



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

ELISIÁRIO JOSÉ CHILELA CAMOLACONGUE

Dimensionamento de sustimentos na transição  
de uma mina a céu aberto para subterrânea

Estudo de caso: **Mina de Catoca**

Luanda, 2025

ELISIÁRIO JOSÉ CHILELA CAMOLACONGUE

Dimensionamento de sustimentos na transição  
de uma mina a céu aberto para subterrânea

Estudo de caso: **Mina de Catoca**

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

Orientado por **MSc. José Dias**

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e colaboração de diversas pessoas e entidades, a quem expresso o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força, sabedoria e saúde, sem os quais nada teria sido possível. Sou grato por sua orientação ao longo de toda esta jornada, especialmente nos momentos de desafio e incerteza.

Gostaria também de agradecer ao meu orientador, Engenheiro MSc José Dias, pela orientação, disponibilidade e dedicação ao longo de todas as etapas deste trabalho e ao MSc Mboko Domingos pela paciência e conselhos que foram fundamentais para a concretização deste estudo.

Agradeço ainda à minha família e amigos pelo apoio incondicional, compreensão e motivação ao longo desta jornada. O vosso encorajamento foi essencial para que eu continuasse a seguir em frente.

Por fim, expresso a minha gratidão a todos os colegas, professores e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação e para a realização deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

Este trabalho propõe um dimensionamento de sustimentos para a transição de uma mina a céu aberto para uma mina subterrânea, com o objectivo de assegurar a estabilidade e a segurança operacional durante o processo. O estudo é desenvolvido com base nas condições geológicas e mineiras da Mina de Catoca, onde a exploração a céu aberto se torna inviável abaixo dos 600 metros de profundidade, por razões de segurança e eficiência. Os principais objectivos incluem a caracterização do maciço rochoso, a análise da sua estabilidade e o dimensionamento de sustimentos adequados com base em critérios geotécnicos, tendo em conta as exigências específicas do método de exploração a implementar, nomeadamente o método de abatimento controlado. Foram utilizados parâmetros como o Índice de Qualidade da Rocha (RQD) e o critério de resistência de Mohr-Coulomb. A solução proposta combina a utilização de parafusos de ancoragem e betão projectado, com vista a garantir a estabilidade do maciço rochoso durante a transição. O estudo baseia-se em dados recolhidos a partir de relatórios técnicos disponíveis nos sites oficiais da SM Catoca e considera as melhores práticas observadas em casos de referência, como as minas de Cullinan e Ekati, que realizaram com sucesso a transição para a exploração subterrânea. Conclui-se que a aplicação criteriosa dos princípios geotécnicos e das soluções de sustimento propostas, adaptadas às exigências do método de exploração, pode representar uma estratégia robusta para garantir a estabilidade do maciço, viabilizando, assim, a transição da mina.

**Palavras-chave:** Dimensionamento. Sustimentos. Exploração a céu aberto. Exploração subterrânea. Transição.

## ABSTRACT

This study proposes the design of supports for the transition from an open-pit mine to an underground mine, aiming to ensure stability and operational safety during the process. The study is based on the geological and mining conditions of the Catoca Mine, where open-pit mining becomes unfeasible below 600 meters in depth due to safety and efficiency concerns. The main objectives include characterizing the rock mass, analyzing its stability, and designing appropriate supports based on geotechnical criteria, considering the specific requirements of the mining method to be implemented, such as the controlled subsidence method. Parameters such as the Rock Quality Designation (RQD) and the Mohr-Coulomb strength criterion were used, in addition to methods such as Protodiakonov's. The proposed solution combines rock bolts and shotcrete to ensure the stability of the rock mass during the transition. The study relies on data collected from technical reports available on the official SM Catoca websites (referenced) and considers best practices observed in benchmark cases such as the Cullinan, Diavik, and Ekati mines (Canada), which successfully transitioned to underground mining. The conclusion is that the careful application of geotechnical principles and the proposed support solutions, tailored to the requirements of the mining method, can represent a robust strategy for ensuring the stability of the rock mass, thereby enabling the mine's transition.

**Keywords:** Design. Supports. Open-pit mining. Underground mining. Transition.

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Mina céu aberto de cobre, na Província Mineral Carajás, centro-leste do Pará...	15
Figura 2.2 - Mina subterrânea de cobre, Estado da Bahia - Brasil .....	16
Figura 2.3 - Elemento cúbico confinado no maciço rochoso a uma profundidade H .....	21
Figura 2.4 - Critério de rotura de Mohr-Coulomb.....	23
Figura 2.5 - Galeria horizontal de secção circular, revestida com betão projectado, Diavik - Canadá .....	24
Figura 2.6 - Câmara de abrigo de máquinas de grande porte, como britadores ou bombas....	25
Figura 2.7 – Ilustração de um poço vertical de acesso revestido com painéis metálicos .....	26
Figura 2.8 - Principais formas das aberturas em minas subterrâneas. (a) - Abertura de secção elíptica. (b) - Abertura de secção retangular/quadrada. (c) - Abertura de secção circular. (d) - Abertura retangular com teto em forma de abóbada .....	26
Figura 2.9 – Análise das tensões em uma galeria horizontal de secção elíptica segundo a direção YY' .....	27
Figura 2.10 - Comportamento da Tensão tangencial máxima e mínima ao longo da periferia da galeria.....	28
Figura 2.11 - Comportamento de tensões em torno de um poço circular.....	28
Figura 2.12 - Poço submetido a um campo de tensões geostáticas .....	29
Figura 2.13 - Componentes do Parafuso de Ancoragem.....	32
Figura 2.14 – Aplicação de parafusos de ancoragem, cabos e malhas de aço em zona com elevado índice de queda de blocos. ....	33
Figura 2.15 Chumbadores em padrão para o suporte de rochas fortemente fraturadas, que podem falhar por desagregação ou extrusão. O sombreamento representa uma zona de tensão compressiva, na qual o travamento entre os blocos. ....	33
Figura 2.16 Ilustra os parafusos de rocha de simples mecanismo, composto por uma barra de aço, placa de apoio e arruela.....	34
Figura 2.17 Ilustra a projecção de concreto na construção de um túnel subterrâneo .....	35
Figura 2.18 - Ilustra 1 saco de cimento Portland de fabrico nacional. ....	36
Figura 2.19 - Curvas granulométricas da brita e da areia .....	37
Figura 2.20 - Resistência à compressão do betão em termos da relação água-cimento. Proporções típicas de mistura para cimento Portland normal: 1 parte de cimento: 2 partes de areia: 4 partes de brita (gravilha).....	39

