuição da inclinação dos taludes e o processo de drenagem na mina.

#### ✓ **Correção dos taludes**

É um dos métodos que tem como objectivo, diminuir a angulação do talude, como também a sua altura. No entanto, a sua aplicação pode não ser suficiente para manter a estabilidade do talude, pois a redução da altura ou ângulo pode implicar na diminuição da tensão normal e conseqüentemente na força de atrito resistente não tornando o talude estável apenas com a sua execução.

### **3.3 Drenagem**

Na mineração a céu aberto pode haver ocorrência de águas superficiais (chuvas, inundações e cheias de rio), como também das águas subterrâneas já que o lençol freático pode ser alcançado com o aprofundamento da cava. Estas águas podem causar impactos negativos na segurança operacional e estrutural, além de reduzir a lucratividade do próprio empreendimento, neste sentido a drenagem dos mesmos, cumpre o papel de grande importância, tanto na optimização de projecto para abertura, quanto na orientação de soluções de estabilização de taludes. Daí surge a necessidade da execução do processo de controle das águas por meio de drenagem em minas. O processo de drenagem na mineração, pode ocorrer de duas maneiras: por meio da drenagem superficial ou profunda.

#### **3.3.1 Técnicas usadas para o controlo das águas superficiais**

O controlo das águas superficiais na mineração, podem ocorrer através dos sistemas de isolamento e escoamento, escoamento e acumulação, sendo depois removido para fora da cava.

- Isolamento e escoamento

Esta técnica é usada para impedir o fluxo de água para dentro da cava, para isso são construídas valas e diques ao seu redor, esse fluxo é direccionado para o fundo da cava através de canaletas construídas nos pés das bancadas ou

por tubulações, nesta etapa é fundamental evitar que a água escoe pela crista das bancadas, evitando assim processo de erosão excessiva, além de conservar suas características geotécnicas. Na figura (3.8), estão representadas de forma simplificada essas estruturas (BASTOS, 2000).

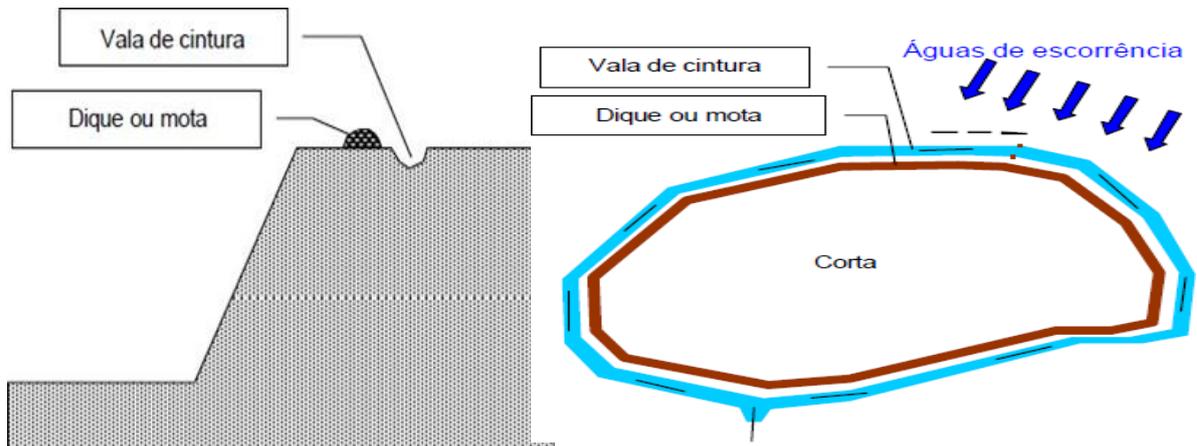


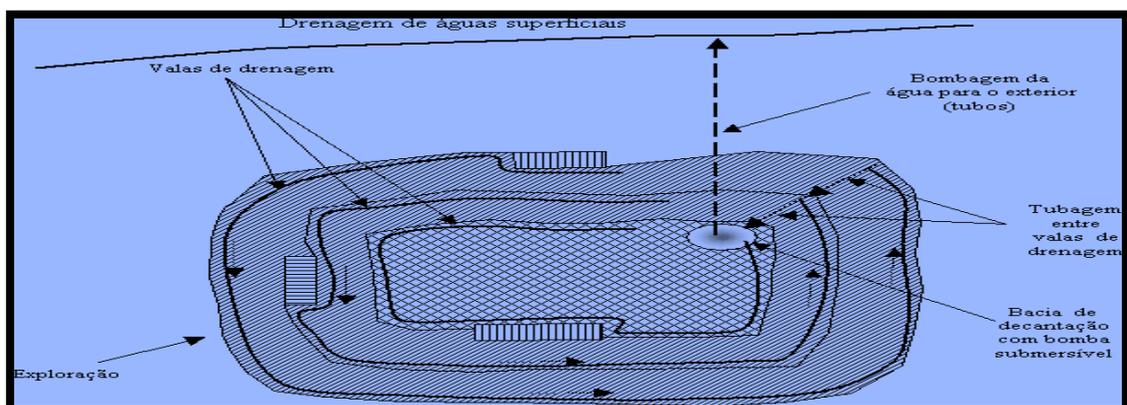
Figura (3.8) - Canalização de águas pluviais ao redor de uma bancada (BASTOS, 2000, p. 2).

- Escoamento e acumulação

Os sistemas de escoamento têm a função de impedir que a água possa atrapalhar os trabalhos de exploração e a segurança dos taludes, eles são construídos para conduzir a água para locais adequados, impedindo assim o acúmulo de água em locais inapropriados (BASTOS, 2013).

- Valas

As valas são projectadas na cava para captar as águas pluviais e residuais escoado nos taludes, estas valas podem ser estruturas estacionárias



quando construídas entre taludes e bermas ao longo prazo e como estruturas temporárias (menos elaboradas) sobre as bermas.

Figura (3.9) - Sistema de drenagem por valas (MARINA 2014).

O objectivo desta técnica é diminuir a infiltração de águas pluviais, captando-as e escoando-as ao longo de linhas de maior declividade do talude.

### **3.3.2 Técnicas de controle das águas subterrânea em minas a céu aberto**

Grande parte dos depósitos minerais estão situadas abaixo da linha da superfície piezométrica dos aquíferos, ou seja, é parte ou está associado a um reservatório subterrâneo. Os processos de rebaixamento de águas subterrâneas podem ocorrer por meio de: Poços verticais perfurados atrás da crista ou das bancadas na face do talude (poços de bombeamento), Drenos horizontais profundos perfurados na face do talude (DHP) e Estação de bombeamento das águas, no interior da cava até a superfície (rios) etc.

- **Poços de Bombeamento**

Os poços de bombeamento podem ser localizados dentro e fora do perímetro da cava da mina. Dependendo dos requerimentos, os poços podem ser perfurados desde a superfície (base da cava) ou desde as bermas dos taludes até profundidades entre 20 a 400m.

- **Drenos Horizontais Profundos**

Os drenos horizontais profundo (DHP) são utilizados para a drenagem localizada nas faces dos taludes onde a surgencia de ocorrência de águas. O objectivo da drenagem profunda é promover o rebaixamento do nível d'água internamente de um maciço de modo a evitar a surgência de água na face do talude, principalmente nos períodos de chuvas, e garantir sua estabilidade.

- **Estações de Bombeamento**

Estas estações estão equipadas com poços colectores e bombas centrífugas localizadas nos pontos mais baixos da cava. Esta técnica é equipada para remover a água das chuvas e o fluxo das águas subterrâneas penetrando na cava.

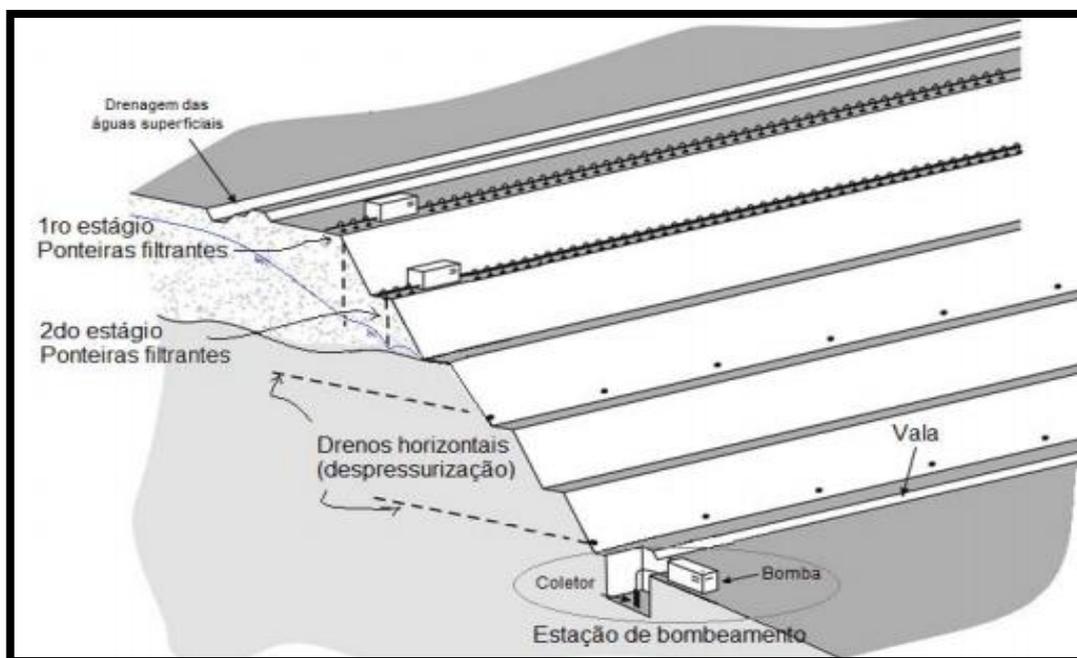


Figura (3.10) – Representação esquemática dos métodos combinados, (PREENE, 2014).

### 3.3.3 Drenagem das águas na mina de camatchia

Actualmente na mina de camatchia a drenagem das águas é feita por meio de descarga gravítica na parte exterior e no interior da cava a drenagem é feita por meio de bombagem tendo em conta a configuração da mina no que diz respeito a topografia e profundidade. Para estes efeitos são usados bombas do tipo KSB (Omega 150-605), cujo as mesmas possuem a capacidade de bombear  $500\text{m}^3/\text{h}$  a uma altura máxima de 150m, atendendo que as mesmas já funcionam a bastante tempo e por não serem novas, a sua capacidade de bombeamento foi reduzido aproximadamente  $400\text{m}^3/\text{h}$ , com uma tubagem resistente de revestimento plástico com as seguintes dimensões: 16 Polegadas, 430mm e 400mm de diâmetro, capaz de escoar  $0,76\text{m/s}$  da caixa (8) para a caixa (1) onde encontra-se mais uma bomba com a mesma capacidade na qual faz o mesmo processo de escoamento das águas até ao rio Chicapa, como mostra a figura.



Figura (3.11) – Drenagem das águas no interior da mina de camatchia.

Fonte: Foto tirada pelo autor

### **3.4 Vias de acesso**

As vias de acesso são um dos factores mais importante no planeamento da cava, deve ser incluída na fase inicial do processo de planeamento visto que elas podem afectar significativamente o talude geral. Para a selecção do layout da estrada deverão ser considerados: A topografia local, tamanho da jazigo, escala de produção, valor do material lavrado, distância média de transporte e as áreas marcadas com potencial de instabilidade de taludes.

- Largura das estradas (rampas)

As estradas são os caminhos pelos quais se realizam as operações de transporte e serviços dentro da lavra. A regra geral é projectar estradas que tenham larguras compactáveis com as unidades de transporte. Estradas em pit em geral são construídas em linha única e única direcção de tráfego ou duas linhas e duas direcções de tráfego, visando uma baixa densidade de tráfego ou devido a problemas de espaço. Segundo Torres (2013), a largura das estradas pode ser obtida levando-se em consideração a largura do maior veículo que trafega na via, como mostra a expressão abaixo.

$$L_r = L_v.(0,5+1,5.n)$$

Onde:

$L_r$  - Largura da rampa;

$L_v$  - Largura do maior veículo de transporte utilizado;

$n$  ---Número de linhas das estradas de uma mina.

Tabela (3.3) – Largura das estradas na mina

<b>N° de linhas</b>	<b>Largura max. Do veículo</b>
1	2x
2	3.5x
3	5x
4	6.5x

Outros factores a serem considerados na construção de estradas em minas à céu aberto: Custo mínimo para transporte de minério e estéril para fora da cava ao longo da vida útil da mina, Mínimo de tráfego, máxima segurança e rápido acesso para as operações mineiras; Restrições as áreas de instabilidades de taludes e Vida útil e longa das estradas, etc.

## CAPÍTULO IV – GEOLOGIA

### 4.1 Enquadramento geológico regional

A geologia do nordeste de Angola é dominada por uma espessa sequência de sedimentos de fácies continental que têm idades compreendidas entre o cretácico e a actualidade, todos estes sedimentos assentam sobre um substrato pré-câmbrico cratonizado, uma interpretação geológica dentro e ao redor da região nordeste de Angola.

Tabela (4.1) – Unidades estratigráficas da região nordeste de Angola

<b>Eon</b>	<b>Era/período</b>	<b>Sistema</b>	<b>Subdivisões</b>	<b>Idade Approx (Ma)</b>
Arcaico	Indiferenciado Pré-câmbrico	Complexo de Embasament os	Serie superior  Serie inferior	< 4000
Proterozoic o	Indiferenciado Pré-câmbrico	Sistema Kibariano	Serie superior  Serie inferior	< 2500
	Paleozóico Precose a final do Pré- câmbrico	Grupo Luana		< 1000
	Jurássico a Carbonífero superior Cretácio precose a Jurássico superior	Sistema Karoo	Serie Lunda  Serie Cassange  Serie Lutoe	320

Fanerozoico	Cretáceo precoso a Jurássico	Continental Intercalar		163
	Cretáceo superior a Meados do cretáceo	Erupções kimberlíticas		100
		Formação Calonda		
	Quartenário precoso a Quartenário Precoso a terceario	Sistema Kalahari	Kalahari Superior	55
Kalahari Inferior				
	Formações Superficiais		Recente 2	

#### 4.1.1 Sistema Karroo

Com dados de evidências paleontológica, a deposição do sistema karroo foi datada do carbonífero superior ao jurássico. Entretanto, somente a série mais recente de lutoé é exposta regularmente no nordeste da Lunda, com um afloramento da série de cassange exposto de Calonda, e nenhuns afloramentos conhecidos da série da Lunda. O horizonte basal da série de lutoé é geralmente um tillóide, sobreposto por outros conglomerados e arenitos arcócosos que são provavelmente de origem fluvioglacial, clastos do Grupo de Luana podem ser identificados no conglomerado as camadas são geralmente secundário-horizontais, mas tornam-se mais ingrememente inclinadas próximo de zonas de falha, dobradura é observada nos estratos de Lutoé perto de Calonda.

#### **4.1.2 Continental Intercalar**

O único afloramento conhecido deste sistema está perto de Calonda, onde os sedimentos são siltitos, arenitos e conglomerados vermelhos ou brancos.

#### **4.1.3 Formação Calonda**

A formação calonda cobre 2/4 da região das Lundas, a sua deposição em blocos para blocos em áreas mineiras para área mineira manifesta-se uma falta sincronia. As chuvas intensas e elevadas variações de temperatura podem ser consideradas como responsáveis das deslocações do geo-blocos ou cones de dejectão conferindo a formação Calonda variadíssimos detritos desagregados de varias rochas e elevados teores de minerais satélites de diamantes que ao serem transportados a uma dezenas de metros ou quilómetros, umas foram destruídas totalmente e outras por serem coeficientes estáveis de dureza, manifestam simplesmente um desgaste nas formas geométricas. Os sedimentos variam de cor, de marrom-vermelho para o roxo claro devido á presença de óxidos de ferro e manganês. Apesar de erodido facilmente não aparece frequentemente nos afloramentos excepto em áreas de mineração e cursos de águas entalhados, embora se saiba estar presente abaixo de muitas areias grossas de kalahari que cobrem a maioria do nordeste da Lunda, As distribuições conhecidas são preservadas da erosão em depressões dos embasamentos dentro do corredor estrutural que tende para nordeste, conhecido como Lucapa Graben.

#### **4.1.4 Depósito de cobertura**

As propriedades físicas – mecânicas das rochas do complexo de cobertura estão formadas pelas camadas do solo das areias argilosas fracamente litificadas do sistema de Kalahari, da formação Calonda e das rochas do grupo Lutõe caracterizadas pelos solos friáveis. As rochas em questão se estendem debaixo de solos dilúvio – eluviais até a profundidade de 80 metros.

- Os depósitos eluviais – diluviais: estes depósitos estão representados principalmente pelos solos argilosos e contem por si os produtos alterados de granito - gnaisses e os materiais rédepositados das rochas básicas. A espessura da sedimentação atinge 15m à baixa do relevo, com 18% de

humidade, o peso volumétrico das argilosas arenosas e das argilas atinge 1,79 g/cm<sup>3</sup>.

- Depósitos do sistema de Kalahari: A formação de solo arenoso é aflorada nas linhas divisórias das águas ou estende-se debaixo de solos eluvio-deluviais. Os sedimentos são compostos de areias vermelho acastanhadas de grãos finos e médios, de formas iguais, poucas húmidas e uma densidade média com 6% de humidade, o peso volumétrico das areias superficiais é de 1.67 g/cm<sup>3</sup> e aumenta em profundidade até 2.16 g/cm<sup>3</sup> entre 40-50m.
- Depósitos da formação Calonda: As formações do solo de areias argilosas estão afloradas nas linhas divisórias das águas, estendem-se debaixo das formações do Kalahari ou dos solos eluviais-deluviais, os sedimentos estão compostos de areias vermelhas acastanhadas de grãos finos e médios, de formas iguais, poucas húmidas com uma densidade média, com 12% de humidade o peso volumétrico dos solos areno-argilosas é de 2,06 g/cm<sup>3</sup>.

Localmente na zona de estudo afloram as seguintes unidades geológicas:

- ✓ Sedimentos recentes;
- ✓ Grupo kalahari;
- ✓ Gnáisses do proterozoico, encontrados como rochas encaixantes das intrusões kimberlíticas.

A geologia da área é representada com cobertura de depósitos eólicos da formação de areias vermelhas pertencentes ao grupo kalahari do cenozóico, sedimentos não divididos provavelmente do grupo kalahari inferior e de origem fluvial, lacustre e eólica. A série de kalahari ocupa principalmente áreas do inter-córrego, são removidas mais raramente nos alcances superiores dos tributários a esquerda e a direita dos rios principais.