Figura 2.21 - Observa-se a cratera resultante da lavra a céu aberto da mina, com destaque para os bancos em espiral característicos da metodologia de exploração por bancadas .....	44
Figura 2.22 - Ilustra a lavra a céu aberto nas pipes Panda e Koala, no Canadá e que posteriormente passaram para operações subterrâneas .....	46
Figura 2.23 - Implementação de parafusos de ancoragem e redes ou malhas de aço de com auxílio de uma perfuradora de ancoragens .....	47
Figura 3.1 - Mapa de localização da mina de Catoca .....	48
Figura 3.2 - Geologia regional da área em estudo, excerto extraído da Carta Geológica de Angola .....	49
Figura 3.3 - Uma visão geral do Kimberlito de Catoca .....	52
Figura 3.4 - Parâmetros geométricos fundamentais da Mina .....	53
Figura 3.5 -Análise da relação Estéril/Minério da Mina de Catoca ao longo de 7 anos de exploração a céu aberto .....	54
Figura 3.6 - Representação dos custos operacionais da Mina de Catoca nos últimos 12 anos de operação por método de exploração a céu aberto .....	55
Figura 3.7 - Layout proposto para a infraestrutura subterrânea utilizando o método de abatimento controlado .....	57
Figura 3.8 – Planta do nível de transição em vista superior .....	57
Figura 3.9 - Configuração proposta para o poço principal, desenvolvido nas encaixantes - Gnaisse .....	58
Figura 3.10 - Esquema de transição com o pilar de separação entre os métodos de lavra a céu aberto e subterrânea .....	59
Figura 3.11 - Sistema combinando de sustimento de parafusos de ancoragem e betão projectado nas paredes da galeria .....	60
Figura 3.12 - Chumbador Swellex da Atlas Copco .....	61
Figura 4.1 - Apresenta as aplicações típicas para as galerias de produção com 4,25 m de largura e galerias de fundo de poço com 6,0 m de largura na futura mina de Catoca, explorada pelo método de abatimento controlado.....	69

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Coeficientes das condições de trabalho do betão para diferentes estados de consistências .....	38
Tabela 2.2 Resistência à compressão do betão (Norma Turca 500).....	40
Tabela 3.1 - família de descontinuidade no maciço de gnaisse.....	50
Tabela 3.2 - Valores de espaçamento e RQD por setor no gnaisse .....	50
Tabela 3.3 - Família de descontinuidade do Kimberlito .....	51
Tabela 3.4 - Índices geomecânicos e classificação dos maciços para o gnaisse e Kimberlito .	51
Tabela 3.5 .Propriedades Mecânicas dos maciços rochosos de acordo com RMR .....	52
Tabela 3.6 - Tipos de betão classificado por cubos .....	60
Tabela 4.1 – Observa-se o Critério de Mohr-Coulomb para análise do ponto de rotura do poço .....	63
Tabela 5.1 – Tensões de confinamento no maciço.....	71
Tabela 5.2 Tensões induzidas e tensões críticas na periferia do poço.....	72
Tabela 5.3 Valores da análise do critério de ruptura Hoek Brown.....	72
Tabela 5.4 Tensões iniciais no maciço rochoso .....	73
Tabela 5.5 Identificação das regiões críticas e Tensões Tangenciais máximas e mínimas.....	73
Tabela 5.6 Análise da Pressão total sobre as galerias pelo Modelo de Protodiakonov .....	73
Tabela 5.7 Verificação dos comprimentos dos parafusos de ancoragem .....	74
Tabela 5.8 Dosagem de constituintes de betão .....	75

## NOTAÇÃO

$b$	Espaçamento dos parafusos
$c$	Afastamento entre filas de parafusos
$d$	Diâmetro do parafuso
$H$	Profundidade
$h$	Altura da carga, altura do teto imediato, altura da secção transversal
$K$	Coeficiente para concentração volumétrica da mistura
$L_b$	Largura da galeria
$m_0$	Densidade dos parafusos
$n$	Fator de segurança
$P$	Pressão vertical
$q_t$	Carga do teto por unidade de comprimento
$R$	Reação, força
$R_{\max}$	Capacidade de carga do parafuso
$r$	Raio do poço
$t$	Espessura do revestimento
$V$	Volume, coeficiente de variação, velocidade da mistura
$\alpha$	Relação água-cimento em peso
$\gamma$	Peso específico
$\mu$	Coeficiente de atrito entre a rocha do teto e o aço do parafuso
$\sigma_c$	Resistência à compressão uniaxial
$\sigma_k$	Resistência à tração de rotura
$\sigma_n$	Tensão normal
$\sigma_{sf}$	Tensão admissível no aço
$\sigma_v$	Pressão do teto
$\sigma_h$	Pressão lateral
$\tau_s$	Tensão de cisalhamento
$\tau_{sf}$	Tensão de cisalhamento admissível
$\Phi$	Ângulo de atrito das rochas

## ÍNDICE

<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>11</b>
1.1. Problema .....	12
1.2. Causas .....	12
1.3. Consequências .....	12
1.4. Solução.....	12
1.5. Justificativa .....	12
1.6. Objetivos .....	12
1.7. Hipótese .....	13
1.8. Metodologia .....	13
1.9. Delimitação .....	13
1.10. Limitações .....	13
<b>Capítulo 2 - Enquadramento teórico .....</b>	<b>14</b>
2.1. Mineração: Conceitos e Métodos .....	14
2.1.1. Definição e importância da mineração .....	14
2.1.2. Modos de exploração: a céu aberto e subterrânea .....	14
2.2. Transição de minas a céu aberto para subterrâneas .....	16
2.2.1. Definição e desafios.....	16
2.2.2. Desafios técnicos e geotécnicos da transição .....	18
2.3. Maciço rochoso: comportamento e propriedades .....	18
2.3.1. Definição .....	18
2.3.2. Características do maciço rochoso .....	18
2.3.3. Tensões no maciço rochoso.....	19
2.3.4. Comportamento do maciço sob tensão.....	21
2.3.5. Critérios de ruptura de Mohr Coulomb .....	22
2.4. Aberturas em minas subterrâneas .....	24
2.4.1. Definição e tipos de aberturas .....	24
2.4.2. Formas das aberturas e sua influência na distribuição de tensões .....	26
2.5. Técnicas de Sustimentos .....	31
2.5.1. Definição e função dos sustimentos .....	31
2.5.2. Tipos de sustimentos .....	32
2.5.3. Dimensionamento dos sustimentos .....	40
2.6. Análise de casos reais de transição de lavra a céu aberto para subterrânea.....	44
2.6.1. Mina de Cullinan .....	44
2.6.2. Mina Ekati, Canadá .....	46

<b>Capítulo 3 – Estudo de Caso.....</b>	<b>48</b>
3.1.    Caracterização da Mina de Catoca.....	48
3.1.1.    Localização.....	48
3.1.2.    Ambiente Geológico e Geotécnico.....	49
3.1.3.    Classificações geomecânicas .....	51
3.2.    Condições técnicas e operacionais da Mina de Catoca.....	52
3.3.    Lavra a céu aberto de Catoca Vs Necessidade de Transição .....	53
3.4.    Método de Lavra Subterrânea – Método de abatimento controlado.....	55
3.5.    Proposta de Dimensionamento de Sustimentos .....	56
3.5.1.    Layout da mina subterrânea.....	56
3.5.2.    Esquema de transição .....	59
3.5.3.    Técnicas de sustimento.....	59
<b>Capítulo 4 - Análise de Resultados.....</b>	<b>62</b>
4.1.    Abertura do poço vertical de secção circular.....	62
4.1.1.    Tensões in situ .....	62
4.1.2.    Tensão de Corte .....	62
4.1.3.    Critério de Ruptura e Análise de estabilidade .....	63
4.2.    Abertura de galerias horizontais .....	64
4.2.1.    Tensões Iniciais .....	64
4.2.2.    Identificação de Regiões Críticas .....	64
4.2.3.    Avaliação da Condição de Estabilidade .....	65
4.3.    Dimensionamento dos parâmetros dos sustimentos .....	65
4.3.1.    Parafusos de ancoragem .....	65
4.3.2.    Revestimento de Betão projectado .....	67
<b>Capítulo 5 - Discussões de Resultados .....</b>	<b>71</b>
5.1.    Tensões na abertura do poço.....	71
5.1.1.    Tensões naturais .....	71
5.1.2.    Tensões induzidas e críticas .....	71
5.1.3.    Critério de ruptura e tensão de corte.....	72
5.2.    Tensões na abertura de galerias .....	72
5.2.1.    Identificação das regiões críticas .....	73
5.2.1.    Pressão total sobre as galerias .....	73
5.3.    Dimensionamento dos parâmetros de sustimentos .....	74
5.3.1.    Parafusos de Ancoragem .....	74
5.3.2.    Dimensionamento do revestimento monolítico do Poço e Galerias.....	75
<b>Conclusão .....</b>	<b>77</b>
<b>Recomendações .....</b>	<b>78</b>

## **Capítulo 1 - Introdução**

A mina de Catoca, localizada na província da Lunda Sul, é uma das maiores produtoras de diamantes do mundo, desempenhando um papel crucial na economia nacional e no mercado global. Contudo, com o esgotamento gradual das reservas a céu aberto, surge a necessidade de migração para operações subterrâneas, um processo que envolve desafios geotécnicos, operacionais e económicos. A transição exige não só uma avaliação detalhada das condições do maciço, como também a definição de sustimentos adequados para lidar com a complexidade geológica local.

Este estudo tem como principal objectivo dimensionar os sustimentos para a transição de lavra a céu aberto para subterrâneas na mina de Catoca, garantindo a continuidade das operações de forma segura e eficiente. Para tal, serão avaliadas as condições geotécnicas do maciço e propostos sustimentos adequados. A relevância deste trabalho estende-se não apenas à mina de Catoca, mas também a outras minas que enfrentam desafios semelhantes, contribuindo para o avanço da engenharia de minas e para a sustentabilidade do sector a longo prazo.

O estudo considera tanto o macroambiente – incluindo a economia global, regulamentações ambientais e inovações tecnológicas – como o microambiente, que abrange os recursos da Sociedade Mineira de Catoca, as condições geológicas locais e a gestão da transição. A metodologia inclui análise geotécnica, modelação numérica e revisão de casos similares, com o objectivo de propor soluções tecnicamente viáveis e economicamente sustentáveis.

## 1.1. Problema

Instabilidade do maciço rochoso durante a transição para exploração subterrânea

## 1.2. Causas

- (i) A complexidade geológica, caracterizada pela heterogeneidade do maciço e pela presença de descontinuidades estruturais;
- (ii) O aumento da profundidade da escavação, que intensifica as tensões in situ

## 1.3. Consequências

- **Técnicas:** Impactos na produtividade e eficiência da mina.
- **Económicas:** Aumento de custos operacionais.
- **Sociais:** Riscos à segurança dos trabalhadores.
- **Ambientais:** Impactos ambientais significativos.

## 1.4. Solução

Desenvolver uma metodologia de dimensionamento de sustimento

## 1.5. Justificativa

A escolha do tema surgiu da observação de desafios reais enfrentados por minas que atingem profundidades onde os métodos a céu aberto se tornam inviáveis, devido a limitações geológicas e operacionais.

## 1.6. Objetivos

- **Geral:** Propor uma metodologia para o dimensionamento dos sustimentos que viabilize a transição para métodos subterrâneos.
- **Específicos**
  - Caracterizar o maciço rochoso através de parâmetros geomecânicos;
  - Analisar a estabilidade das escavações, utilizando critérios de ruptura;
  - Dimensionar os sustimentos, tendo em conta as condições geológicas e operacionais específicas da mina.

### **1.7. Hipótese**

Se o comportamento do maciço rochoso durante a transição for analisado com precisão, recorrendo a critérios geomecânicos, como o Índice de Qualidade da Rocha, Mohr-Coulomb e as propriedades mecânicas e físicas das rochas, então será possível dimensionar sustimentos capazes de suportar as tensões induzidas.

### **1.8. Metodologia**

A metodologia de pesquisa adoptada neste trabalho segue o método de Investigação Científica Baseada no Design (*Design Science Research*), que visa a solução de problemas práticos através da criação e avaliação de artefactos. Este método foi escolhido devido à sua abordagem prática, que se alinha com o objectivo de resolver questões reais ou melhorar processos existentes.