As areias superiores do kalahari (areias ocreosas) são espalhadas mais extensivamente, a série é composta de areias finas de quartzo com teores consideráveis de argila e hidróxidos de ferro da base ao topo a cor muda de vermelha ao amarelo. Os minerais acessórios incluem o rutilo a turmalina e a cianita.

#### **4.1.5 Origem e formação dos Solos**

Solos são materiais que resultam da decomposição de rochas por intermédio de processos do intemperismo ou meteorização das rochas. A figura a baixo mostra este processo.

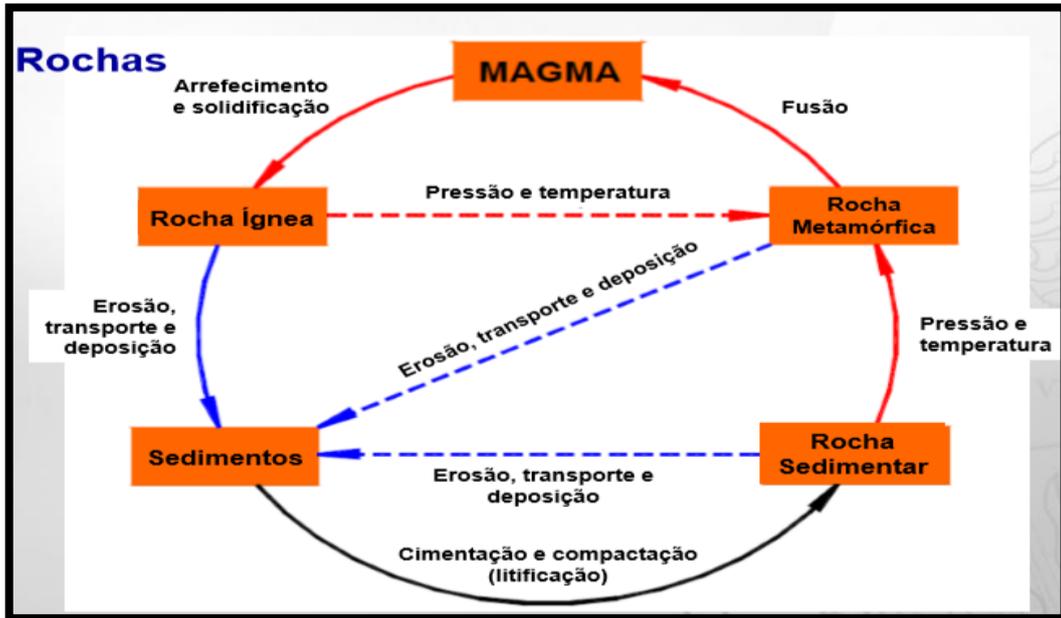


Figura (4.1) - Origem e ciclo de formação dos solos

Fonte: Douglas (2016).

Esses processos podem ocorrer pela desintegração mecânica ou decomposição química.

Por desintegração mecânica, esses processos ocorrem por meio de agentes como água, temperatura, vegetação e vento. Formando-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias), e somente em condições especiais as argilas (partículas finas).

Por decomposição química, neste processo verifica-se modificação química ou mineralógica das rochas de origem.

Na maioria das vezes esses processos actuam simultaneamente em determinados locais e condições climáticas, um deles pode ter predominância sobre o outro. O solo é assim, uma função da rocha mãe e dos diferentes agentes de alteração.

## ❖ **Classificação dos solos quanto à origem**

Os solos podem ser classificados em três tipos diferentes, nomeadamente: solos residuais, sedimentares e orgânicos. Para uma maior abordagem foram então destacados os solos sedimentares

- **Solos sedimentares**

São solos, que após o processo de alteração, foram transportados para outros locais. Nestes solos o transporte ocorre por meio da acção da gravidade e são muito heterogêneos, sendo que as mesmas apresentam boa resistência, porém elevada permeabilidade e ocorrem em zonas de pé de encostas ou são provenientes de escorregamentos. Nestes solos o transporte, pode ocorrer de duas formas diferentes:

1. Pela acção da gravidade e são muito heterogêneos;
2. Ocorrência localizada, em pé de encostas ou provenientes de escorregamentos. Apresentam boa resistência, porém elevada permeabilidade.

### **4.2 Formações sedimentares**

São formações originadas pela acção dos processos de intemperismo e desagregação, provocados por agentes da natureza, como: a chuva o vento em maciços rochosos preexistentes, e posteriormente depositados (sedimentação) dos componentes minerais liberados provenientes destes maciços.

As rochas sedimentares podem ser divididas em duas categorias principais:

1. As que se formam de partículas minerais que se desprendem da terra e são transportadas pelo vento ou pela água;
2. As que se formam devido à precipitação química dos minerais, à transformação de matéria orgânica em rocha ou à evaporação de água contida nos minerais.

Dentro da primeira categoria podem ser incluídas as rochas piroclásticas, que também são consideradas rochas ígneas, pois embora se originem de

vulcões, são fragmentos lançados na atmosfera nas erupções explosivas, e depositados como sedimentos.

#### 4.2.1 Classificação das Rochas Sedimentares

As rochas sedimentares são classificadas em consolidadas, não consolidadas, clásticas, carbonáceas, químicas e orgânicas.

Tendo em conta os tipos de sedimentos, elas podem ser classificadas em três tipos principais de sedimentos, nomeadamente: Rochas clásticas ou detríticas, Rochas quimiogénicas, Rochas biogénicas. Das quais as rochas detríticas ou clásticas mereceram maior abordagem detalhadamente na tabela abaixo.

- Rochas Detríticas ou clásticas

São rochas constituídas principalmente por detritos de outras rochas ou seja são formados por processos de meteorização de rochas pré-existentes. As rochas detríticas divididas em função do tamanho dos sedimentos que as constituem. Essas rochas são oriundas devido à acção de águas, ventos e geleiras (deposição de detritos).

Tabela (4.1) Rochas de origem detríticas

Detritos	Litificação	Rocha	Composição
Cascalho (>2mm)	Desagregada	Cascalheira	Pedaços de rocha ou minerais soltos
	Consolidada	Conglomerado ou Brecha	Detritos líticos arredondados ou angulosos, agregados por cimento de composição variável
Areia (0,06 a 2mm)	Desagregada	Areias	Detritos tipo areia não consolidados
	Consolidada	Arenito	Areias agregadas por cimento variável
	Desagregada	Siltes	Detritos tipo silte não consolidados

Silte (0,002 a 0,06mm)	Consolidada	Siltito	Siltes (não distinguíveis): quartzo, feldspato e micas
	Desagregada	Argilas	Detritos tipo argilas não consolidados
Argila (<0,002mm)	Consolidada	Argilito	Minerais argilosos ± compactados não visíveis, com frequente pigmentação por óxidos de Fe

Fonte: ABNT (NBR 9061)

As principais rochas sedimentares são os argilitos, siltitos, arenitos e conglomerados, aqui destacam-se:

Os argilitos tem origem na compactação de depósitos de argilas. Os minerais essenciais (minerais que definem a caracterização de uma rocha) são os argilo-minerais, com cores variadas e textura clástica ou de granulação fina (diâmetro menor que  $2\mu$ ). A sua estrutura é basicamente estratificada em camadas e as vezes maciças.

Os siltitos originam-se por meio da compactação e cimentação de depósitos de siltes, com quartzo e feldspato como minerais essenciais e argilo-minerais como minerais acessórios, possuindo uma estrutura estratificada ou maciça.

#### 4.2.1 Intemperismo

Esse processo modifica as características na deformação das rochas, resistência e permeabilidade das rochas. Esses processos originam a produção de materiais desintegrados que formarão:

- Rochas sedimentares (sedimentos cimentados).
- Sedimentos (arenoso, argiloso)
- Solos

**Maior importância geológica:** destruição das rochas para originar solos, sedimentos e as rochas sedimentares.

**Benefícios econômicos:** Grande parte dos jazigos minerais da terra, são de natureza sedimentar, que desempenham um papel relevante na indústria moderna. Esses jazigos podem formar os seguintes depósitos:

- Formação de depósitos enriquecidos de Cu, Mn, Ni, etc;
- Concentração de minerais úteis ou minérios (ouro, platina, pedras preciosas, etc).

### **4.3 Kimberlitos**

Kimberlito é vulgarmente conhecido como a rocha que contém diamantes. Na realidade, não é um tipo específico de rocha, mas sim um grupo complexo de rochas ultrabásicas normalmente ricas em voláteis (dominante  $\text{CO}_2$ ). elas apresentam textura inequigranular característica, resultando na presença de macro-cristalizações inseridas em uma matriz de grãos finos, potássicas, ultramáficas híbridas com uma matriz fina e macro-cristais de olivina e outros minerais. Os minerais da matriz incluem olivina e/ou flogopita juntamente com perovskita, espinélio, diopsídio, monticellita, apatita, calcita e serpentina.

Os kimberlitos são formados pela fusão parcial do manto a profundidades maiores que 150 km. O magma kimberlítico durante sua ascensão do manto para a crosta, comumente, transporta fragmentos de rochas e minerais - também conhecidos como xenólitos e xenocristais (entre eles o diamante). O kimberlito pode trazer diamante até a superfície desde que tenha passado por regiões no manto/crosta que fossem ricas neste mineral e que sua velocidade de ascensão seja rápida o suficiente para não desestabilizar a estrutura do diamante, que caso contrário se converteria em grafite (polimorfo estável do carbono na pressão ambiente). Ressalta-se, portanto, que o magma que forma o kimberlito não é o produtor de diamante, apenas um meio de transporte.

#### **4.3.1 Morfologia dos kimberlitos**

O kimberlito é uma rocha ígnea intrusiva, um peridotito composto por olivina com quantidades variáveis de flogopita, ortopiroxena, clinopiroxena, carbonatos e cromita. Do ponto de vista petrográfico os kimberlitos são rochas complexas, dado que, para além de terem uma mineralogia tipicamente magmática, existem variações decorrentes de processos de diferenciação, como

é exemplo o aparecimento de cristais de rochas híbridas. O clã dos kimberlitos são divididos em:

**Grupo I:** Tipicamente ricos em  $\text{CO}_2$  e empobrecidos em potássio em relação aos do grupo II. Corresponde à rocha original encontrada em Kimberley, na África do Sul.

**Grupo II:** Tipicamente ricos em  $\text{H}_2\text{O}$ , apresentam matriz rica em micas e também calcita, diopsídio e apatita, e correspondem ao kimberlitos lamprofíricos ou micáceos

Os kimberlitos são provenientes de magma ultrabásico rico em voláteis, com alto teor de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ , potássio com elevada relação de K/Na, com distinção de textura heterogranular resultante da presença de macrocristais numa matriz essencialmente microporfírica e cuja evolução e colocação pode ser descrita em termos de diferenciação padrão, intrusão e processos de extrusão. Existem outros minerais primários que podem estar presentes, como a granada do tipo piropo e outros minerais acessórios.

#### **4.3.2 Classificação segundo Clement e Skinner**

Vários modelos foram desenvolvidos para a classificação dos kimberlitos e as grandes variações de textura e mineralogia apresentadas por estas rochas implicam em dificuldades para classificá-los. Sendo que o modelo mais conhecido e geralmente bem aceito foi proposto por Clement & Skinner 1985.

O kimberlito é uma rocha que de acordo com a sua petrologia e morfologia, pode ser dividido em três unidades de fácies, nomeadamente em fácies da cratera, diatrema e abissal/hipabissal, como mostra a figura.

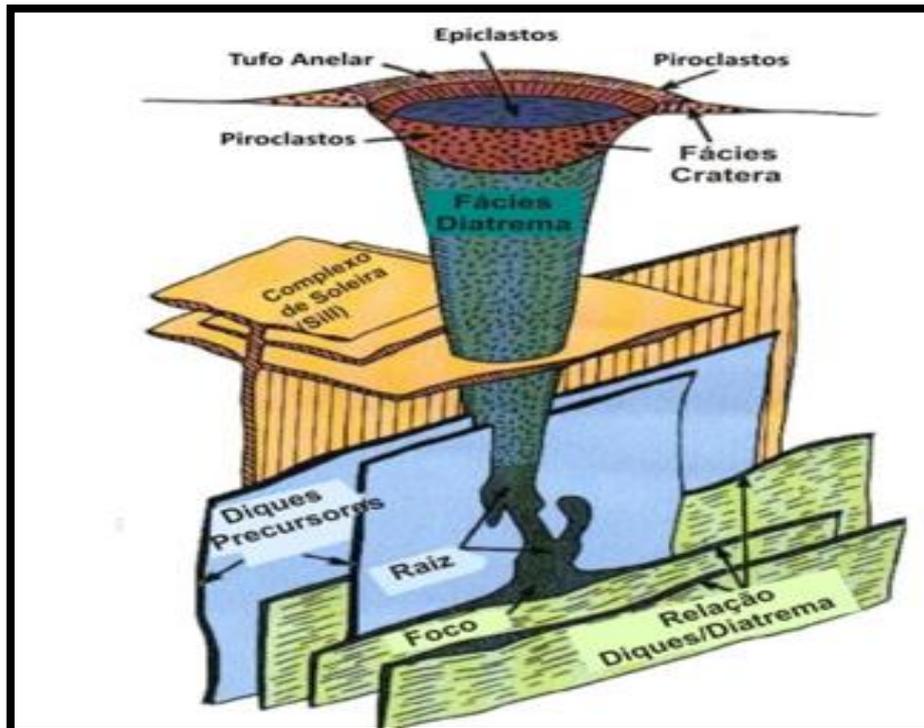


Figura (4.2) – Modelo magmático de um kimberlito, segundo Mitchell (1986).

As subdivisões das fácies principais são determinadas por diferenças na textura. As características diferenciadoras podem ser resumidas em:

- Kimberlitos de crateras conhecido pelas suas características sedimentares.
- Kimberlitos de diatremas são conhecidas pelas formações geodésicas do magma cristalizado e formações semelhantes geradas durante a perda dos gases.
- Kimberlitos abissais estas rochas são reconhecidos pela presença abundante de calcita e textura segregada com macro/mega-cristalizações.

### 4.3.3 Ocorrência dos kimberlitos em angola

A maior parte dos kimberlitos em Angola ocorrem ao longo do Graben de Lucapa, com base na orientação SW-NE e os kimberlitos do Cretácico, foram definidos ao longo da estrutura, sendo divididos em várias províncias, províncias essas que estão localizadas na secção fina do Cratão do Congo (Kassai) e tendem a ser diamantíferas, em localizações das interações onde se encaixou o

corredor de Lucapa e falhas NW a NNW. A província mais a SW situa-se na camada móvel do Eburneano e as intrusões tendem a ser mais carbonatíticas e não são diamantíferas (MOISÉS, 2003). Depois do trabalho de Reis (1972) Whiteoutros (1993)) reconheceu quatro províncias kimberlíticas ao longo da estrutura do Lucapa. As províncias **I, II e III** ficam situadas na secção espessa do Craton de Angola-Kassai (parcela do nordeste e central) é relacionada á colocação só manto de magmas alcalinos-ultrabásicos e de kimberlitos; estes kimberlitos tendem a ser diamantíferos (outros, 2008). A província **IV** encontra-se a sudoeste, dentro da cintura móvel de Eburniana e consiste em rochas intrusivas que tendem a ser carbonatitos alcalinos e não são diamantíferos. A proporção de kimberlitos aumenta da província **IV** a **III**. Todas as chaminés económicas conhecidas de kimberlitos estão posicionadas na província **I**, onde a estrutura de Lucapa atravessa a Craton de Kassai, como mostra a figura a baixo.

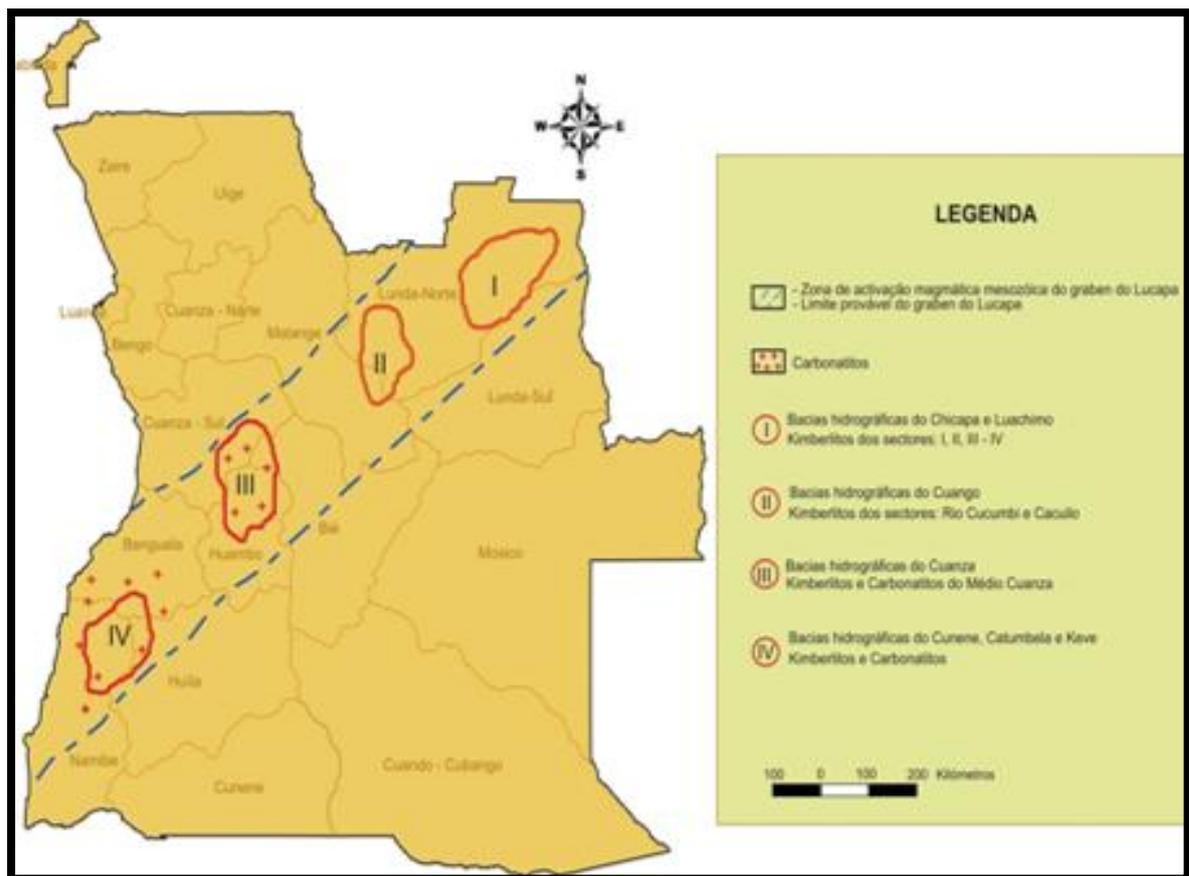


Figura (4.3) - Graben do Lucapa e as ocorrências kimberlíticas de Angola.