### **1.9. Delimitação**

O âmbito deste trabalho é propor um dimensionamento de sustimentos e não abrangendo a implementação, monitorização, análise da viabilidade económica dos métodos propostos, nem a análise técnica detalhada dos processos, impactos sociais, ambientais ou da viabilidade económica dessa transição.

### **1.10. Limitações**

O presente estudo foi limitado pela ausência de trabalho de campo, o que impossibilitou a validação directa dos métodos propostos face às condições reais da mina em análise. A investigação baseou-se em relatórios disponibilizados pela empresa, muitos dos quais desactualizados ou com dados incompletos, o que compromete, em certa medida, a precisão e aplicabilidade dos resultados. Estas limitações devem ser consideradas na interpretação das conclusões e reforçam a necessidade de estudos futuros com base em dados actualizados e observações *in situ*.

## Capítulo 2 - Enquadramento teórico

### 2.1. Mineração: Conceitos e Métodos

#### 2.1.1. Definição e importância da mineração

A mineração é uma actividade económica que consiste na pesquisa, exploração, extracção e beneficiamento de recursos minerais presentes na crosta terrestre. Estes recursos podem ser metálicos (como ferro, cobre e ouro), não metálicos (como calcário e fosfato) ou energéticos (como carvão e urânio). A mineração é uma das bases do desenvolvimento industrial e tecnológico, fornecendo matérias-primas essenciais para sectores como a construção civil, metalurgia, energia e tecnologia. A importância da mineração para a sociedade moderna é inegável. Para além de ser um pilar da economia global, ela contribui para a geração de empregos, o desenvolvimento de infraestruturas e a produção de bens de consumo, sendo fundamental para a cadeia produtiva de diversos sectores, desde a fabricação de equipamentos electrónicos até à construção de edifícios e estradas. No entanto, a actividade mineira também traz desafios, como impactos ambientais e a necessidade de gestão sustentável dos recursos naturais.

#### 2.1.2. Modos de exploração: a céu aberto e subterrânea

Os modos de exploração são classificados, principalmente, em duas categorias: exploração a céu aberto e exploração subterrânea. A escolha entre estes depende de factores como a localização do depósito mineral, as características geológicas, a viabilidade económica e os impactos ambientais.

##### a. Exploração a céu aberto

A exploração a céu aberto, é utilizada quando o depósito mineral se encontra próximo da superfície. Este método é caracterizado por operações de grande escala, com o uso de equipamentos de grande porte, como escavadoras, camiões e britadores. Entre os métodos mais comuns encontram-se as minas em bancada e taludes, a lavra por tiras (*strip mining*) e a lavra a céu aberto em encostas (*open-pit mining*). Observe a Figura abaixo de uma mina a céu aberto pelo método de bancadas e taludes.

Figura 2.1 – Mina céu aberto de cobre, na Província Mineral Carajás, centro-leste do Pará



Fonte: <https://abori.com.br/tecnologia-e-engenharia/>, 2025

### ➤ Vantagens e Desvantagens da exploração a céu aberto

Conforme estudado na disciplina de Operações Mineiras 1, com o professor Eng.<sup>º</sup> António Alexandre, a exploração a céu aberto oferece vantagens como custos operacionais mais baixos, maior produtividade devido ao uso de equipamentos grandes e maior segurança, já que os riscos de desmoronamentos e gases tóxicos são reduzidos. Contudo, apresenta desvantagens significativas, como os impactos ambientais, incluindo a remoção de solo e vegetação, e a limitação da profundidade do depósito, que torna os custos de remoção do estéril proibitivos à medida que o minério se aprofunda.

#### b. Exploração subterrânea

A exploração subterrânea é utilizada quando o depósito mineral se encontra a profundidades que inviabilizam a extração a céu aberto. Este método envolve a abertura de túneis, galerias e poços para aceder ao minério. Entre os métodos mais utilizados encontram-se a lavra por câmaras e pilares (*room and pillar*), a lavra por subníveis (*sublevel stoping*) e a lavra por corte e enchimento (*cut and fill*).

Figura 2.2 - Mina subterrânea de cobre, Estado da Bahia - Brasil



Fonte: <https://mineracaosustentavel.org.br/mineracao-subterranea/> [26 de março de 2025]

### ➤ Vantagens e Desvantagens da exploração subterrânea

As principais vantagens da exploração subterrânea incluem o menor impacto ambiental na superfície, pois a maior parte da operação ocorre abaixo do solo e o acesso a depósitos profundos, que não seriam economicamente viáveis por métodos de superfície. Por outro lado, as desvantagens incluem os custos operacionais mais elevados, devido à necessidade de ventilação, sustimento e equipamentos especializados e os riscos maiores de segurança, como desmoronamentos e exposição a gases tóxicos.

## 2.2. Transição de minas a céu aberto para subterrâneas

### 2.2.1. Definição e desafios

A transição de minas a céu aberto para subterrâneas é um processo estratégico na indústria mineira que ocorre quando a exploração de um depósito mineral superficial se torna inviável, seja pelo esgotamento do minério próximo da superfície ou por questões técnicas, económicas e de segurança. Esta transição envolve a mudança do método de lavra a céu aberto para métodos subterrâneos, que acedem ao minério através de túneis, galerias e poços.

### O que é a transição?

A transição é um processo planeado e gradual que inclui:

- a. **Avaliação técnica e econômica:** análise da viabilidade de continuar a operação em profundidade, considerando custos, produtividade e segurança.
- b. **Projeto geotécnico e de sustimento:** dimensionamento das estruturas de suporte para garantir a estabilidade das escavações subterrâneas, especialmente em áreas afetadas pela lavra anterior.
- c. **Preparação da infraestrutura:** construção de acessos subterrâneos, sistemas de ventilação, drenagem e transporte de minério.
- d. **Descomissionamento parcial da mina a céu aberto:** encerramento controlado das operações de superfície, incluindo a recuperação ambiental da área.

### **Por que a transição ocorre?**

A transição ocorre devido a factores técnicos, económicos e operacionais, entre os quais se destacam:

- i. **Esgotamento do minério superficial:** À medida que o minério próximo da superfície é extraído, a relação estéril/minério aumenta, tornando a lavra a céu aberto economicamente inviável.
- ii. **Aumento dos custos operacionais:** Em minas a céu aberto, os custos de remoção do estéril crescem exponencialmente com a profundidade, ultrapassando os benefícios da extração.
- iii. **Restrições ambientais e sociais:** A exploração a céu aberto pode causar impactos ambientais significativos, como alteração da paisagem, geração de poeiras e ruído, bem como a remoção da vegetação.
- iv. **Segurança operacional:** Em grandes profundidades, a exploração a céu aberto pode apresentar riscos geotécnicos, como deslizamentos de taludes e instabilidade das paredes.
- v. **Continuidade da operação:** Em muitos casos, a transição é a única forma de prolongar a vida útil de uma mina, permitindo o aproveitamento de recursos minerais que não seriam acessíveis por métodos de superfície. Isto é particularmente relevante em depósitos de alto valor, como metais preciosos ou minerais estratégicos.

### **2.2.2. Desafios técnicos e geotécnicos da transição**

A transição envolve uma série de desafios técnicos e geotécnicos. Abaixo, detalham-se os principais desafios enfrentados nesse processo:

- Alteração do campo de tensões
- Estabilidade de taludes e paredes da mina a céu aberto
- Dimensionamento dos sustimentos
- Interação entre lavra a céu aberto e subterrânea
- Drenagem e gestão de água
- Ventilação e qualidade do ar
- Impactos ambientais e recuperação da área
- Custos e viabilidade económica
- Adaptação da infraestrutura existente

### **2.3. Maciço rochoso: comportamento e propriedades**

#### **2.3.1. Definição**

O maciço rochoso é o termo utilizado para descrever o conjunto de rochas que compõem a litosfera numa determinada área, incluindo as suas propriedades físicas, mecânicas e estruturais. Ele é o principal meio onde são realizadas as escavações e construções na exploração subterrânea e a céu aberto. O comportamento do maciço rochoso é fundamental para o planeamento e execução de projectos de engenharia, pois influencia directamente a estabilidade das escavações, a escolha dos métodos de lavra e o dimensionamento dos sustimentos.

#### **2.3.2. Características do maciço rochoso**

As principais características que definem o maciço rochoso e influenciam seu comportamento são:

##### **i. Propriedades das rochas intactas:**

- **Resistência à compressão:** capacidade da rocha intacta de suportar cargas sem fraturar. É um dos parâmetros mais importantes para avaliar a estabilidade de escavações.
- **Módulo de elasticidade:** medida da rigidez da rocha, indicando como ela se deforma sob tensão.

- **Resistência ao cisalhamento:** capacidade da rocha de resistir a forças que tendem a causar deslizamentos internos.
  - **Porosidade e permeabilidade:** indicam a presença de vazios e a capacidade da rocha de permitir o fluxo de fluidos, como água ou gases.
- ii. **Descontinuidades:**
- **Fraturas e juntas:** planos de fraqueza que dividem o maciço rochoso em blocos. Podem ser naturais ou induzidas.
  - **Falhas:** fraturas com movimento relativo entre os blocos, que podem criar zonas de fragilidade no maciço.
  - **Foliações e estratificação:** estruturas presentes em rochas metamórficas e sedimentares, respectivamente, que influenciam a anisotropia do maciço.
- iii. **Grau de fraturamento:** O maciço rochoso pode variar de altamente fraturado (com muitas descontinuidades) a praticamente intacto. O grau de fraturamento afeta diretamente a estabilidade das escavações, pois descontinuidades atuam como planos preferenciais para deslizamentos ou colapsos.
- iv. **Estado de tensões:** O maciço rochoso está sujeito a tensões naturais (geostáticas) e tensões induzidas por actividades humanas, como a mineração. A distribuição dessas tensões influencia o comportamento do maciço durante a escavação.
- v. **Anisotropia:** O maciço rochoso frequentemente apresenta propriedades que variam conforme a direção, devido à presença de descontinuidades ou estruturas geológicas. Essa anisotropia deve ser considerada no planeamento de escavações e sustimentos.

### 2.3.3. Tensões no maciço rochoso

#### a. Tensões naturais (primárias)

As tensões no maciço rochoso são forças internas que influenciam o comportamento mecânico das rochas e a estabilidade das escavações. Elas podem ser classificadas em tensões naturais (primárias), que existem antes de qualquer intervenção humana e resultam de processos geológicos ao longo do tempo, e tensões induzidas (secundárias), que surgem devido a atividades como escavações ou mineração.

### b. Tensões induzidas pela escavação

As tensões induzidas, ou tensões secundárias, surgem no maciço rochoso devido a intervenções humanas, como escavações, mineração ou construção de túneis. Elas alteram o campo de tensões naturais preexistente, podendo causar redistribuição de tensões, deformações e instabilidades no maciço. Compreender essas tensões é essencial para o planeamento e execução de projectos de engenharia, especialmente em exploração subterrânea.

#### ➤ Distribuição de tensões e Zonas de Influência

Quando uma escavação é realizada, cria uma cavidade que altera o equilíbrio de tensões no maciço rochoso, resultando em redistribuição das tensões, com concentrações em algumas áreas e alívio em outras. Ao redor de uma escavação, podem ser identificadas três zonas principais de influência das tensões induzidas:

- ✓ **Zona de alívio de tensão:** Localizada nas proximidades das paredes da escavação, onde a remoção do material rochoso reduz as tensões normais. Essa zona é caracterizada por tensões de tração ou baixas tensões de compressão, o que pode levar à formação de fraturas ou ao deslocamento de blocos de rocha.
- ✓ **Zona de concentração de tensão:** Situada além da zona de alívio, onde as tensões são redistribuídas e aumentadas. A magnitude da concentração de tensão depende da geometria da escavação e das propriedades do maciço rochoso.
- ✓ **Zona de tensão remota:** Localizada a uma distância maior da escavação, onde as tensões induzidas são insignificantes e o campo de tensões permanece praticamente inalterado.