Fonte: Moisés A. A. (2003).

Na província I a nordeste de Angola as falhas com tendência Este-noroeste dominam a estrutura do Lucapa. As províncias II e III ocorrem onde as falhas conjugadas que tendem para noroeste cortam a estrutura de Lucapa e onde as tendências este-noroeste estão outra vez presentes. Os kimberlitos estão relacionados especialmente á tesouras principais e as falhas internas; análise das tendências estruturais interpretadas de um exâme aeromagnético regional empreendido no Lucapa-Calonda. Numa escala local, as chaminés kimberlíticas são controladas por estruturas diferentes da tendência Este-Noroeste a oeste do Lucapa. Entretanto os kimberlitos do Nordeste de Angola estão associados geralmente com a fractura que tendem de Norte-Noroeste a sul-sudeste. A ocorrência de várias intrusões kimberlíticas de forma linear, demonstram de forma bastante precisa a posição do cratão, possibilitando assim um maior conhecimento geológico sobre a sua formação, bem como sobre as aplicações práticas na prospecção.

#### **4.3.4 Kimberlito Camatchia**

A chaminé Camatchia foi descoberta no principios dos anos 60, situa-se no fundo do vale do rio Chicapa e sofre directamente os efeitos da erosão pelo seu curso. Cerca de 50% da área do corpo mineralizado está coberto por sedimentos aluviais de pouca espessura, e o restante por areias do tipo kalahári onde também destacam-se as rochas vulcanogêneo-sedimentares da cratera parcialmente erodidas, as rochas da cratera atingem a profundidade aproximadamente na ordem dos 100m.

- Prospecção na área de concessão

Até ao momento foram prospectado 30% da área de concessão e tendo em conta os novos desafios no sector diamantifero e da mina do lunhinga em particular a mesma encontra-se em condições de ser prospectado. Os trabalhos iniciais de prospecção foram realizados até 1975, sendo assim 70% da concessão mantêm-se virgem, sendo importante a prospecção da mesma com vista a detecção de novos corpos kimberlitos.

No ano de 1997, foram efectuado levantamentos aeromagnéticos na escala, cujos mapas dos resultados encontram-se no arquivo da Luó-SMCC.

No ano de 1997 e 2003, foram feitos trabalhos de prospecção magnética na escala de (1:25000) e (1:10000 e 1:5000), numa área total de 16,9 km<sup>2</sup> e de 323 km<sup>2</sup> respectivamente pela Luó-SMCC, onde foram detectadas (13) anomalias magnéticas com perspectivas de se descobrirem novos kimberlitos. Tendo em conta que o levantamento efectuado cobriu apenas 7,5% do território, poderá haver perto de 100 anomalias magnéticas na área, com perspectivas de se descobrirem kimberlitos. Com os estudos feitos foram identificados sete (7) corpos kimberlíticos na área de concessão, nomeadamente: Camatchia, Camagico, Lunhinga (1), Lunhinga (2), Carambolo, Samuchito, e Cula, como mostra a figura abaixo.

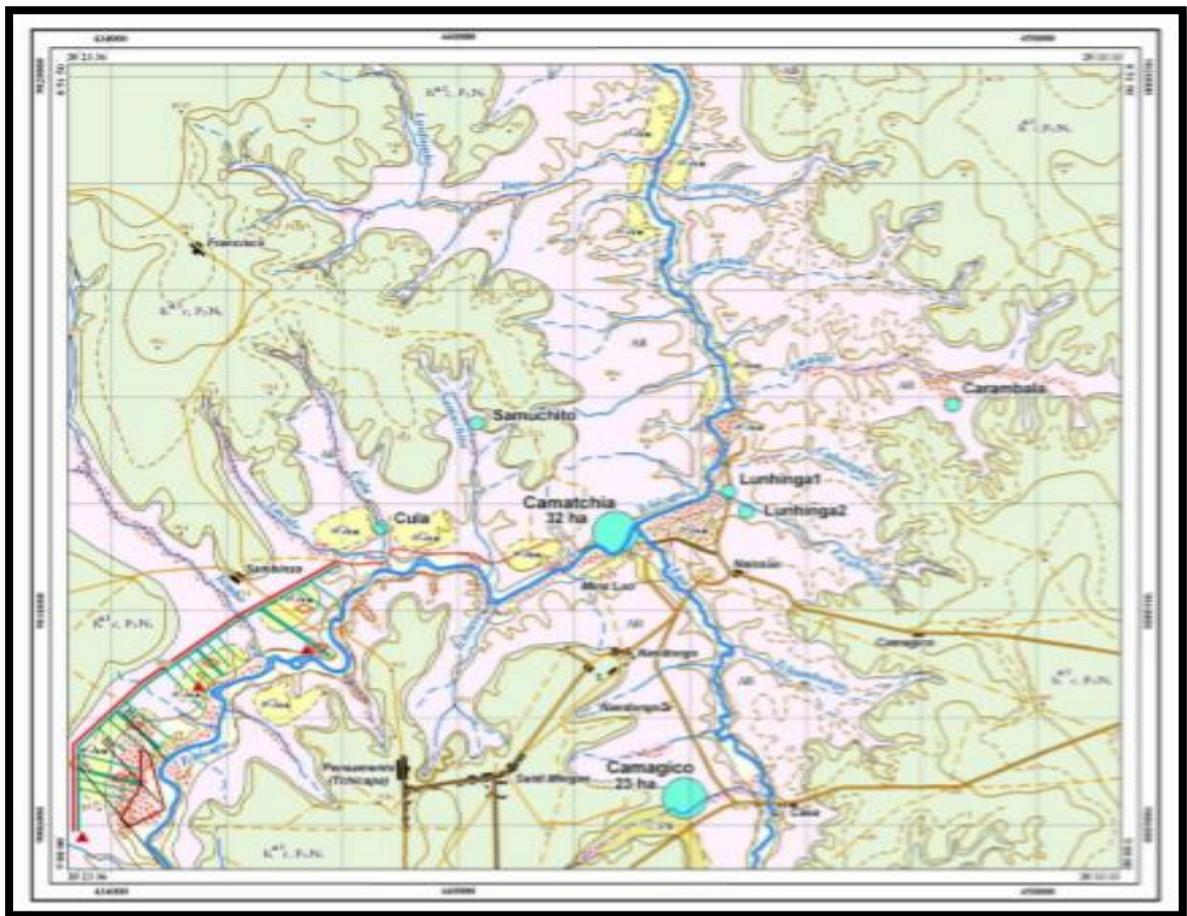


Figura (4.4) - Localização dos corpos kimberlíticos do projecto lunhinga.

Fonte: projecto lunhinga

A chamine camatchia é composta por rochas de duas fácies: a face hipabissal e face de cratera, representada a primeira por kimberlitos pórfíricos intrusivos e brechas kimberlíticas autolíticas explosivas e as segundas por formações sedimentares de origem vulcânica com inclusões de material kimberlítico e depósitos sedimentares de granulação diversa. Com respeito a sua configuração, a chaminé Camatchia tem a forma próxima a uma circunferencia, com um diâmetro de cerca de 680m e de 32 hectares.

#### 4.3.4.1 Esquema geral da estratificação das formações geológicas do corpo kimberlítico de camatchia

O esquema de estratificação das rochas kimberlíticas do jazigo Camatchia representa a noção de formação kimberlítica e tem o seguinte aspecto, como mostra a figura abaixo.

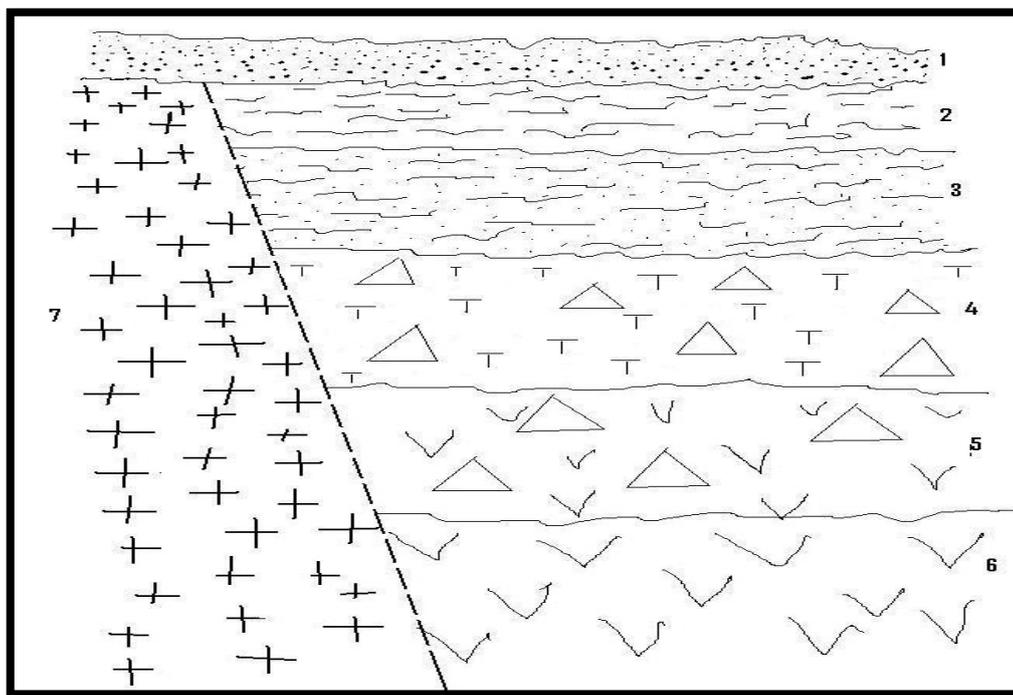


Figura (4.5) – Esquema da estratificação geológico do corpo kimberlítico Camatchia.

Fonte: Projecto Lunhinga

#### Rochas sedimentares

- 1) Areias, argilas, conglomerados e laterite

- 2) Grês, argilas e argilitos, aleuvrolitos.
- 3) Tufo, grês, aleuvrolitos.

kimberlitos

- 4) Tufo kimberlito brechoide.
- 5) Kimberlito pórfirico.
- 6) Kimberlito autolítico brechas

Rochas encaixantes

- 7) Gnaisses e Granito gnaisses

- Rochas encaixantes do jazigo de camatchia

As rochas encaixantes do jazigo camatchia são na maior parte constituídas por gnáisses e granito-gnáisses. A partir da superfície até a profundidade de 15 a 20m as rochas encaixantes são degradadas até o estado dos solos eluviais de areia-argila, sarrisca-argila e areia-brita e as propriedades de resistência são notavelmente baixas. Mais para baixo até a profundidade de 30 a 40m, o maciço rochoso é multígeno as áreas de rochas duras são vêm revezadas com as áreas dos gnáisses muito corroídos, embora os últimos mantenham preservada a sua textura primária. Em geral nesta zona os granito-gnáisses são muito corroídos quimicamente e debilitados mesmo encontrando-se nos blocos monólitos, mais para baixo da referida zona até a profundidade à volta de 100m depositam-se os granito-gnaisses rochosos tocados pela erosão eólica química e fracamente fissurados.

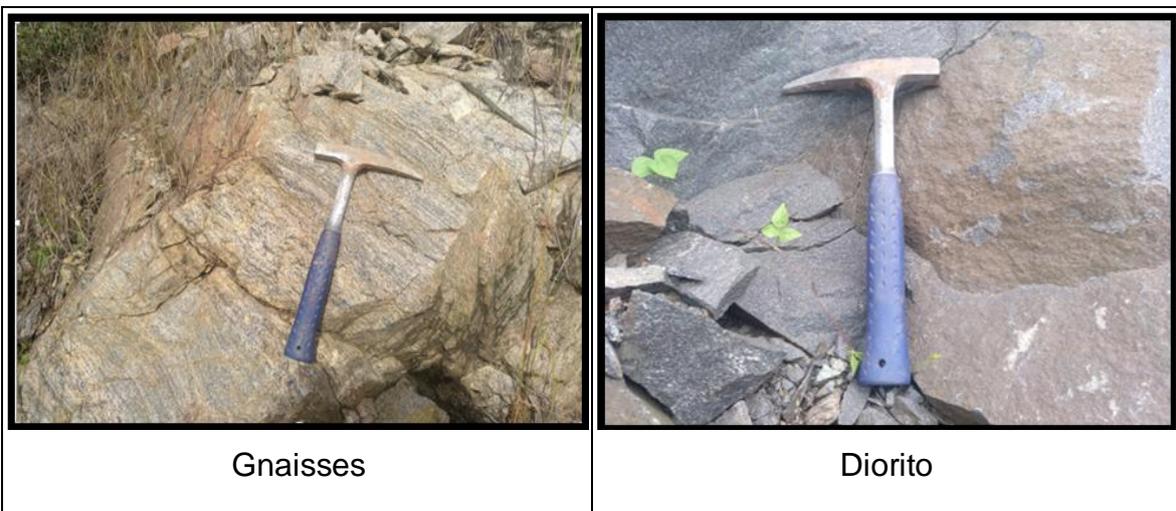


Figura (4.6) – Rochas encaixantes da chaminé camatchia

Fonte: Foto tiradas pelo autor

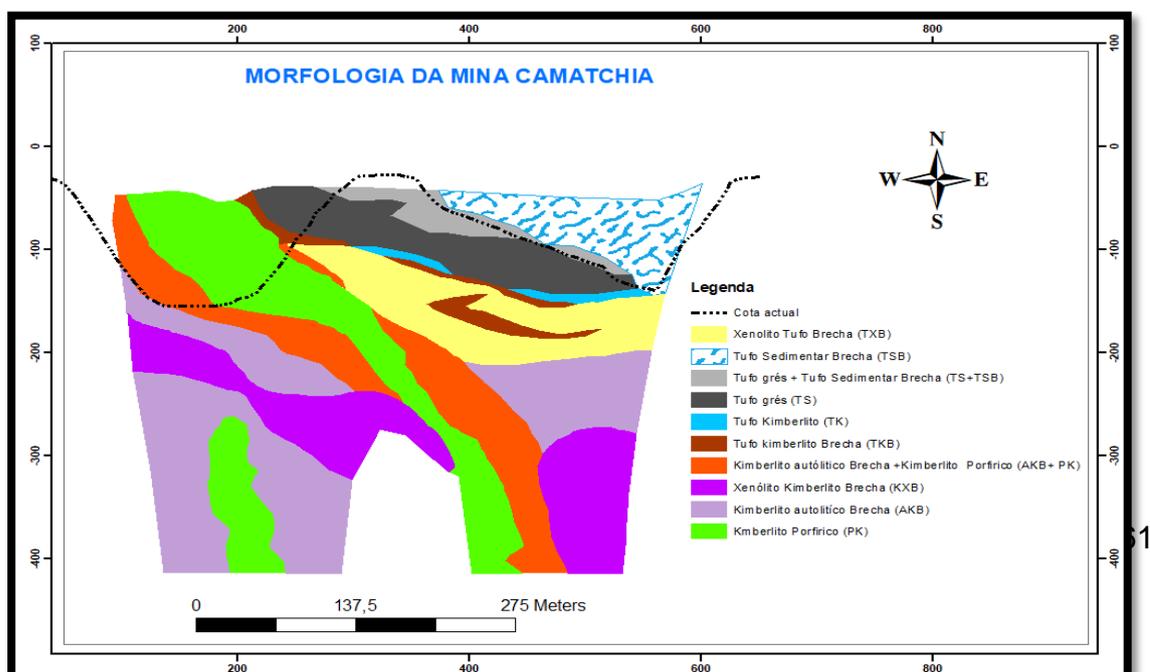
Gnaiss é uma rocha de origem metamórfica, resultante da deformação de sedimentos arcósicos ou de granitos, sua composição é de diversos minerais, mais de 20% de feldspato potássico, plagioclásio e ainda quartzo e biotita sendo por isso considerada essencialmente quartzo feldspática. Em estado seco, a resistência à compressão dos gnáisses e granito-gnáisses corroídos de resistência média, pode variar entre 19,4 a 44,8 MPa, assim sendo que a respectiva resistência à tracção variam entre 3,8 a 6,9 Mpa, a absorção de água constituindo 2 a 3%.

A resistência à compressão dos **gnáisses** e **granito-gnáisses** duros varia entre 55,8 à 103,5 MPa, sendo que a resistência à atracção varia entre 5,8 a 7,4 MPa.

A resistência à compressão dos **granito-gnáisses** e **dioritos magmáticos (gabronoritos)** quarcificados muito duros varia entre 118,3 a 140,6 MPa, com a resistência à tracção de 6,7 a 8,8 MPa.

#### 4.3.4.2 Extrutura geológica do jazigo camatchia

O jazigo camatchia é morfologicamente um corpo com uma única edificação de cratera não obstante com duas partes de diatremas heterogéneas no sudoeste e nordeste, na profundidade do intervalo entre 270m até 400m. As diatremas estão separadas, mas para cima desta profundidade as duas acumulações formam a mesma edificação, pode-se supor que historicamente a



parte maior da cavidade de cratera foi formada pela chaminé Oeste. A chaminé Este apenas ampliou um pouco a mesma na parte nordeste. A figura abaixo indica perfil de corte vertical da linha diagonal do pipe Camatchia.

Figura (4.7) - Perfil do corte vertical da linha diagonal chaminé de camatchia

Fonte: Projecto Lunhinga

O Kimberlito Camatchia, na sua compreensão é uma chaminé diamantífera geologicamente muito complexo, as fácies de cratera apresentam uma aglomeração de xenólitos com potencias que por vez atingem 60m, que por suas vez podem vir a dificultar á sua boa exploração e economicamente influir na obtenção de um bom rendimento, visto que os xenólitos são elementos desfavoráveis na recuperação de teor em diamantes e porque são considerados de estéril.

## CAPÍTULO V - ESTUDO DE CASO(MINA DE CAMATCHIA)

---

### 5.1 Breve historial

A chaminé Camatchia foi descoberta no início dos anos 60, situa-se no fundo do vale do rio Chicapa e sofre directamente os efeitos da erosão pelo seu curso. Cerca de 50% da área do corpo mineralizado está coberto por sedimentos aluviais de pouca espessura, e o restante por areias do tipo kalahári. As rochas encaixantes da chaminé são do tipo migmatito-gnáissicas do Arqueano inferior e as rochas vulcanogêneo-sedimentares da cratera encontram-se substancialmente erodidas, a espessura mantida pelas rochas da cratera é da ordem dos 100m. Em termos estruturais a chaminé Camatchia possui a forma aproximadamente circular, possuindo um diâmetro de cerca de 680 metros e uma área de 32 hectares.

Os trabalhos de exploração mineira, tiveram início no dia 10 de Janeiro de 2005 com o lançamento da primeira escavadora PC-800 montada na mina Lúo pela CIMERTEX com o apoio dos técnicos da Lúo - SMCC. A exploração incidiu na remoção de estéril e extracção do minério: Tufo kimberlítico e Kimberlito pórfírico aflorado no Sul da chaminé. O objectivo foi de fazer uma reserva estratégica do minério para fazer face a fábrica nos primeiros meses do arranque ou de produção. Os minérios extraídos foram armazenados separadamente por categorias num stock pile provisório no intermédio entre a mina e a fábrica. No processo de exploração mineiras, a geologia foi se identificando e delimitando os diferentes tipos de minérios surgidas na chaminé, assim foram identificados três diferentes tipos de minérios neste corpo kimberlítico: kimberlito porfírico; kimberlito autólito brecha; e as rochas vulcanogénicas sedimentares; e ainda o cascalho aluvionar cobrindo o troço cortado pelo rio. A chaminé de camatchia pela sua natureza era atravessada pelo rio Chicapa o que dificultava assim a sua livre exploração, dos estudos feitos, achou-se então conveniente desviar o troço que lhe atravessava num raio de 600m e numa distância de 3,0Km aproximadamente, o afastamento do rio facilitou a sua exploração, permitindo assim a construção de uma ponte com capacidade de suportar os equipamentos de grande porte, também este afastamento à 600m facilitou o processo de detonações com

explosivos durante o processo de exploração mineira. A exploração mineira previa a utilização de uma técnica de penetração por espiral em horizontes de 10m cada e previa-se a utilização de explosivos para fragmentar as rochas duras de difícil extracção ou remoção, tais como o minério do Kimberlito pórfírio e as rochas básicas como os gnaisses e granito – gnaisses.

## 5.2 Localização da área de concessão do projecto Lunhinga

A área de concessão do projecto Lunhinga (antigamente SMCC) está localizada na província da Lunda-Norte, como mostra a figura (5.1) e é cortada no sentido norte-sul pela estrada nacional que liga as cidades de Lucapa e Saurimo, aproximadamente equidistantes da área do Lunhinga – 75km, a sua área é de 225 km<sup>2</sup>.

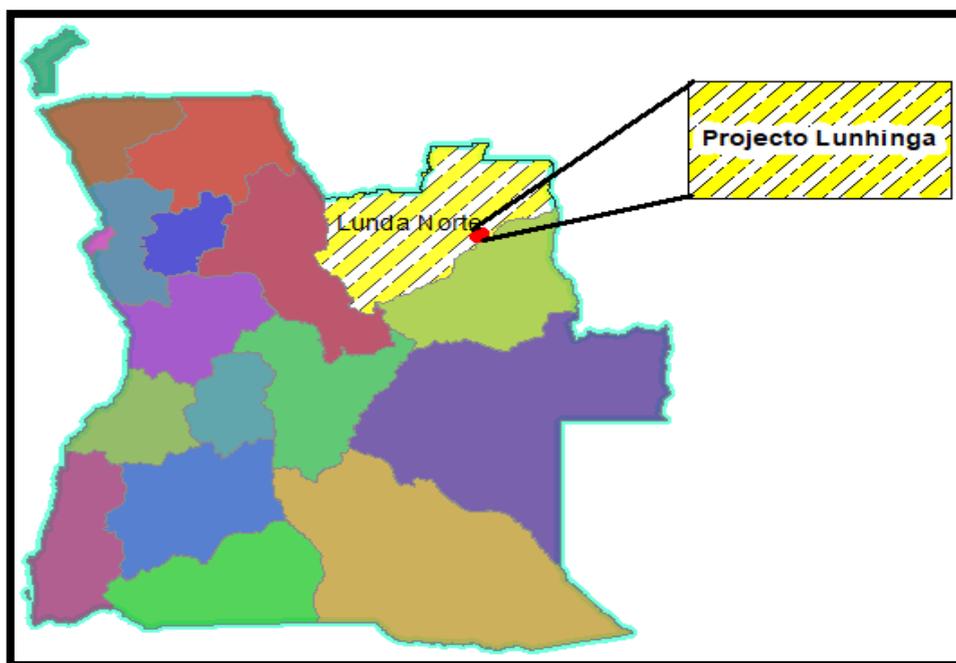


Figura (5.1) - Mapa de enquadramento geográfico do projecto Lunhinga

Fonte: Projecto Lunhinga

Tabela (5.1) – Coordenadas geográficas que delimitam a área de estudo

Vertice	Long-DMS	Lat-DMS
A	20° 23' 36'' E	08° 51' 50'' S

B	20° 33' 33'' E	08° 51' 50'' S
C	20° 33' 33'' E	09° 00' 00'' S
D	20° 23' 36'' E	09° 00' 00'' S

Fonte: Projecto Lunhinga

- Vias de acessos

O acesso à área da concessão do projecto Lunhinga é feito por via terrestre tanto pela via principal que liga os municípios de Saurimo à Lucapa, bem como por vias secundárias que ligam aldeias, comunas e pelas inúmeras picadas abertas durante a fase de instalação dos objectos da mina.

### 5.2.1 Situação económica da província

Lunda Norte é uma das 18 províncias de Angola, cuja a mesma encontra-se localizada na parte Nordeste de Angola, a sua capital é a cidade do Dundo. Confinada pela República Democrática do Congo (a norte e a este) e pelas Províncias angolanas de Lunda Sul (a sudeste) e de Malanje (a sudoeste), a província de Lunda Norte tem uma superfície de 103000 km<sup>2</sup> e uma população estimada em 972183, habitantes (2018), sendo constituída pelos grupos étnicos dos lundas, luanas tshokwe (ou Quiocos). Tal como a província de Lunda Sul, o enorme potencial económico desta província reside nos diamantes que oferecem grandes lucros a nível local e nacional. Para além desta matéria-prima, a região desenvolve-se fortemente também no sector da agricultura que com o seu clima tropical húmido produz arroz, mandioca, milho, óleo de palma, amendoim, abacate, manga e batata doce. A crise económica que abalou o país em 2008 contribuiu para a redução da actividade mineira desta parcela do país. Actualmente a província conta com alguns projectos mineiros em actividade com destaque ao projecto Lunhinga, que tem contribuído muito para o crescimento e desenvolvimento da província.

### 5.2.2Clima e Flora regional

A região das Lundas é caracterizada pelo clima tropical quente/húmido com duas estações anuais; a estação seca, durante os meses de Maio a Agosto e a estação das chuvas, durante os meses de Setembro a Abril. Os meses em que se registam maiores quedas pluviométricas são: Novembro, Dezembro, Março e Abril. A temperatura média anual é de 22 °C, a temperatura máxima é igual a 35 °C e a temperatura mínima é de 12 °C. A humidade relativa do ar oscila entre 65 a 85% ao ano. Segundo o relatório do Ministério do Urbanismo e Ambiente de 2006, o nordeste de Angola faz parte do bioma de savana mosaico da floresta Guineo-Congolesa, este bioma é preenchido por savanas e arbustos conforme indica a figura (5.2).



Figura (5.2) - Área da concessão coberta por savanas e arbustos.

Fonte: Foto modificada pelo autor

### 5.3 Geomorfologia

Em termos de geomorfologia a região das Lundas caracteriza-se por uma extensa planície de cotas elevadas (de 1400 a 1600m a sul e de 500 a 700m a norte). Esta superfície é recortada por inúmeros vales fluviais, resultando em interflúvios de largura variável. Os interflúvios maiores são limitados pelos

grandes rios e os menores formam aplanções entre os afluentes dos grandes rios. A área estudada, constitui uma zona de planalto onde o essencial da topografia é dado por uma ou várias superfícies terciárias e um importante ciclo quarternário. Logo, o relevo profundamente dissecado por erosão impede a esquematização de aplanções extensas e perfeitas. Os relevos e os terrenos de coberturas são formados por cascalhos de elementos de grés polimorfos, de diversas dimensões, onde repousam areias vermelhas, argilosas que podem ter resultado duma redistribuição das “areias de Kalahari” sendo a sua idade fim-terciária, não se excluindo a possibilidade de serem mais recentes (pliocénico inferior ou médio). A área do projecto Lunhinga está localizada no interflúvio do Chicapa, está coberta na sua maioria pelas areias do Kalahari, como mostra a figura abaixo.

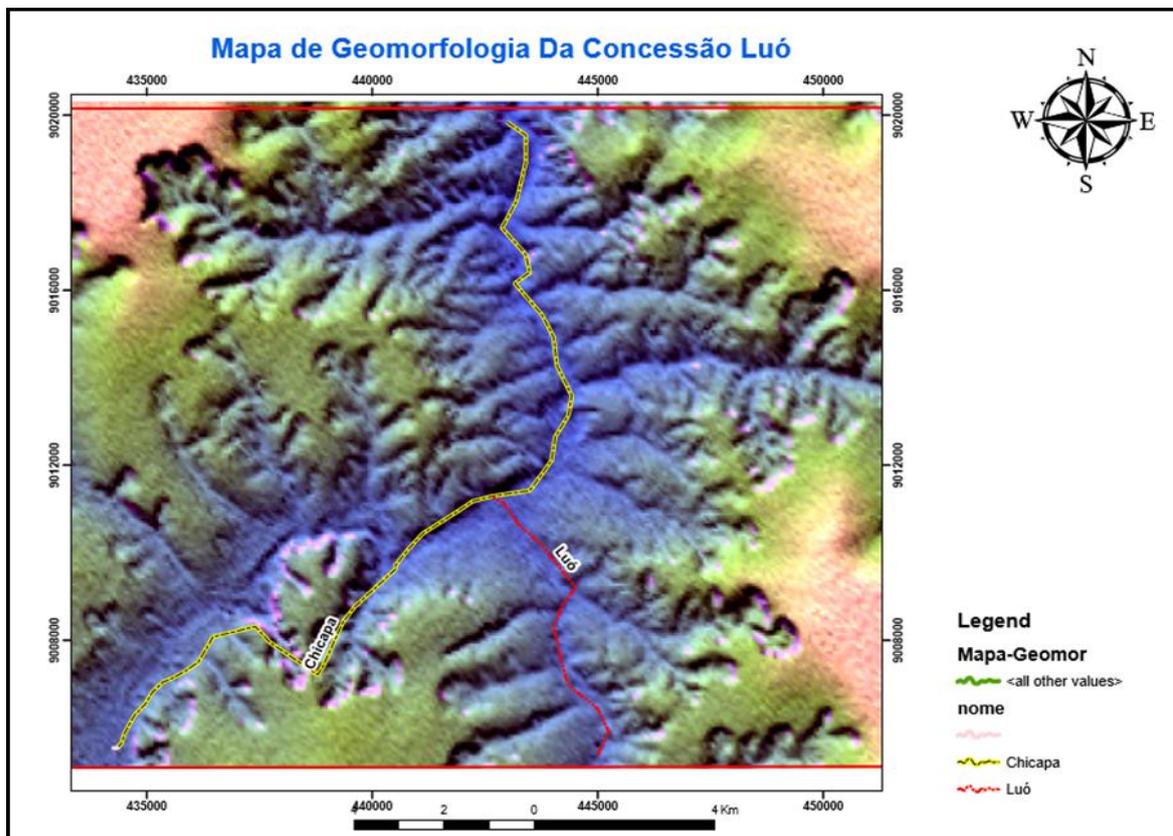


Figura (5.3) - Mapa geomorfológico da concessão do projecto Lunhinga

Fonte: Projecto Lunhinga

## **5.4 Hidrologia da área**

No período actual, não há informações actualizadas e conclusivas sobre a situação hidrológica da área, em 2004 foram feitas observações hidrologicas nos dois principais leitos de rios da concessão: O rio Chicapa e o seu afluente Lúo, sendo assim, foram criados (3) postos e (1) estação higrométrica. As observações foram feitas nos sistemas das seguintes técnicas: medições diárias de níveis das águas; medições diárias de temperaturas das águas e medições de volumes de águas á passarem do rio Chicapa (4-8 vezes por mês). A alteração dos níveis das águas foi determinado pelos caudais dos rios, verificou-se que no período de cheia as oscilações de níveis dependiam do seu carácter, dos quais se verificou o seguinte: chuva frontal ou local. No primeiro caso – a subida do nível estende por um período prolongado, no segundo caso – a subida e descida do nível acontecem num dia (24 horas) e acontece em mês de Maio até Setembro, neste período notam-se os níveis mais baixos sem oscilações bruscas e os rios são abastecidos por água subterrânea. A alteração do caudal de água pode variar aproximadamente entre 40 a 50 m<sup>3</sup>/Seg. no período calmo e até 300m<sup>3</sup>/Seg. o período de cheias.

### **5.4.1 Hidrografia**

A principal rede hidrográfica abrangente a concessão está representada pela bacia do rio Chicapa, tendo como seu afluente principal o rio Lúo. De um modo geral essa bacia hidrográfica do rio Chicapa tem uma direcção de Sul para Norte, sendo que os diversos afluentes que compõe a rede hidrográficas tem direcções perpendiculares aos rios principais ou seja de Este para Oeste, assim como de Oeste para Este como indica a figura abaixo.

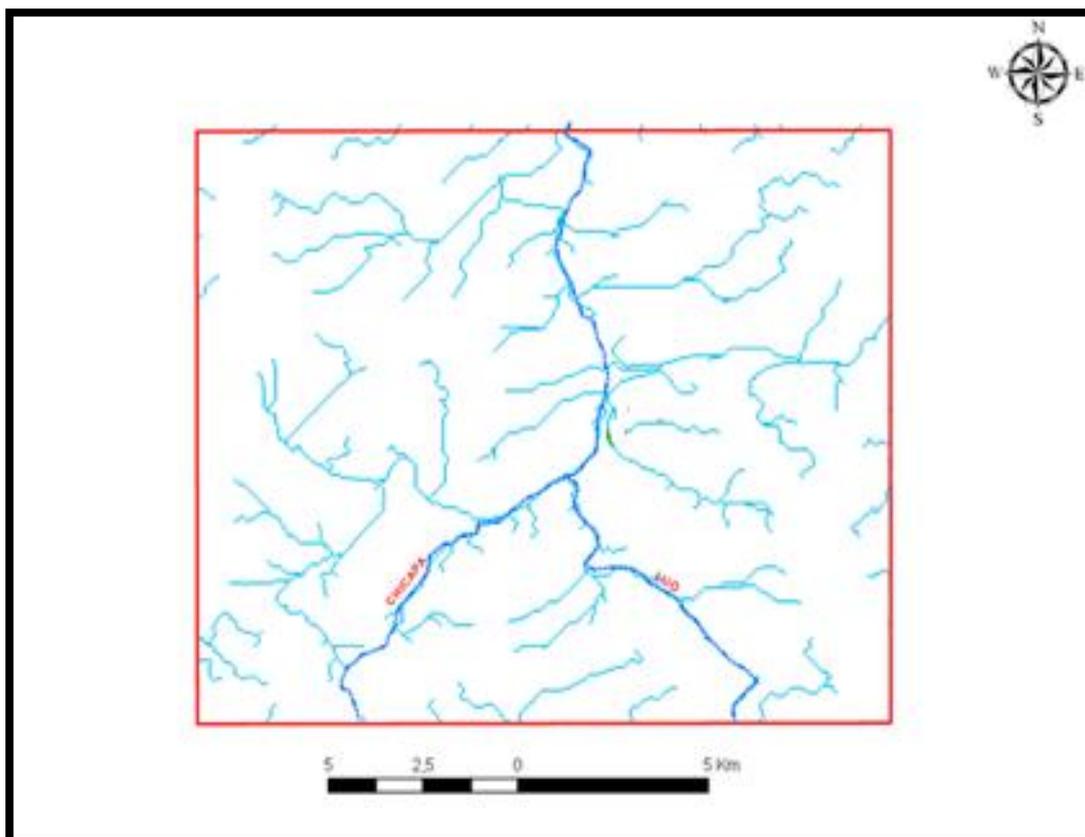


Figura (5.4) - Rede hidrográfica de camatchia

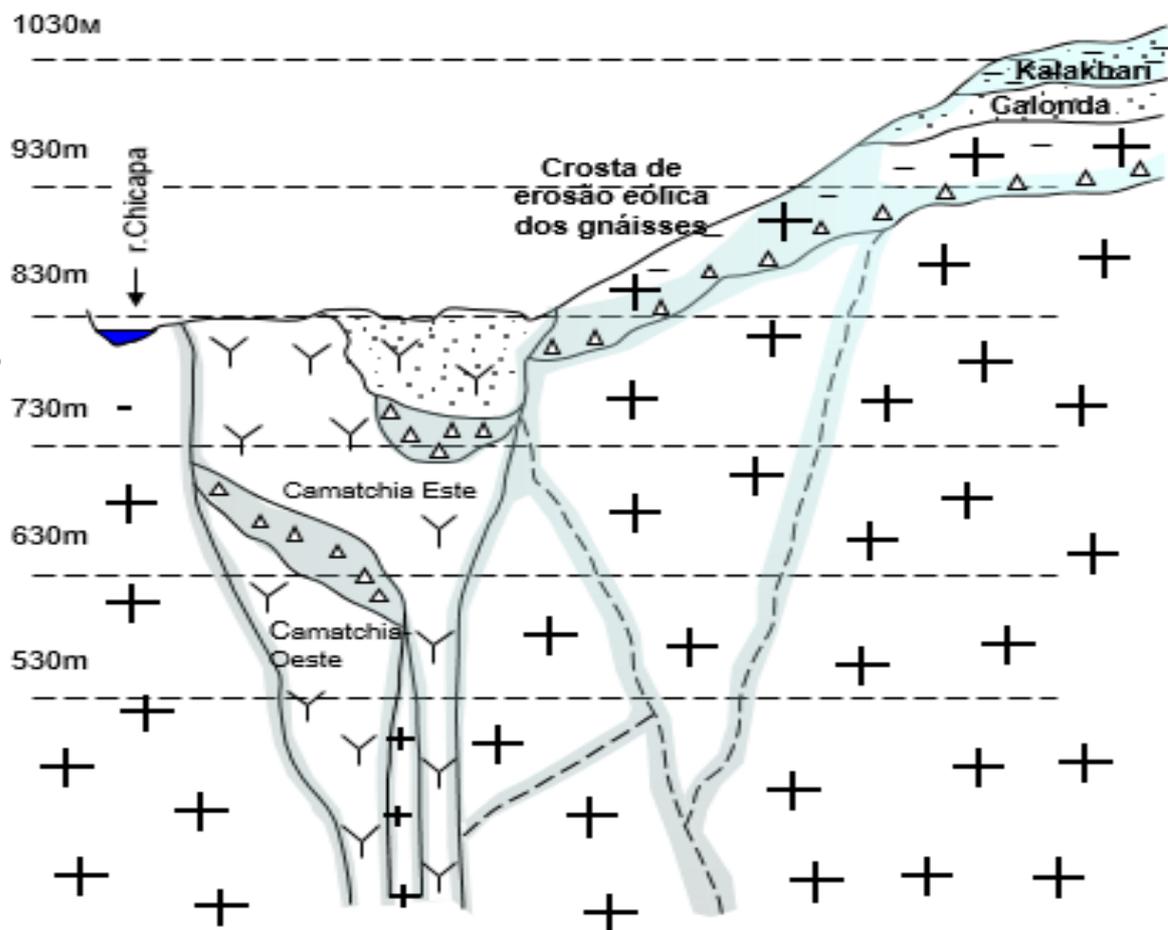
Fonte: Projecto Lunhinga

#### 5.4.2 Condições hidrogeológicas no jazigo Camatchia.

Os estudos hidrogeológicos no jazigo de camatchia que visavam estudo das condições do comportamento das águas no interior das rochas e solos, não foram conclusivos, contudo a avaliação da situação hidrogeológica foi feita baseando-se na estrutura geológica do jazigo, nas observações de campo sobre o regime de sondagem dos poços de prospecção e sobre o funcionamento do sistema de escoamento de água da mina. Com base nas investigações hidrogeológicas em outros jazigos, bem como nas observações da chaminé camatchia, verificou-se que tanto as rochas kimberlíticas assim como a maioria das rochas de formação de cratera, em termos hidrogeológicos são praticamente camadas impermeáveis. Sendo assim, as áreas de contacto do corpo do jazigo são zonas condutoras de água que se ligam com outros lençóis de água que estão patentes na chaminé, as partes de contacto encontram-se em interação com tais lençóis principais como:

- lençol de água nas rochas da crosta de erosão eólica dos granito-gnáisses;
- lençol de água na zona fracturada dos granito-gnáisses.