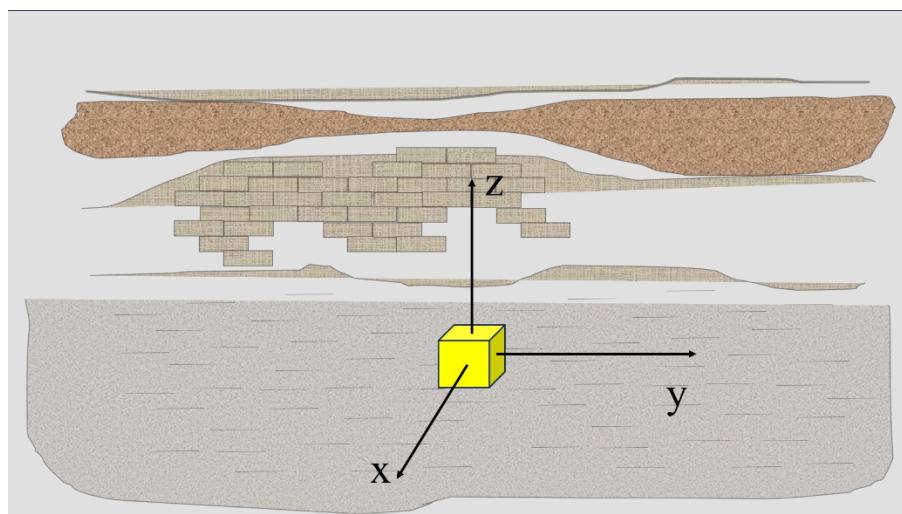
#### ➤ Efeitos das tensões induzidas

A redistribuição de tensões pode causar deformações nas paredes da escavação, como fechamento ou expansão do túnel. Tensões elevadas podem exceder a resistência da rocha, gerando fraturas ou colapsos. Em minas profundas, a liberação de energia acumulada pode provocar explosões de rocha, representando risco de segurança. Já em minas a céu aberto, as tensões induzidas podem afetar a estabilidade dos taludes, aumentando o risco de deslizamentos.

### 2.3.4. Comportamento do maciço sob tensão

O estudo do comportamento das rochas em mineração e engenharia civil geralmente baseia-se em hipóteses que simplificam as condições reais, como a suposição de que as rochas se comportam de forma homogénea ou que modelos elásticos ou plásticos são aplicáveis em certas situações. Na Figura 2.3, observa-se em terrenos contínuos, homogéneos e isótropos, o elemento cúbico confinado sob compressão isotrópica, com tensões iguais nas direcções x e y, devido à simetria. Isso ocorre quando há pressão uniforme nas três direcções. Nesse caso, as deformações em x e y são nulas, e a deformação em x ( $\epsilon_x$ ) é influenciada pela tensão na direcção z, criando uma relação directa entre as tensões e as deformações.

Figura 2.3 - Elemento cúbico confinado no maciço rochoso a uma profundidade H



Fonte: Apontamentos de Operações Mineiras 3 (2022)

Conforme ensinado pelo professor Eng. Augusto Paulino na disciplina de Operações Mineiras III (2023), as tensões verticais ( $P$ ) são geradas pelo peso das camadas de rocha suprajacentes, sendo a tensão vertical ( $P$ ) também conhecida como pressão litostática ou de sobrecarga. Ela resulta do peso das camadas de rochas acima.

$$P = \gamma \cdot H \quad (2.1)$$

**Onde:**  $\gamma$  é o peso específico da rocha (em  $\text{kg/m}^3$ );  $H$  é a profundidade (em metros);  $v$  é o coeficiente de Poisson do material.

E as **Tensões horizontais ( $Q$ )** atuam em direções perpendiculares à tensão vertical. O coeficiente de tensão lateral ( $\mu$ ), conforme descrito pela teoria de Mohr-Coulomb, relaciona as tensões horizontais e verticais em materiais rochosos e é expresso pela fórmula:

$$\mu = \frac{Q}{P} \quad (2.2)$$

A relação entre ( $\mu$ ) e ( $\nu$ ) para um material elástico, homogêneo e isotrópico é:

$$\mu = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2.3)$$

Com base na relação dada pela Eq. (2.2), as **tensões horizontais ( $Q$ )** podem ser definidas colocando-as em evidência:

$$Q = \mu \cdot P \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot P \quad (2.5)$$

#### a. Tipos de comportamento sob tensão

O maciço rochoso pode exibir diferentes tipos de comportamento sob tensão, dependendo das condições de carregamento e das propriedades do material:

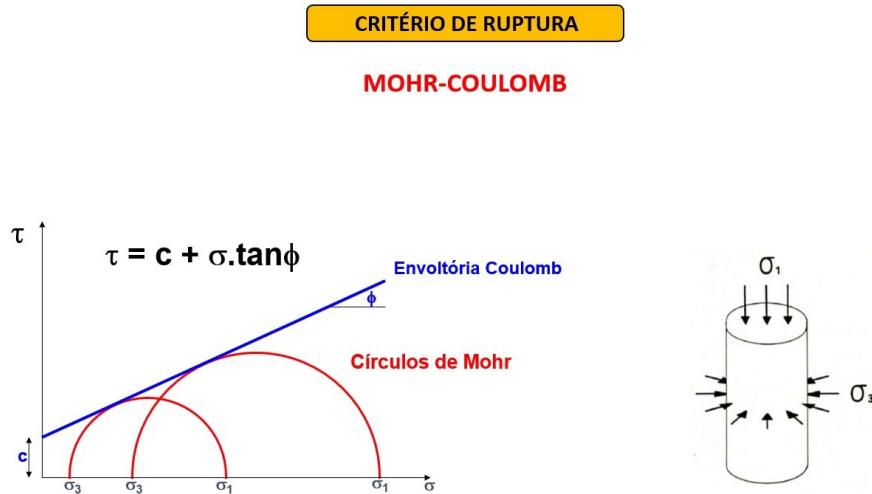
- **Comportamento elástico:** Em baixos níveis de tensão, o maciço deforma-se proporcionalmente à tensão aplicada e retornando à sua forma original quando a tensão é removida.
- **Comportamento plástico:** Em tensões mais elevadas, o maciço rochoso, deforma-se permanentemente sem retornar à sua forma original. Esse comportamento é comum em rochas mais fracas ou em maciços altamente fraturados.

#### 2.3.5. Critérios de ruptura de Mohr Coulomb

Assumindo,  $c$  – Coesão da rocha;  $\phi$  - Ângulo de atrito interno;  $\sigma_n$  - é a tensão normal que atua no plano de ruptura. A resistência ao corte é dada por:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (2.6)$$

Figura 2.4 - Critério de rotura de Mohr-Coulomb



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=fFiMhCTPIHY>, 2025

No critério de Mohr-Coulomb, a tensão normal ( $\sigma_n$ ) é a tensão que atua perpendicularmente ao plano de ruptura. Para um poço vertical, o plano de ruptura é influenciado pelas tensões principais, que são, respectivamente, a tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ) e a tensão radial ( $\sigma_r$ ). A tensão normal  $\sigma_n$  no plano de ruptura pode ser calculada usando a seguinte relação:

$$\sigma_n = 2 \cdot Q \cdot \cos^2 \theta \quad (2.7)$$

**Onde:**  $Q$  - é a Pressão horizontal ou Pressão de confinamento;  $\theta$  - é o ângulo entre o plano de ruptura e a direção da tensão tangencial máxima.