Conclui-se que as águas destes lençóis é a fonte condutora de água que enche a zona de contacto do kimberlito camatchia. No contacto com a chaminé a camada do lençol de água, nas rochas da crosta de erosão eólica, pode ser encontrado numa profundidade de 40 a 50m, mais para baixo desta profundidade a alimentação da zona de contacto portadora de água está associada com o lençol de água na zona fracturada dos granito-gnáisses. Com base no desenho da chaminé camatchia, além da zona de contacto, foram destacadas mais duas zonas que se são as fontes condutoras de água. Essa zonas são duas faixas xenolíticas. As referidas faixas estão constituídas por grandes blocos de granito-gnáisses, esses blocos são prendidos pelo tufo kimberlítico e algumas vezes contam com poros gerados não preenchidos com o material de ligadura, tais rochas, respectivamente, possuem parâmetros altos de filtração e transportam água livremente desde as zonas de contacto ao longo da sua extensão. Ambos os lençóis, nomeadamente o da crosta e o da parte fracturada - e as partes de contacto do corpo, bem como as faixas xenolíticas encontram-se hidraulicamente na sua totalidade interligados e formam um sistema hidráulico geral, este fenómeno verificou-se durante o processo de sondagem dos poços de prospecção. No âmbito da mina em desenvolvimento na parte ocidental do corpo foi aberto o contacto na profundidade de 30m e pela extensão à volta de 100m. O débito total dos mananciais que se tinham soltado na altura do desmonte do referido contacto, atingiu dezenas de m<sup>3</sup> por dia, tendo em conta o esvaziamento nesta parte da mina. É impossível avaliar a abundância aquática do lençol de água em causa dentro das rochas da crosta de erosão eólica dos granito-gnáisses só à base das observações na mina em desenvolvimento devido a que o lençol não foi totalmente aberto pelas banquetas da mina, como mostra a figura (5.5).



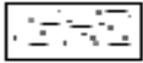
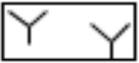
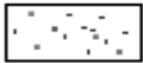
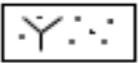
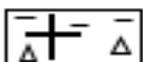
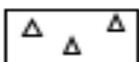
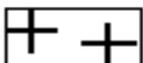
Legenda			
	depósitos arenosos da formação Kalakhari		kimberlitos magmáticos
	depósitos arenosos da formação Galonda		rochas kimberlíticas de cratera
	solos da crosta de erosão eólica		faixas xenolíticas
	granito-gnáisses do Arcáico		zonas de escoamento
			campo de fraturas tectónicas

Figura (5.5) - Esquema de alimentação hidráulica na chaminé camatchia.

Fonte: Projecto Lunhinga

### 5.4.3 Propriedades de filtração das rochas

Com base na avaliação dos efeitos das propriedades de filtração das rochas, na área do jazigo, foram executados esvaziamentos experimentais do lençol de água nas rochas da crosta de erosão eólica dos granito-gnáisses arcáicos. O esvaziamento foi feito entre os dias (16 - 21) de Fevereiro de 2005 no período de seis(6) dias, a partir do poço de exploração (G-3) na captação de água Caminda. O esvaziamento se realizava em leques, na qualidade do poço de observação foi aproveitado o poço de exploração (G-2) distanciado a 55.9 m do poço central. Por meio desta experiência foi estipulado o coeficiente da filtração das rochas de sarrisca-saibro da crosta de erosão eólica dos granito-gnáisses, igual a 0.233-0.287 m/por dia. Esses dados de referência sobre as propriedades de filtração das rochas na área do jazigo são apresentados na tabela (5.2).

Tabela (5.2) - Propriedades de filtração das rochas na área do jazigo

<b>Nºp</b>	<b>Rochas e lençóis de água</b>	<b>Coeficiente de filtração, MSUT</b>	<b>Fonte</b>
1	Rochas kimberlíticas (BAK, Brecha sedimentária)	0.0 - 0.00007	SMC «Catoca»
2	Rochas da crosta de erosão eólica dos granito-gnáisses arcáicos (sapropel, rocha degradada)	0.015 – 0.2	SMC «Catoca»
3	Rochas da crosta de erosão eólica dos granito-gnáisses arcáicos (sapropel, rocha degradada)	0.233 - 0.287	SMC «Camatchia-Camagico»
4	Zona fracturada (brecha tectónica com macro-poros)	0.3	SMC «Catoca»

Fonte: Projecto lunhinga

Resumidamente, nota-se que as zonas de contacto condutoras de água da chaminé estão desvendadas pela mina somente na profundidade até 30m e ao longo de 100m a quantidade de água que circula nestas zonas, não foram

desvendadas, tendo em conta os escassos estudos hidrogeológicos feitos na área da mina.

#### **5.4.4 Condições e fenómenos geológicos desfavoráveis na exploração da mina**

Na região do jazigo verificam-se uma série de processos e fenómenos naturais que se vêm desfavoráveis durante o desmonte e exploração da mina. Por exemplo

- ✓ Erosão dos solos arenosos - argilosos superiores devido às águas pluviais que formaram ravinas;



Figura (5.6) – Erosão na extremidade da chaminé Camatchia.

Fonte: foto modificada pelo autor

- ✓ Desprendimento de blocos instáveis das rochas encaixantes nas banquetas das bordas da mina, se a inclinação de disposição das camadas tem tendência no sentido para a mina ou foi ultrapassada a altura do banco da berma;
- ✓ Deslizamentos dos solos arenosos – argilosos impregnados de água nos pontos de saída das águas freáticas;

- ✓ Alagamento e apaulamento do terreno por conta de ocorrência não profunda das águas freáticas;
- ✓ Na existência dos sistemas de fendas com os ângulos escarpados de incidência no sentido para a mina são possíveis os desprendimentos dos blocos das rochas sem que haja alguma dependência dos ângulos de fundação das bordas.

### 5.5 Propriedades físicas-mecânicas das rochas encaixantes e Kimberlíticas do jazigo de camatchia

Os estudos das propriedades físicas – mecânicas das formações de cobertura, das rochas encaixantes e do minério foram realizados a partir dos monólitos de carotes sacados dos poços de prospecção perfurados pelo departamento de geologia na zona da chaminé e nos limites do território, assim como das colecções de amostras recolhidas neste território pelas outras organizações de prospecção geológicas nos fins dos anos 90. Na tabela (5.3), apresentam-se os valores de pesos volumétricos e as propriedades de resistências das rochas básicas e semi básicas. Estes dados podem ser utilizados para analisar profundamente as propriedades das rochas.

Tabela(5.3) -Índices principais das propriedades físicas – mecânicas dos sedimentos friáveis

Tipos de formações geológicas	Propriedades das formações de cobertura				
	Volume específico ( $\gamma$ )	Peso específico ( $\gamma$ )	$\omega$	C	$\varphi$
Camada de argilas Dilúvio – eluvial	1,79	2,71	18	0,062	18°
Formação Lutõe – areias e grés	1,96	2,68	8	1,3	28,0

fracamente cimentadas					
Formação Kalahari – areias de grão finos e médios	1,67 – 2,16	2.66	6	1.4	24.3
Formação Calonda – areias e grés argilosos	2.06	2.69	12	1.36	26.5
$\gamma$ (p) - Peso específico de rochas, T/m <sup>3</sup> $\gamma$ (v) – Peso volumétrico de rochas, T/m <sup>3</sup> $\omega$ – Humidade natural da rocha, % C- Coesão, T/m <sup>2</sup>	$\varphi$ - Ângulo de fricção interna, Grau e ang. de inclinação natural, (°) E - Modulo de deformação total (Pressão extrema possível), T/m <sup>2</sup> .				

Fonte: Projecto Lunhinga

Os valores normativos das propriedades de resistências foram baseadas por tipos de rocha de cada jazigo as mesmas apresentam-se na tabela (5.4), como se pode notar que certas características apontadas na tabela, apresentam valores mais precisos em função da quantidade de informações obtidas na fase do estudo.

Tabela (5.4) - Propriedades físicas-mecânicas das rochas e dos minérios

Tipos de formações geológicas	Propriedades das rochas encaixantes e dos minérios				
	Volume específico ( $\gamma$ )	Peso específico ( $\gamma$ )	$\omega$	C	$\varphi$
Camada de argilas Dilúvio-eluvial e da formação Calonda	1.79	2.71	18	0.062	18
Kimberlito autolito brecha baixa resistente, amolece	2.0 - 2.28	2.77	2.0-15	0.13-0,29	40
Kimberlito autolito brecha meio resistente não se amolece	2.47 -2.63	2.77	1.0-3.0	0.08	40
Tufo grés, tufo aleuvrolito e tufo c / cascalho	2.17	2.90	7.0	0.065	28
Kimberlito Porfírio alterado, pouco resistente	2.02-2.10	2.71	5.0-9.0	0.027	40
Kimberlito Porfírio meio resistente, amolece	2.64	2.71	4.0	0.076	39
Kimberlito Porfírio resistente, não amolece	2.80	2.91	2.0	0.24	40
Gnaisses alterados	2.77	2.90	1.0	0.95	32

Gnaisses resistentes	2.74	2.92	1.0	2.28	38
Dioritos e Gnaisses muito resistentes	2.74	3.07	1.0	2.50-3.0	35-45
$\gamma$ ( $\rho$ ) - Peso específico de rochas, T/m <sup>3</sup> $\gamma$ ( $v$ ) – Peso volumétrico de rochas, T/m <sup>3</sup>	$\omega$ – Humidade natural da rocha, % $C$ - Coesão, T/m <sup>2</sup> $\varphi$ - Ângulo de fricção interna, inclinação natural, (°)				

Fonte: Projecto Lunhinga

Para calcular o factor de segurança dos taludes, elaborou-se a tabela geral com os valores das propriedades físicas e mecânicas das rochas encaixantes ou seja as rochas que cobrem o corpo kimberlítico de camatchia no projecto lunhinga. Apartir das tabelas (5.3) e (5.4), fez-se a conversão do peso específico das unidades de T/m<sup>3</sup> para KN/m<sup>3</sup> e da coesão com as unidades T/m<sup>2</sup> para KN/m<sup>2</sup>, considerando o valor da gravidades 10g/ms<sup>2</sup>, obtendo assim os seguintes valores na tabela (5.5).

Tabela (5.5) -Valores das propriedades das rocha encaixantes

<b>Tipos de formações geológicas</b>	<b>Peso específico KN/m<sup>3</sup></b>	<b>Coesão KN/m<sup>2</sup></b>	<b>Angulo de atrito interno (graus)</b>
Formação Lutôe – areias e grés fracamente cimentadas	26,80	13,6	28,0
Formação Kalahari – areias de grão finos e médios	26,60	14	24.3

Formação Calonda – areias e grés argilosos	26,90	13	26.5
Gnaisses alterados	29.00	9,5	32
Gnaisses resistentes	29,20	22,8	38
Diorito e Gnaisses muito resistentes	30,70	25.00	40

Fonte: Projecto Lunhinga, modificado pelo Autor

## 5.6 Resultados e Discussões

Para este trabalho, foi utilizado o software Geostudio cuja plataforma SLOPE/W é utilizada para as análises da estabilidade de taludes. O programa Geostudio é um programa de análise de estabilidade de taludes, baseado no método dos elementos finitos no qual é possível fazer análises de estabilidade de taludes, de percolação, de tensão e deformação, de sismos entre outros. O Geostudio Student Edition é uma versão simplificada do software (GEOSLOPE, 2021 – R2) destinada a desenvolver análises geotécnicas, porém com algumas restrições. Para a determinação do factor de segurança o método escolhido é, Morgenstern - Price.

As análises nos taludes foram feitas individualmente para cada tipo de formação que cobre a chaminé. Assim para a determinação do factor de segurança a chaminé foi dividida em secções, com base nos blocos que compõem a própria chaminé, conforme ilustra a figura (5.7).

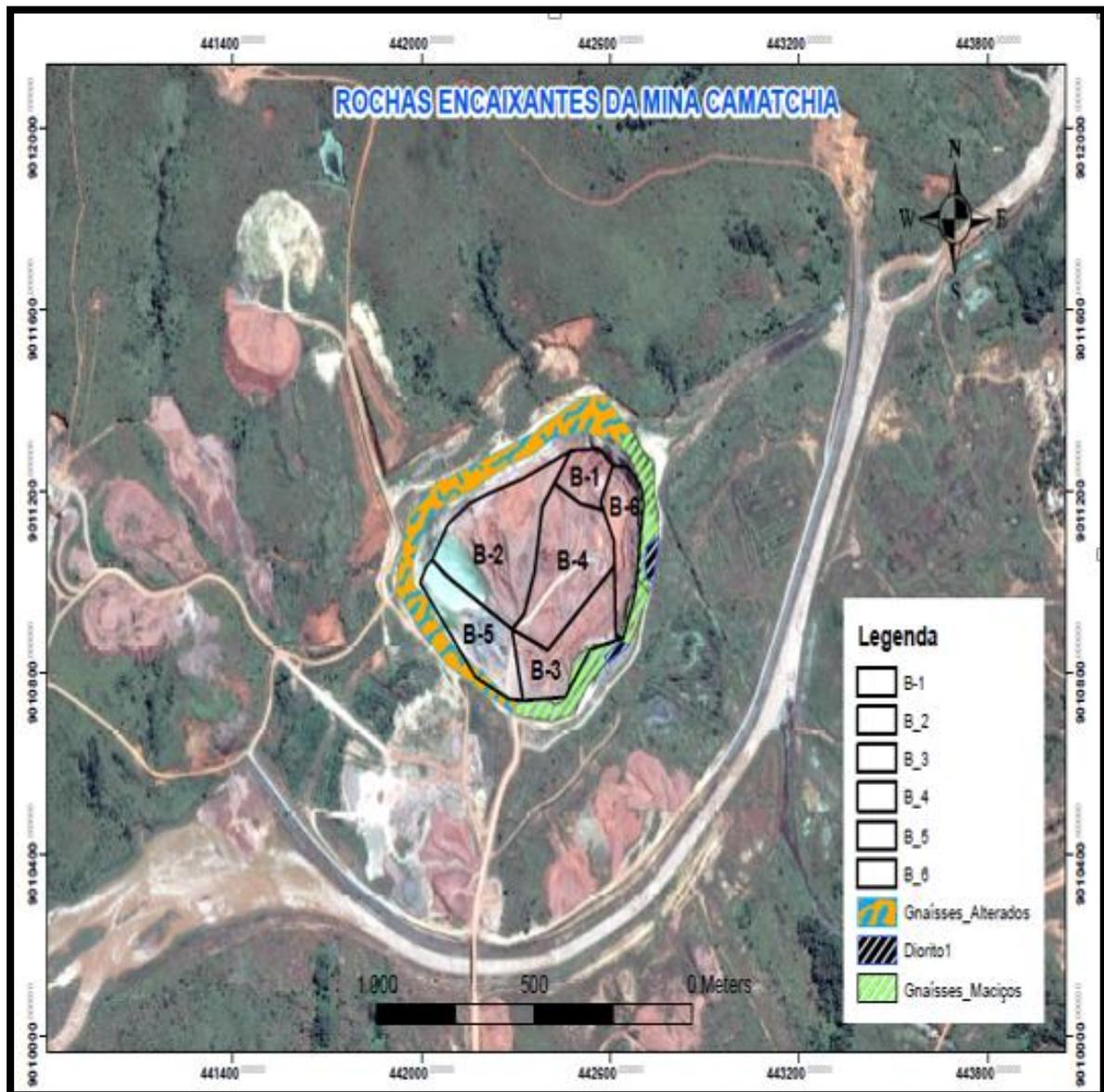


Figura (5.7) – Rochas encaixantes em volta dos blocos na mina de camatchia

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.6.1 Secção1 (B1B2B5)

Nesta parte, a chaminé é composto por diferentes tipos de materiais como: as formações Kalahari, os solos residuais argilose os gnaisses alterados em toda sua extensão.

- **Formação kalahari** - Areas de grãos finos e médio

Propriedades fundamentais:

Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	Coesão (KN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito (graus)
26,60	14	24,3

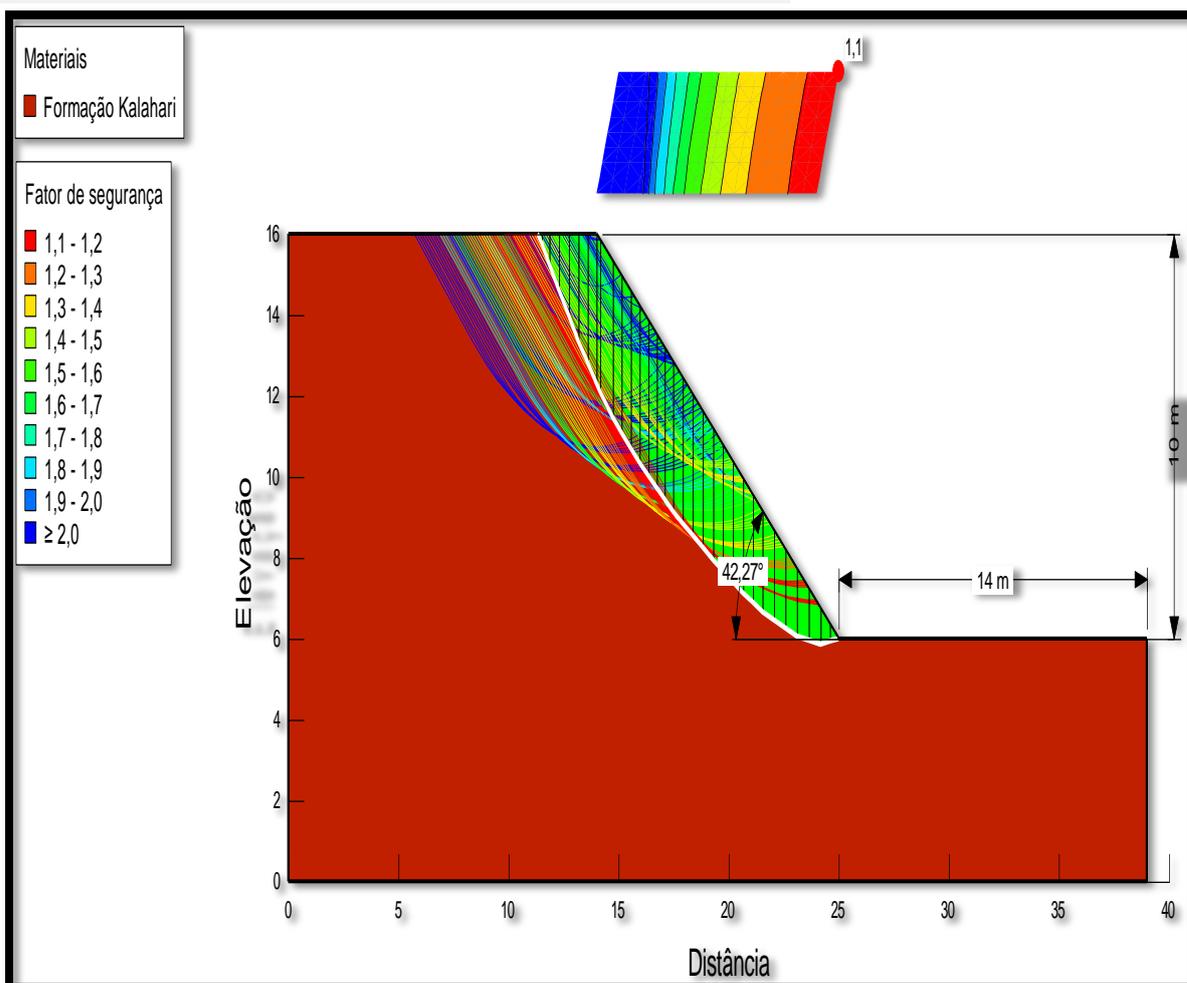


Figura (5.8) – Vista de perfil de uma bancada da formação Kalahari.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para uma melhor visualização dos coeficientes de segurança, são apresentados as curvas e cores obtidas pelo Geostudio, que relacionam os factores de segurança em função da distância da zona de corte, variando ao longo corpo do talude.

➤ Zona potencial de ruptura

Tabela (5.6) - Fatias (19), dados

Parâmetros e Forças actuantes	Valores
Largura da Fatia	0,47064 m
Altura média	3,4386 m
Lambda aplicado	0,72561
Peso (inclui Sismo Vert.)	43,048 kN
Força Normal na Base	36,643 kN
Força Cisalhante Mob. na base	22,29 kN
Força normal lado esquerdo	69,992 kN
Força cisalhante lado esquerdo	50,738 kN
Força normal lado direito	70,977 kN
Força cisalhante lado direito	50,91 kN

Fonte: geostudio

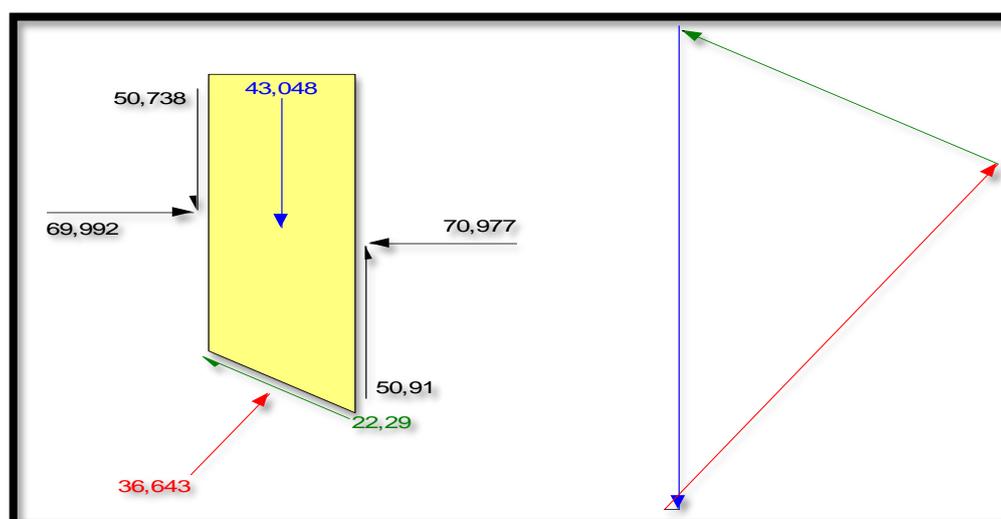


Figura (5.9) – Diagrama da fatia (19) e polígonos de forças actuantes.

Fonte: geostudio

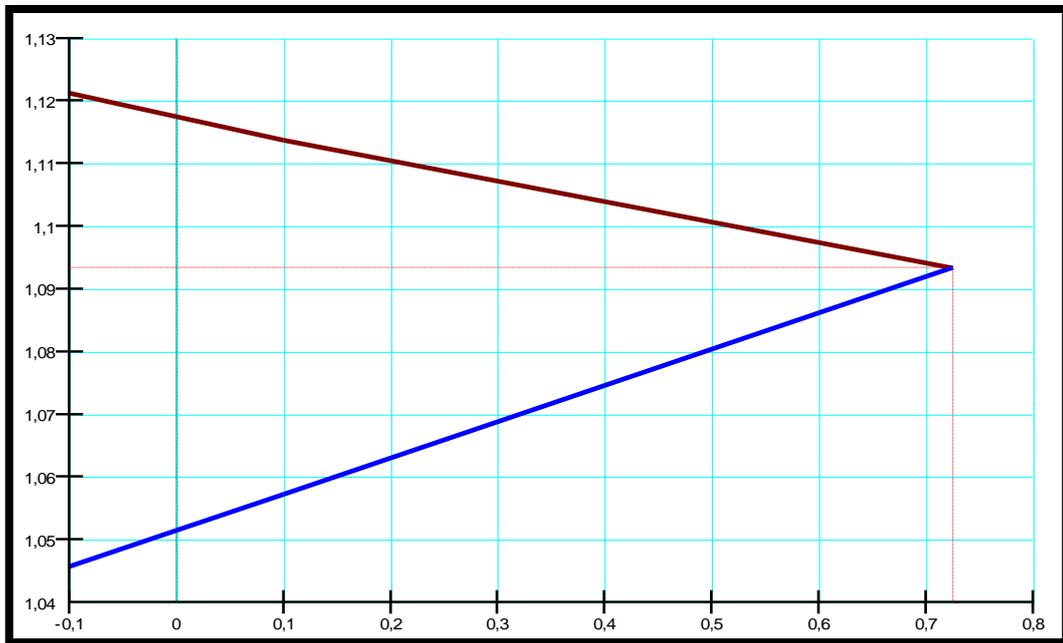


Figura (5.10) – Intersecção entre forças e momentos vs factor de segurança.

Fonte: geostudio



➤ Resultado das análises

Tabela (5.7) – Resultados da análise na formação kalahari.

Paramêtros	Valores
Factor de Segurança	1,1
Volume Total	36,274 m <sup>3</sup>
Peso Total	964,9 kN

Momento Resistente Total	8.214,8 kN·m
Momento Actuante Total	7.514,3 kN·m
Força Resistente Total	486,4 kN
Força Actuante Total	444,85 kN
Ruptura	Circular –Rotacional

Fonte: geostudio

- **Gnaisses alterados**

Para os gnaisses a presença e a circulação das águas nos taludes, é verificada em função das descontinuidades (falhas, fissuras e juntas nas zonas de contacto, etc.).

Propriedades fundamentais:

Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	Coesão (KN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito (graus)
29,00	9,5	32

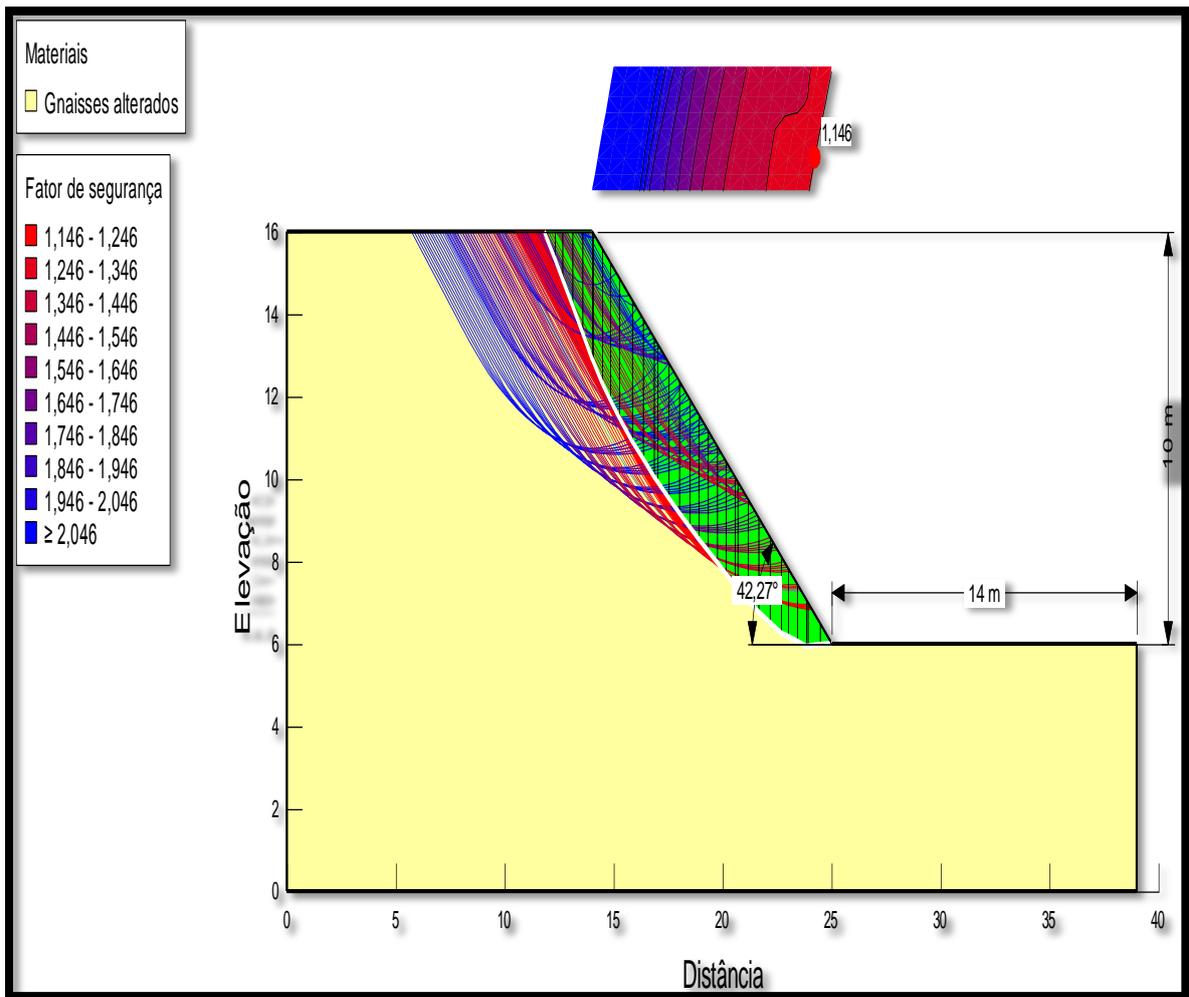


Figura (5.11) –Vista de perfil de uma bancada, de Gnaisses alterados.

Fonte: Elaborado pelo Autor

➤ Zona potencial de ruptura

Tabela (5.8) - Fatias (15), dados

Parâmetros e Forças actuantes	Valores
-------------------------------	---------

Largura da Fatia	0,47909 m
Altura média	3,2333 m
Lambda aplicado	0,83456
Peso (inclui Sismo Vert.)	44,922 kN
Força Normal na Base	35,633 kN
Força Cisalhante Mob. na base	24,332 kN
Força normal lado esquerdo	56,829 kN
Força cisalhante lado esquerdo	46,368 kN
Força normal lado direito	57,991 kN
Força cisalhante lado direito	48,166 kN

Fonte: geostudio

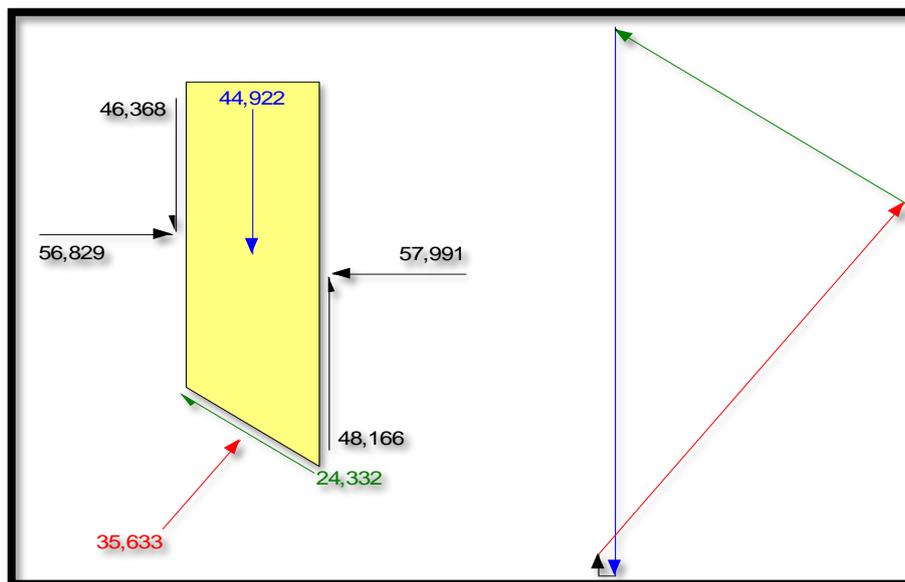


Figura (5.12) – Diagrama da fatia (15) e polígonos de forças actuantes.

Fonte: geostudio

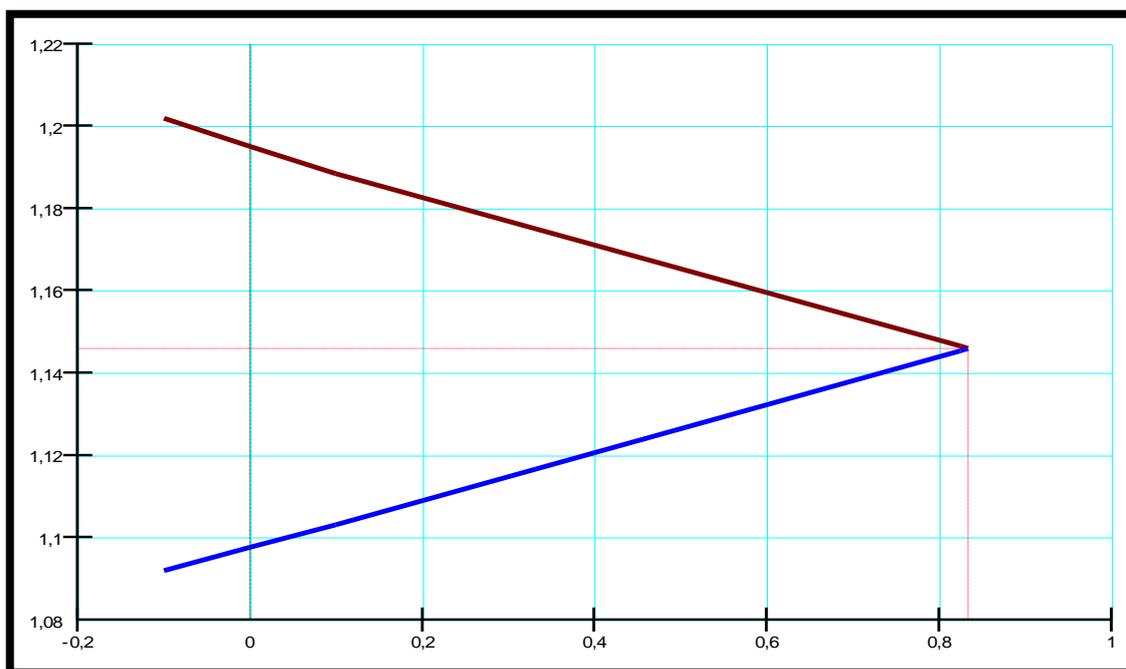


Figura (5.13) – Intersecção entre forças e momentos vs factor de segurança.

Fonte: geostudio

➤ Resultado das análises

Tabela (5.9) – Resultados da análise nos gnaisses alterados.