O ângulo ( $\theta$ ) é o ângulo entre o plano de ruptura e a direção da tensão tangencial máxima ( $\sigma_\theta$ ). No critério de Mohr-Coulomb, o plano de ruptura tende a se formar em um ângulo específico em relação à tensão tangencial máxima, dado por:

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (2.8)$$

**Onde:**  $\phi$  - é o ângulo de atrito interno do material.

## 2.4. Aberturas em minas subterrâneas

### 2.4.1. Definição e tipos de aberturas

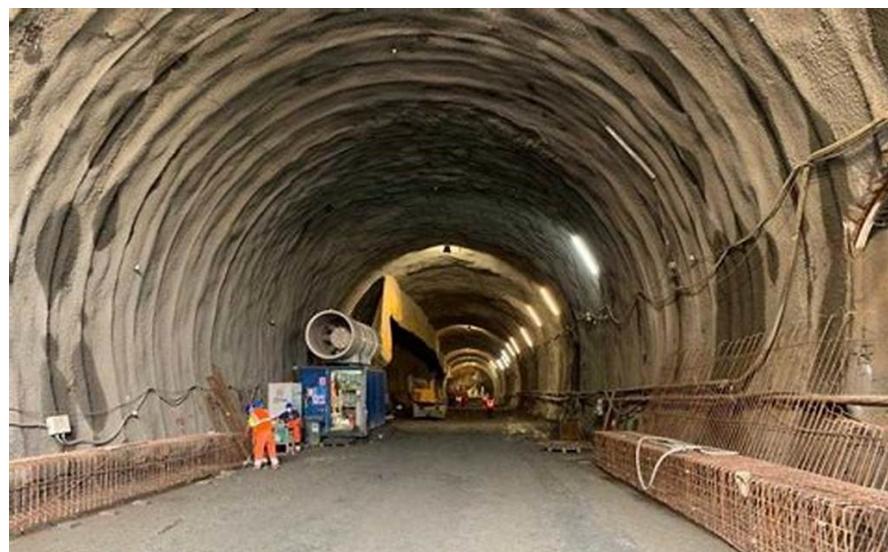
As aberturas em minas subterrâneas são estruturas escavadas no maciço rochoso para permitir acesso, ventilação, transporte de minério e estéril, e execução de actividades de lavra. Elas são projetadas considerando a geologia local, as tensões no maciço, o método de lavra e os requisitos operacionais. Os principais tipos de aberturas são galerias, câmaras e poços, cada um com funções e características específicas, conforme lecionado pelo Professor Eng.<sup>º</sup> José Dias na disciplina de Técnicas de Exploração Subterrânea.

#### ➤ Tipos de aberturas

##### a) Galerias

Passagens horizontais ou inclinadas escavadas no maciço rochoso, com secção transversal geralmente rectangular ou em arco, cuja largura e altura variam conforme a função e o equipamento. Elas exigem sistemas de suporte, como parafusos de ancoragem, revestimento de betão ou metálico. Dentre as funções das galerias, destacam-se: Galerias de acesso, de transporte e de ventilação

Figura 2.5 - Galeria horizontal de secção circular, revestida com betão projectado, Diavik - Canadá

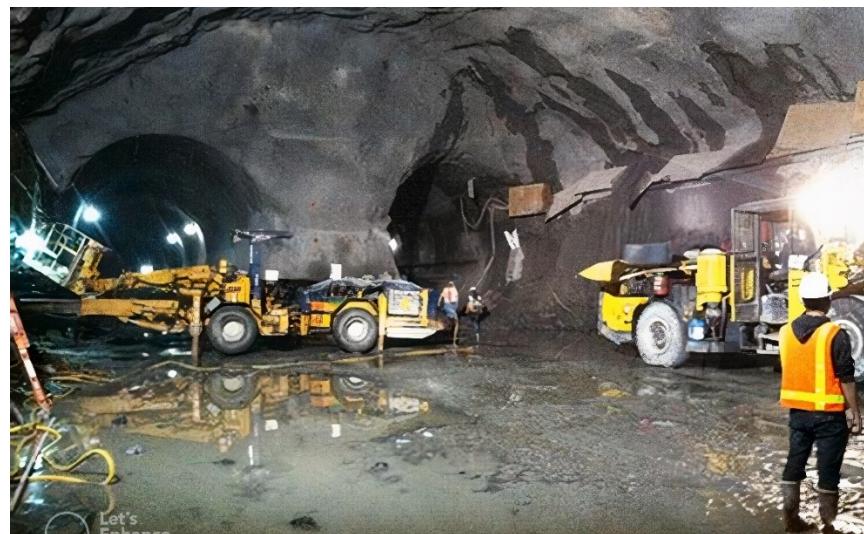


Fonte: <https://clubferoviar.ro/lucian-bode-la-tunelul-bata/>, 2025

### b) Câmaras

São grandes aberturas subterrâneas escavadas para actividades específicas, de tamanho variável, dependendo da aplicação (podem atingir dezenas de metros de largura e altura). Podem ser classificadas quanto a sua função: Câmaras de lavra, de equipamentos e de armazenamento. A Figura abaixo apresenta uma câmara cuja função é de parqueamento de máquinas.

Figura 2.6 - Câmara de abrigo de máquinas de grande porte, como britadores ou bombas



Fonte: <https://tectonicengineering.com/project/mta-east-side-access-conveyor-system/>, 2025

### c) Poços

Aberturas verticais ou inclinadas que conectam a superfície aos níveis subterrâneos da mina, conforme se observa na Figura 2.7. Podem ser de secção transversal circular ou rectangular e profundidade variável, podendo atingir centenas ou milhares de metros. Requerem revestimento (betão ou aço) e sistemas de suporte para garantir a estabilidade, podendo ser categorizadas em:

- Poços de acesso.
- Poços de transporte de minério
- Poços de ventilação

Figura 2.7 – Ilustração de um poço vertical de acesso revestido com painéis metálicos

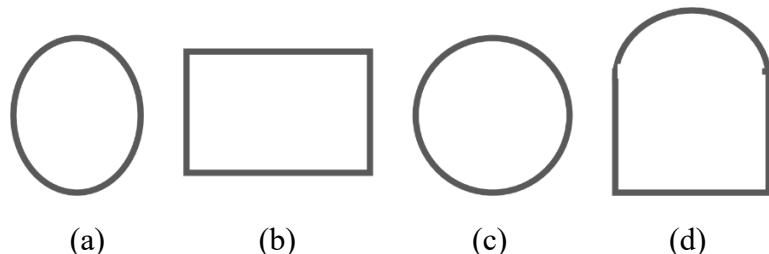


Fonte: <http://www.yamamoto8810.com/archives/>, 2025

#### 2.4.2. Formas das aberturas e sua influência na distribuição de tensões

A forma das aberturas em minas subterrâneas tem um impacto significativo na distribuição de tensões à volta dessas estruturas. A geometria da abertura influencia directamente a magnitude e a localização das concentrações de tensão, o que, por sua vez, afecta a estabilidade do maciço rochoso e a necessidade de sistemas de suporte.