Paramêtros	Valores
Factor de Segurança	1,146
Volume Total	31,325 m <sup>3</sup>
Peso Total	908,42 kN
Momento Resistente Total	6.698,5 kN·m
Momento Actuante Total	5.845,7 kN·m
Força Resistente Total	482,63 kN
Força Actuante Total	421,2 kN

Ruptura	Circular –Rotacional
---------	----------------------

Fonte: geostudio

### 5.6.2 Secção1(B3B6)

Nesta parte, as rochas encaixantes da chaminés são os gnaisses resistentes, com presença de rochas dioríticas e os gnaisses muito macios que cobrem toda a chaminé a partir dos 100m de profundidade.

- **Gnaisses resistentes**

Propriedades fundamentais:

Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	Coesão (KN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito (graus)
29,20	22,8	38

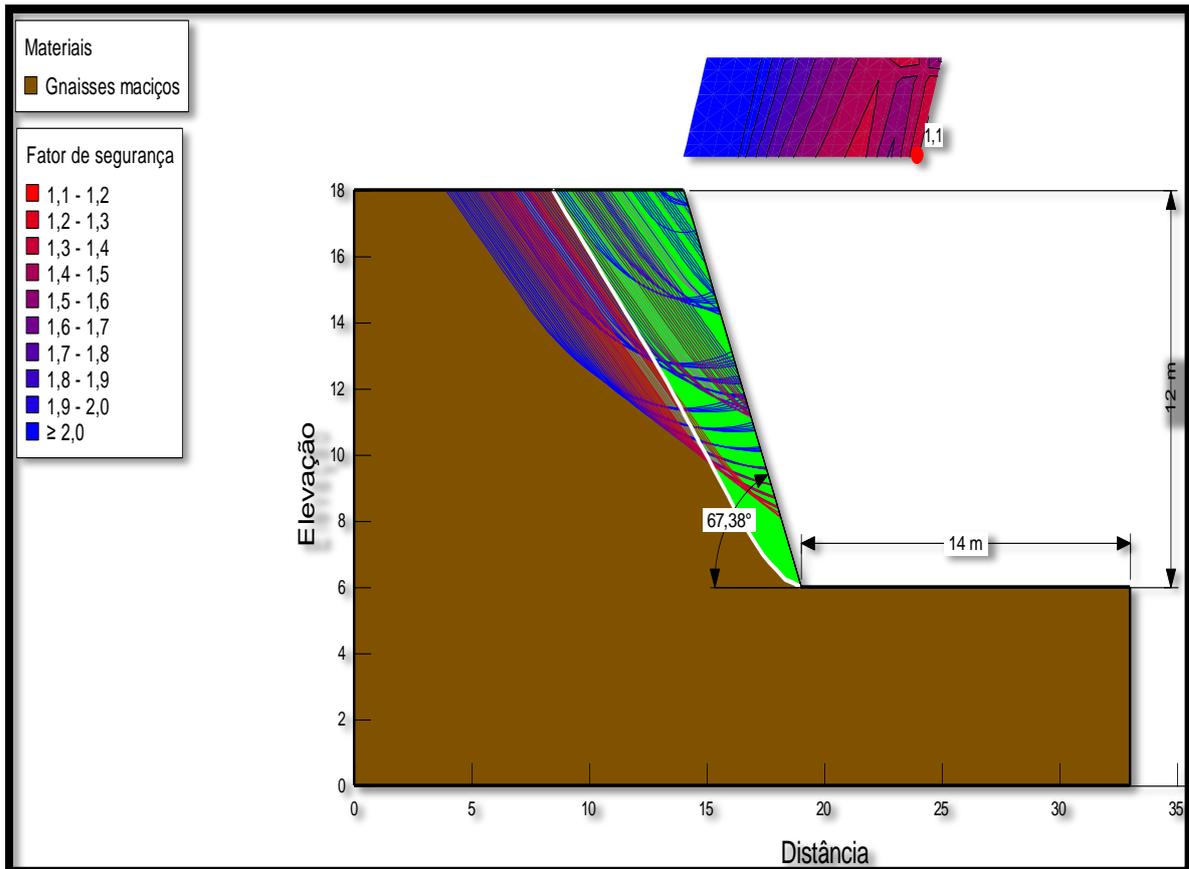


Figura (5.14) - Vista de perfil de uma bancada, formado por Gnaisses resistente.

Fonte: Elaborado pelo Autor

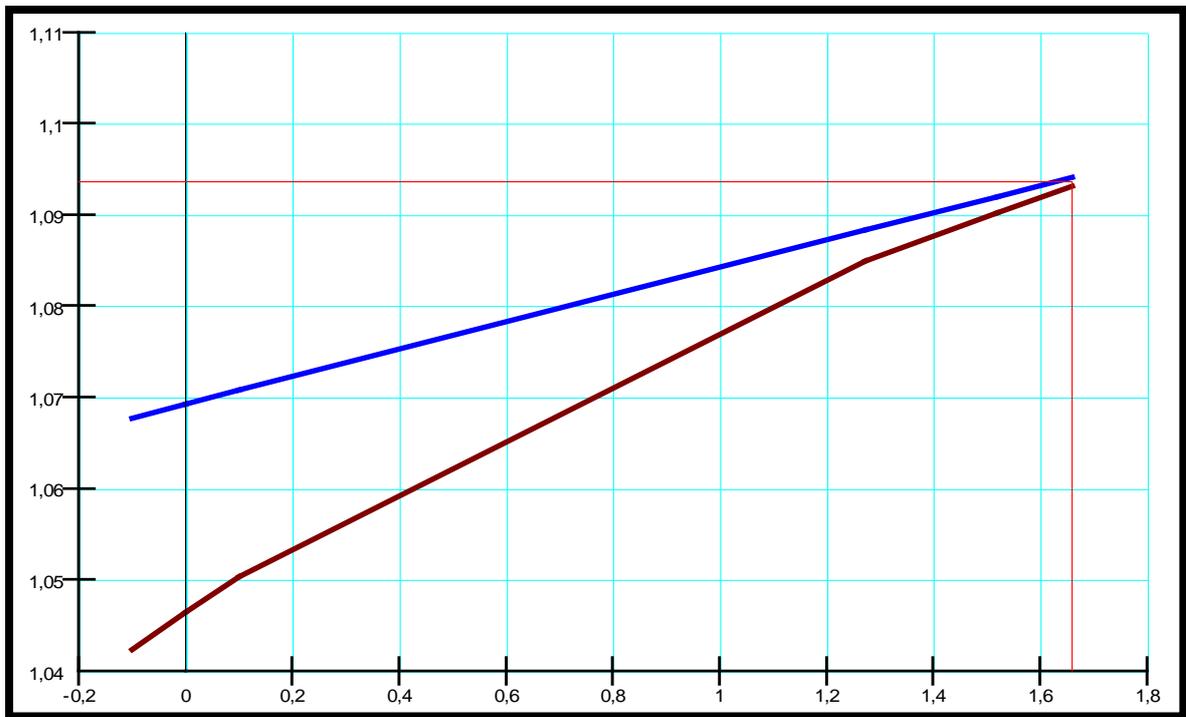


Figura (5.15) – Intersecção entre os momentos e forças vs factor de segurança.

Fonte: geostudio

➤ Resultado das análises

Tabela (5.10) - Resultado da análise nos gnaisses resistentes

Paramêtros	Valores
Factor de Segurança	1,1
Mod. resistência anisotrópica.	1
Volume Total	37,696 m <sup>3</sup>
Peso Total	1.100,7 kN
Momento Resistente Total	11.512 kN·m
Momento Actuante Total	10.532 kN·m
Força Resistente Total	585,2 kN
Força Actuante Total	534,9 kN
Ruptura	Planar-Translacional

Fonte: geostudio

## Secção 1 e 2

- **Dioritos e Gnaisses muito resistentes**

Estas rochas (gnaisses muito resistentes), cobrem toda a chaminé a partir dos 100m de profundidade em diante.

Propriedades fundamentais:

Peso específico	Coesão	Ângulo de atrito
(KN/m <sup>3</sup> )	(KN/m <sup>2</sup> )	(graus)

30,70

25

40

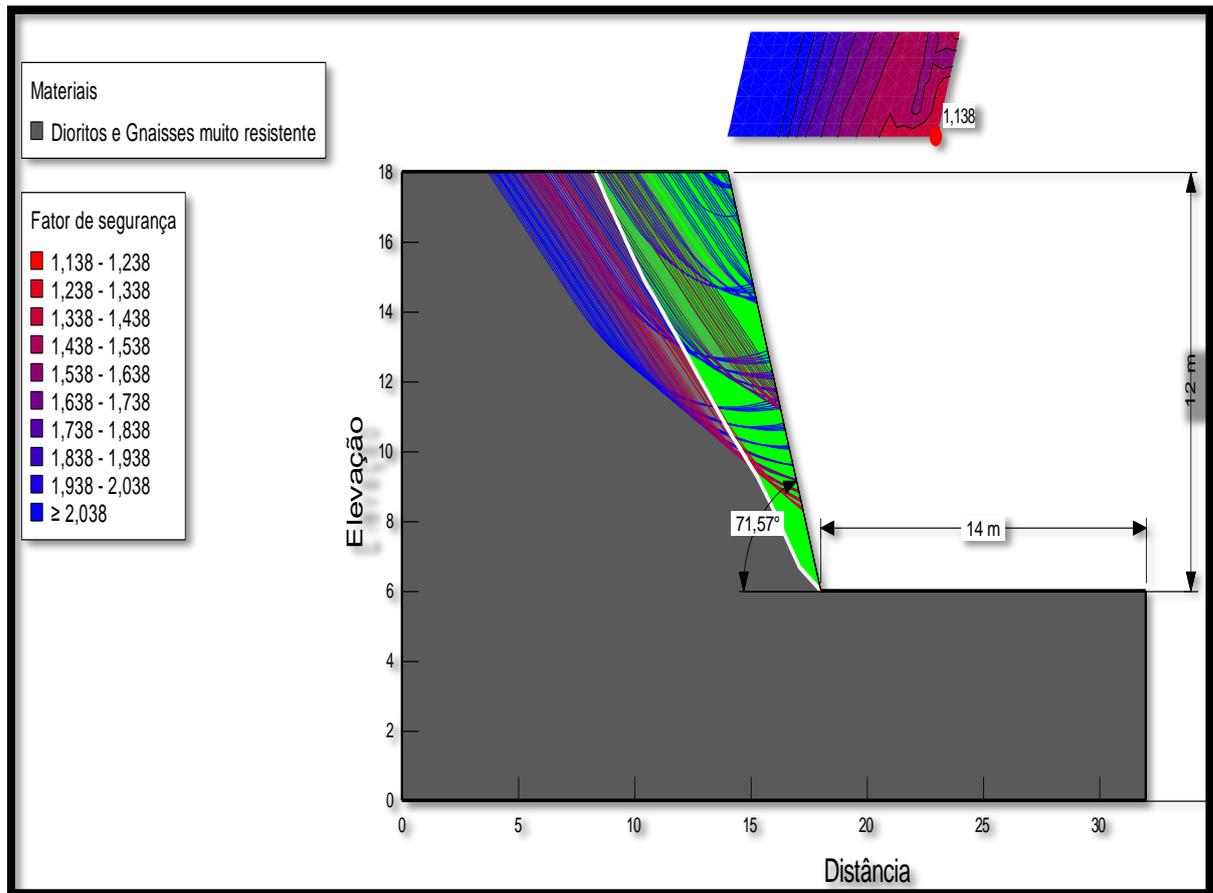


Figura (5.16) - Vista de perfil de uma bancada, Gnaisses muito resistentes.

Fonte: Elaborado pelo Autor

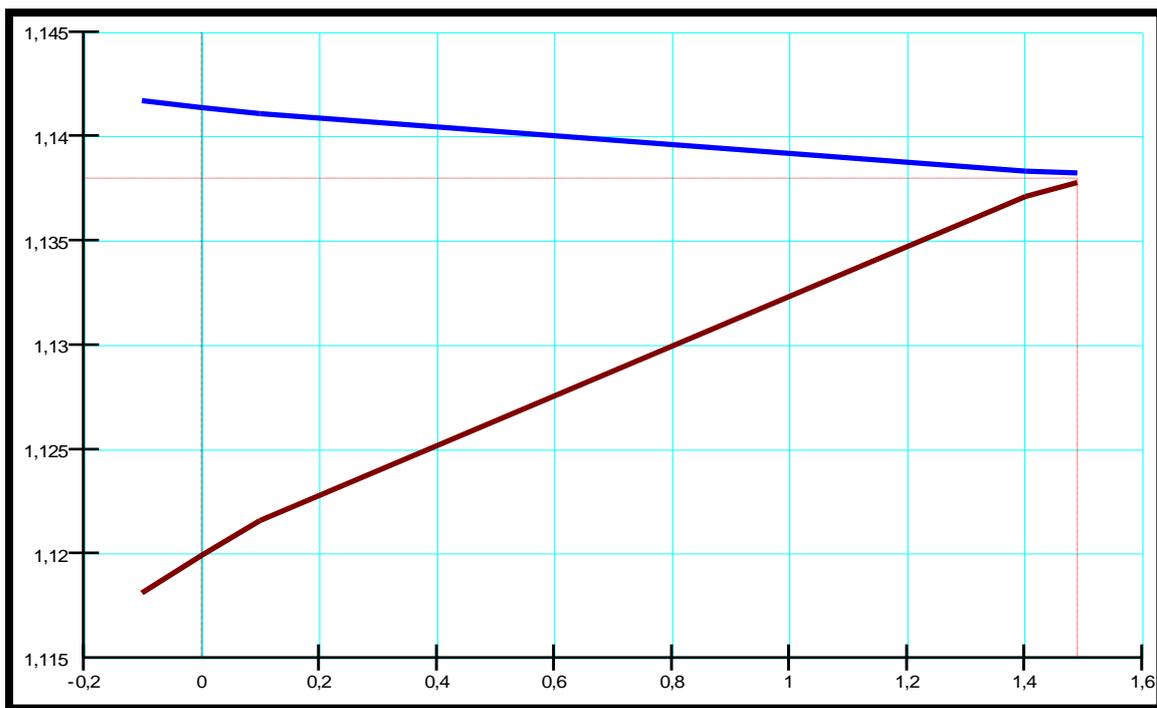


Figura (5.17) – Intersecção entre os momentos e forças vs factor de segurança.

Fonte: geostudio

➤ Resultado das análises

Tabela (5.11) - Resultado da análise nos gnaisses muito resistentes.

Paramêtros	Valores
Factor de Segurança	1,138
Mod. resistência anisotrópica.	1
Volume Total	37,081 m <sup>3</sup>
Peso Total	1.138,4 kN
Momento Resistente Total	12.265 kN·m
Momento Actuante Total	10.780 kN·m
Força Resistente Total	632,95 kN

Força Actuante Total	556,1 kN
Ruptura	Planar-Translacional

Fonte: geostudio

**Obs:** para casos de taludes formado por mais de um tipo de formação geológica, os parâmetros para a sua construção devem ser escolhidos em função daquela que apresenta as propriedades mais baixas em relação as outras formações.

### 5.6.3 Estradas na mina

Uma estrada deve ser projectada num local que permita a remoção de material ao longo de uma curta e rápida rota na mina. Os principais objectivos do projecto de estradas na mina são:

- Eficiencia das operações mineiras;
- Segurança

Na mina de camatchia, o dimensionamento das estradas foi feito com base nos camiões (HM400), camiões articulados de marca komatsu.

Capacidade: 40T

Volume: 24m<sup>3</sup>

Largura: 3,45m, sendo estabelecido em 3.5m.

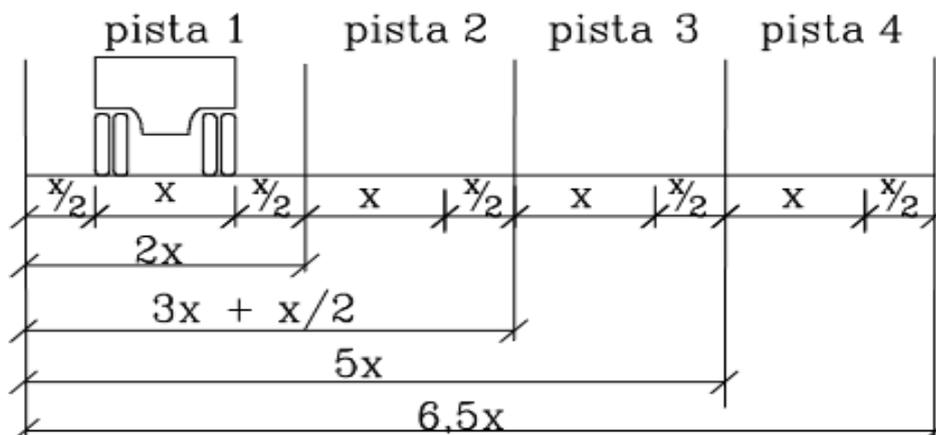


Figura (5.18) - Largura das estradas para pistas em linha recta.

Fonte: Pinto e Dutra (2008)

Apartir da relação a baixo:

$L_r = L_v.(0,5+1,5.n)$ ; onde (n) corresponde o número de linhas ou pista, equivalentes a duas linhas de tráfego para a mina de camatchia.

$$L_r = 3,5.(0,5+1,5*2)$$

A largura mínima das rampas em linha recta no interior da cava será:

$$L_r = 12m.$$

A largura nas curvas devem ser construídas com maior dimensão permissível para as condições de operação dos equipamentos.

$$L_r = 14m, \text{ Nas curvas}$$

É importante tentar evitar sequências de curvas, excepto onde uma significativa economia de material pode ser feita ou onde for impossível alcançar um objetivo pelo uso de uma rampa ininterrupta máxima.

As estradas ao longo da superfície na mina ou seja fora da cava, devem ser equivalentes a três linhas ou pistas para o maior tráfego e acesso as operações,

$$L_r = 18m.$$

É recomendavel sempre que possivel, que dois acesso sejam projectados para alguma área da mina de modo a evitar paradas de produção quando um acesso é interrompido.

Tabela (5.12) – Quadro geral dos resultados das análises feitas, como proposta para o dimensionamento da geometria dos taludes da mina de camatchia.

<b>Formações geológicas</b>	<b>Secção</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Ângulo de inclinação (graus)</b>	<b>Largura da berma (m)</b>	<b>Largura da rampa (m)</b>	<b>F.S</b>
Formação Lutôe	X	10	45	14	X	1.2
Formação Calonda	X	10	42	14	X	1.1
Formação Kalahari	B1B2B5	10	42	14	12	1.1
Gnaisses Alterados	B1B2B5	10	42	14	12	1.146
Gnaisses Resistentes	B3B6	12	67	14	12	1.1
Dioritos e Gnaisses muito resistentes	B3B6	12	71	14	12	1.138

Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5.7 Impactos ambientais

A mineração é uma actividade que se desenvolve por meio de pesquisa, exploração, extracção e uso dos minérios que estão situados no solo e formações rochosas que compõem a estrutura terrestre. Este é um dos sectores básicos da economia de vários países, auxiliando de forma significativa no bem-estar e na melhoria da qualidade de vida das pessoas, no entanto é uma actividade econômica e industrial que pode modificar profundamente o ecossistema local a medida em que imensas quantidades de resíduos gerada é descartada erradamente no meio ambiente e enormes cavas são abertas no solo. Esta modificação do meio é chamada de impacto ambiental. As consequências

ambientais são desde problemas locais específicos até alterações biológicas, geomorfológicas, hídricas e atmosféricas de grandes proporções. Entre as principais alterações nas paisagens e os impactos gerados pela mineração, destacam-se os seguintes:

- Remoção da vegetação em todas as áreas de extração; Para realizar a mineração de lavra à céu aberto, a primeira etapa refere-se à retirada da cobertura vegetal, diversas áreas são desmatadas provocando possíveis alterações climáticas e causando prejuízos à fauna e à flora.



Figura (5.19) - Impactos na paisagem, mina de camatchia.

Fonte: Foto tirada pelo autor

- Poluição dos recursos hídricos;

A contaminação dos recursos hídricos pode ocorrer de seguinte maneira na mineração:

- ✓ Por meio do alto consumo de água para beneficiamento do minério;
- ✓ Sedimentação e poluição de rios pelo descarte indevido do material produzido não aproveitado;



Figura (5.20)- Bacia de rejeitado da central de tratamento do projecto lunhinga.

Fonte: Foto tirada pelo autor

Esta prática é muito recorrente na mina do projecto lunhinga e constitui maior fonte dos impactos dos recursos hídricos na mina, sem descartar os outros meios de impacto do qual devem merecer maior atenção por parte das autoridades da mina, no sentido de se reduzirem esses impactos, tendo em conta que as mesmas não podem ser evitadas. Contudo, durante a fase de extração se não forem realizada de maneira correcta, esses resíduos podem alcançar os recursos hídricos contaminando-os.

- Medidas para a mitigação dos impactos ambientais causados pelas actividades mineiras

Várias medidas podem ser realizadas para compensar os problemas gerados ao meio ambiente pela mineração. É importante tentar minimizar ao máximo os impactos ambientais e garantir a preservação do meio ambiente natural, tendo em conta que os mesmos não podem ser evitados. Sendo assim, o sector da mineração deve levar em consideração os seguintes aspectos:

- Soluções para minimizar a quantidade de resíduos gerados e o seu descarte correcto;
- Racionar o uso de água;

- Reabilitação de áreas degradadas;
- Diminuição / eliminação do uso de barragens; etc.

Tabela (5.13) – Quadro resumido dos impactos ambientais e as medidas de prevenção.

<b>Meios</b>	<b>Efeitos / Impactos</b>	<b>Medidas Preventivas / Mitigadoras</b>
Solo e Rocha	Diminuição da recarga e rebaixamento do lençol freático, erosão, Perda de fertilidade, Alterações no relevo e na paisagem Poluição visual	Reflorestamento, Estoque de água no caso de bombeamento para minimizar rebaixamento do lençol freático, drenagem adequada, controle de erosão, etc.
Água	Assoreamento dos corpos d'água superficiais, diminuição da vazão de poços e nascentes, diminuição da vazão de rios e córregos e do volume de lagos/ reservatórios, escassez de água	Controle de erosão e uso racional da água, circuito fechado para os processos da mineração que utilizam água. Planeamento junto aos comitês de bacia hidrográfica dos diversos usos da água incluindo prioridade para o abastecimento público etc.
	Poluição das águas superficiais e subterrâneas (acidificação, aumento da demanda bioquímica de oxigênio, queda do oxigênio dissolvido, cor, turbidez metais pesados, etc.)	Recirculação e tratamento adequado dos efluentes, controle de erosão, contenção de sedimentos, Plano de segurança e de contingência, etc.
Ar	Contaminação do ar (física e química) Poluição sonora	Aspersão de vias e das áreas de mineração a céu aberto, utilização de equipamentos de controle de poluição do ar, barreiras de vegetação etc.

Fonte: Sepe e Salvador, (2018).

## CAPÍTULO VI—CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

### 6.1 Conclusão

A implementação dos métodos de análise da estabilidade de taludes no software SLOPE/W, apesar das limitações impostas em sua versão gratuita, se mostrou uma boa ferramenta de análise de estabilidade de taludes, visto que foi possível realizar as análises da estabilidade dos taludes da mina de camatchia utilizando apenas dados básicos de investigação.

As condições de estabilidade foram baseados nos limites utilizados na mineração acéu aberto onde o factor de segurança mínimo adoptado para taludes deve ser igual a ou superior a (1.1).

Com os resultados dos estudos feitos, foram proposta: altura dos bancos individuais, largura das bermas e as inclinações dos taludes para os diferentes tipos de formações que cobrem a cava, o que resultou na criação de uma tabela que concilia os aspectos de segurança das frentes de lavra e as geometrias finais propostas para os taludes, mostrados na tabela (5.12).

Conclui-se que os factores de segurança obtidos neste trabalho com vista a proposta da configuração da nova geometria dos taludes de camatchia são estáveis e possuem níveis de segurança aceitáveis quando comparados com os factores mínimos recomendados no critério de projecto de taludes de mineração adoptado neste trabalho.

## **6.2 Recomendações**

A metodologia aplicada demonstrou eficiência no levantamento dos dados pertinentes a investigação geotécnica. Recomenda-se a continuidade desses estudos compreendendo inclusive novas campanhas de investigações geotécnica e hidrogeológicas das litologias locais.

- Dimensionar uma nova geometria na cava, que culminará com o alargamento da mina e a correção dos taludes, com vista alcançar as reservas que podem ser condicionadas pelas condições de segurança dos taludes da mina em função da profundidade que se pretende atingir, conforme os estudos indicados pela prospecção geológica.
- Implementar um sistema de drenagem com métodos combinados, para o controlo das águas na mina, visto que, com o aprofundamento da cava, o nível freático foi atingido.
- No caso dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos rejeitos da central de tratamento, recomenda-se que a planta de beneficiamento funcione em circuito fechado com três ou mais bacias de decantação promovendo o reaproveitamento de água e evitando assim o arraste de partículas sólidas por vias das águas até ao rio.

### **Sugestões para futuras pesquisas**

Recomenda-se as seguintes sugestões para pesquisas futura:

- Aprofundar os estudos de estabilidade por métodos tensão-deformação aplicando o programa geoslope com modelos diferentes, verificando qual o modelo mais adequado para cada caso estudado.

- Re-análise da estabilidade nas secções estudadas caso sejam observadas modificações significativas na composição da estratigrafia do depósito em relação à superfície adoptada neste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 9061: Segurança de Escavação a Céu Aberto.

AGUILERA, C. E. Tristá. (2009) - Aplicação de Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes de Grande Altura em Mineração

BASTOS, Mário J. N. Engenheiro de Minas, aspectos sobre sistemas de drenagem em pedreiras a céu aberto, 2000.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., v. 15, p. 335 – 344, 1973.

BIENIAWSKI Z .T. (1989): Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, v. 6, pp. 183-236.

BISHOP, A. W.; MORGENSTERN, N. R. Stability coefficients for earth slopes. Geotechnique, n. 10, p. 129-150, 1960.

CAPUCHO, Renato Reis- Estudo de estabilidade de taludes da mina de tapira-mg, 2010.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas aplicações, vol. 1 e 3. Rio de Janeiro: LTC, 1987. Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). O Manual do Deslizamento - Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. U. S. Geological Survey.

CLEMENT C.R. SKINNER E. M.W . Scott-Smith B.H. 1984. Kimberlite redefined journal of Geology 1(2:223-223).

CLIFORD T N. 1966. Tectono -metallogenic units and metallogenic provinces in Africa. earth and planetary science letters 1:42 1-4 34.

DEERE, D. U., HENDRON, A. J., PATTON, F. D. AND CORDING, E. J. Design of surface and near surface construction in rock. In Failure and breakage of rock. Rock mech., 237-302. New York: Soc, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs. 1967.

DOBEREINER, L.; VAZ, L. F. Tratamento de Maciços Naturais, 1998 p. 361-380.

DOUGLAS M. A. Bittencourt - Origem e ciclo de formação dos solos (2016).

FERREIRA, L. A. Escavação e exploração de minas a céu aberto, 2013.

FREIRE, E.S.M. Movimentos colectivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. Rio de Janeiro, revista de construção, 1965.

FRITSCHER, Ester Cristina - Análise de estabilidade de talude: estudo de caso no município de teutônia/rs 2016.

GEOSLOPE Opções de licenciamento. Disponível em: <<https://www.geoslope.com/geostudio/licensing>> Acesso em 06 de janeiro de 2021.

GERMANI, D. J. Relatório Final: A Mineração no Brasil. Rev 02. Rio de Janeiro, 2002. Não Paginada.

GERSCOVICH, Denise M. S. (2016)- estabilidade de taludes. 2ª edição com exercícios resolvidos.

GONÇALVES, C. F. Ferreira (2016) - Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos. Aplicação a Caso de Estudo.

HOEK, E. & BRAY, J.W. (1981). Rock Slope Engineering. The Institution of Mining & Metallurgy, London, UK, 358 p.

HOEK, E. & BROWN, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining & Metallurgy, London, UK, 527 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981, Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 18, n. 6, pp. 109.

KIRKLEY, M.B.; Gurney, J.J.; Levinson, A.A. (1991). Idade, origem, e colocação de Diamantes: avanços científicos, na última década; Gemas e Gemologia, vol. 27, No. 1, PP2-25, Gemological Institute of America.

KLICHE C. A. 2011. Slope Stability. In: Darling P. SME Mining Engineering Handbook. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, p. 495-525.

MARINA, Lemos Silveira- drenagem em minas de bauxita na região de poços de caldas, 2014.

MASSAD, Façal. Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MATOS F. M. (2011). Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica (Volume 2). Porto: FEUP Edições.

MICHELLE C. A. Mariano - simulação de utilização de drenos horizontais profundos para redução da humidade em frentes de lavra em uma empresa mineradora controle das águas em projetos de mineração, 2017.

MITCHELL, Roger H. (1986). Kimberlites. Mineralogy, Geochemistry, and Petrology, Plenum Press, New York.

MOISÉS, António André (2003). Geologia & Técnicas de Prospecção dos Depósitos Diamantíferos do Nordeste de Angola. Editor: António André Moisés

Ng, C. W., & Shi, Q. (2003). The stability of unsaturated soil slopes subjected to rainfall Infiltration. Numerical Analysis and Modelling in Geomechanics, 104-131.

ORTIGÃO, J. A. R. (1995). Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro.

PREENE, M. 2015. Techniques and Developments in Quarry and Surface Mine Dewatering

PINTO, Cláudio Lúcio Lopes; DUTRA, José Ildelfonso Gusmão - curso: introdução ao planeamento e operação de lavra (a céu aberto e subterrânea) (2008)

RAFAELLA, R. Amaral (2019). Caracterização geologica-geotecnica de maciços rochosos marginais à BR 262 entre pará e nova serrana.

REIS, R. C. Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira-MG. UFOP. Ouro Preto, p. 145. 2010.

RELATÓRIOS do Departamento de Geologia da Sociedade Mineira SMCC-LUÓ.

RÔMULO, Fontenele Cavalcante -análise de estabilidade de taludes de mineração por métodos do equilíbrio limite e tensão-deformação, 1997.

SARMA, S.K (1973). Stability analysis of embankments and slopes. Geotechnique, Vol 23. p 423-433.

SÊCO, Sérgio Luis Rodrigues (2009) - sobre a prospecção de diamantes em angola & formações de kimberlitos e de depósitos secundários, p. 24-25 e 28-29.

SEPE, Josiê e SALVADOR, Nemésio N. B. - impactos da mineração e conflitos pelo uso da água com as atividades agrícolas de pequeno porte (2018)

TERZAGHI, K. - Origin and Functions of Soil Mechanics - 1953.

TIMAKIN: Resultados das investigações de propriedades físicas-mecânicas das rochas do Kimberlito Camatchia. "2005"

TORRES, V. N. (2013) - Lavra Superficial ou a Céu Aberto. Goiás: Universidade Federal de Goiás – UFG.

VARNES, D. 1978. Slope Movement Types and Processes.

VÁSQUEZ A., Galdames, B. & Le-Feaux R. (1998). Apunte preliminar diseño y operaciones de minas a cielo abierto. Santiago, Universidad de Chile.

## ANEXOS

Tabela (1) – valores de **Jn** para o sistema Q.

<b>Condições de compartimentação do maciço</b>	<b>Valores de Jn</b>
Fracturas esparsas ou ausentes	0,5 – 1,0
Uma Família de fracturas	2
Uma Família, mais fracturas esparsas	3
Duas Famílias de fracturas	4
Duas Famílias, mais fracturas esparsas	6
Tres Famílias de fracturas	9
Tres Famílias, mais fracturas esparsas	12
Quatro ou mais famílias de fracturas	15
Rocha triturada (completamente fragmentada)	20

Tabela (2) – valores de **Jr** para o sistema de classificação Q.

<p><b>a- Fracturas sem deslocamento relativo. Contacto rocha-rocha entre as paredes das fracturas</b></p> <p><b>b- Fracturas com deslocamento relativo (menos de 10cm). Contacto rocha-rocha entre as paredes das fracturas</b></p>	
<b>Condições de rugosidade das paredes</b>	<b>Valores de Jr</b>
A – Fracturas não persistentes	4

B – Fracturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
C – Fracturas lisas, onduladas	2
D – Fracturas polidas, onduladas	1.5
E – Fracturas rugosas ou irregulares, planas	1.5
F – Fracturas lisas, planas	1
G – Fracturas polidas ou estriadas, planas	0.5
<b>c- Fracturas com deslocamento relativo. Não há contacto rocha-rocha entre as paredes das fracturas</b>	
H – Fraturas com minerais argilosos	1
I – Zonas esmagadas	1

Tabela (3) – valores de **Jw** para o sistema de classificação Q.

Condição de água	Jw	Pressão de água (kg/cm <sup>2</sup> )
A – Escavação a seco ou com pequena afluência de água(<51m)	1.0	<1
B – Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1.0-2.5
C – Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das descontinuidades	0.5	2.5-10
D – Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fracturas	0.33	2.5-10

E – Afluencia excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão) decaindo com o tempo	0.2-0.1	>10
F – Afluencia excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão) sem decaimento com o tempo	0.1-0.05	>10

Tabela (4) – valores de **Ja** para o sistema de classificação Q.

<b>a- Fracturas sem deslocamento relativo. Há contacto rocha-rocha entre as paredes das fracturas</b>	
<b>Condições de alteração das paredes</b>	<b>Valores de Ja</b>
A – Paredes duras, compactas, preenchimento impermeavel	0,75
B – Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\phi$ (25-30)	1
C – Paredes levemente alteradas, compaticulas arenosas e rocha desintegrada não argilosa $\phi$ (20-25)	2
D – Paredes com peliculas siltosa ou areno-argilosa $\phi$ (20-25)	3
E – Paredes com peliculas material mole ou com baixo angulo de atrito e pequenas quantidades de minerais expansivos $\phi$ (8-16)	4
<b>b- Fracturas com deslocamento relativo (menos de 10cm). Há contacto rocha-rocha entre as paredes das fracturas</b>	
F – Paredes com particulas de areia e rochas desintegradas sem argila $\phi$ (25-35)	4
G – Fracturas com preenchimento argiloso sobre consolidado (espessura < 5mm), $\phi$ (16-24)	6

H – Fracturas com preenchimento argiloso sobconsolidado (espessura < 5mm), $\phi$ (12-16)	8
I – Fracturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5mm), $\phi$ (12-16)	8 – 12
<b>g– Fracturas com deslocamento relativo. Não há contacto rocha-rocha entre as paredes das fracturas</b>	
J, K, L - Zonas com rochas trituradas ou esmagadas com argila (ver H, G, I. Para condições do material argiloso $\phi$ (6-24))	6–8 ; 8-12
M – Zonas siltosa ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila	5
N, O, P. Zonas ou bandas de argilas (ver g,h,i. Para condições do material argiloso $\phi$ (6-24) )	10–13; 13–20

Tabela (5) – valores de **SRF** para o sistema de classificação Q.

<b>a- Zonas alteradas</b>	
<b>Condições das tensões no maciço</b>	<b>SRF</b>
A - Ocorrência de muitas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer)	10
B - Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade $\geq$ 50m)	5
C - Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade $\geq$ 50m)	2,5
D - Múltiplas zonas esmagada de rochas competente	

sem argila (profundidade qualquer)	7,5
E - Zona esmsgada de rocha de rocha competente sem argila (profundidade $\geq 50\text{m}$ )	5
F - Zona esmsgada de rocha de rocha competente sem argila (profundidade $> 50\text{m}$ )	2,5
G - Fracturas abertas, fracturamento muito intenso (profundidade qualquer)	5
<b>b- Rochas competentes, problemas de tensões nas rochas</b>	
H - Tensões baixas proximas a superficie ( $\sigma_2/\sigma_1 < 200$ )	2,5
I – Tensões baixas, ( $\sigma_2/\sigma_1 = 200$ a 10)	1
J - Tensões altas ( $\sigma_2/\sigma_1 < 10$ a 5)	0.5 a 2
K - Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_2/\sigma_1 < 5$ a 2,5)	5 a 10
L - Explosões interna de rocha ( $\sigma_2/\sigma_1 < 2,5$ )	20
<b>c- Rochas incompetentes (compartamento plastico devido aos tipos de deformações)</b>	
M – Tensões moderadas	5 a 10
N – Tensões elevadas	10 a 20
<b>d- Rochas expansivas (actividade expansiva na presença de agua)</b>	
O – Pressão de expansão elevada	5 a 10
P – Pressão de expansão elevada	10 a 15

Fonte: Barton et al. 1974



Figura (1) – Erosão nos taludes da formação kalahari.



Figura (2) – Rompimento de taludes nas rochas vulcânicas sedimentares.



Figura (3) – Taludes formado pelos gnaisses alterados, cobrindo os blocos B1B2B5.



Figura (4) – Talude formado por gnaisses alterados, zona norte da mina.