Figura 2.8 - Principais formas das aberturas em minas subterrâneas. (a) - Abertura de secção elíptica. (b) - Abertura de secção rectangular/quadrada. (c) - Abertura de secção circular. (d) - Abertura retangular com teto em forma de abóbada



Fonte: Autor, 2025

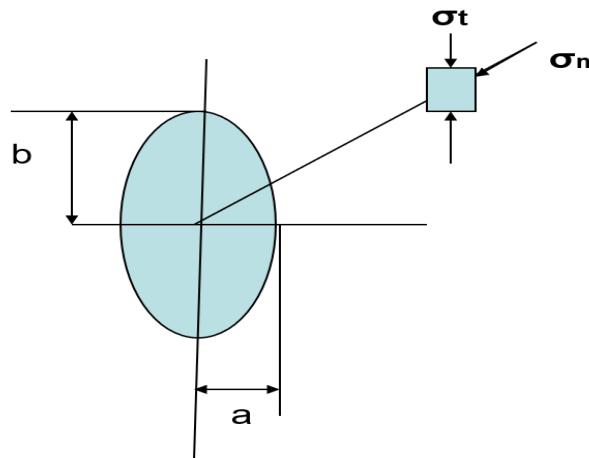
### 1) Abertura de Galeria horizontal de secção elíptica segundo a direção Y

Após a abertura da galeria (Figura 2.9), novas tensões normais ( $\sigma_n$ ) e tangenciais ( $\sigma_\theta$ ) surgem na periferia da cavidade.  $\sigma_n = 0$  na periferia da galeria, o que significa que as tensões normais ao longo da periferia da galeria se anulam. A tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ), que é responsável pela deformação tangencial e pode ser associada ao corte, é dada por:

$$\sigma_\theta = (P + Q) - \frac{(a^2 \sin^2 \theta - b^2 \sin^2 \theta)}{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \quad (2.9)$$

**Onde:**  $a$  e  $b$  são os semi-eixos da elipse (com  $a$  sendo o eixo maior e  $b$  o eixo menor);  $\theta$  é o ângulo polar, que varia ao longo da periferia da galeria (de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ );  $P$  e  $Q$  são as tensões verticais e horizontais iniciais, respectivamente.

Figura 2.9 – Análise das tensões em uma galeria horizontal de secção elíptica segundo a direção YY'



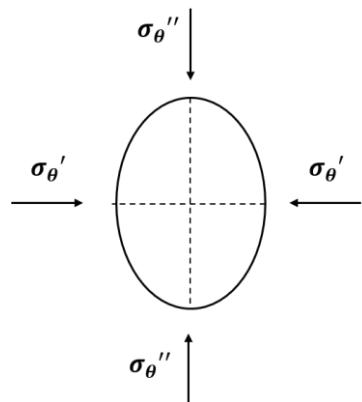
Fonte: Apontamentos de Operações mineira III, 2022

A tensão tangencial  $\sigma_\theta$  apresenta um comportamento não uniforme ao longo da periferia da galeria. Os valores máximos e mínimos de  $\sigma_\theta$  ocorrem nos seguintes pontos, conforme a Figura.

- Os Máximos  $\sigma_\theta'$  ocorrem em  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$ , nas extremidades do eixo menor da elipse, onde a curvatura é menos pronunciada. Nesses pontos, as tensões iniciais  $P$  e  $Q$  geram tensões tangenciais elevadas, aumentando o risco de falhas ou fraturas.

$$\sigma_\theta' = (P - Q) + 2 \frac{a}{b} \cdot P \quad (2.10)$$

Figura 2.10 - Comportamento da Tensão tangencial máxima e mínima ao longo da periferia da galeria



Fonte: Autor, 2025

- Os mínimos  $\sigma_\theta''$ , ocorrem em  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 270^\circ$ , nas extremidades do eixo maior da elipse, onde a curvatura é maior.

$$\sigma_\theta'' = (Q - P) + 2 \frac{a}{b} \cdot P \quad (2.11)$$

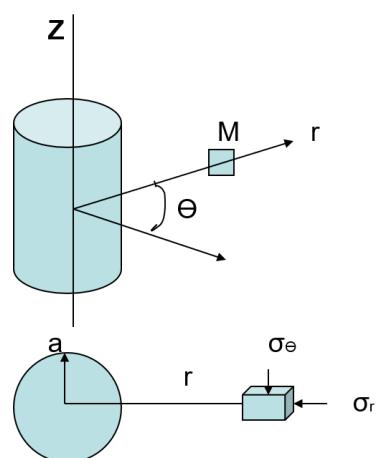
A condição de estabilidade máxima na galeria ocorre quando:

$$\sigma_\theta' = \sigma_\theta'' \quad (2.12)$$

## 2) Abertura de um Poço de secção circular

Observe a Figura abaixo:

Figura 2.11 - Comportamento de tensões em torno de um poço circular



Fonte: Apontamentos de Operações mineiras 3

A análise refere-se ao comportamento das tensões em torno de um poço circular de raio  $a$  (Figura 2.12), utilizando coordenadas cilíndricas. Governada pela teoria da elasticidade, esta distribuição de tensões é fundamental para compreender a estabilidade à volta do poço.

As tensões principais atuam em três direções:

- $\sigma_r$ : tensão radial (na direção do raio do poço),
- $\sigma_\theta$ : tensão tangencial ou circunferencial (na direção angular  $\theta$ ),
- $\sigma_z$ : tensão axial (ao longo da profundidade do poço).

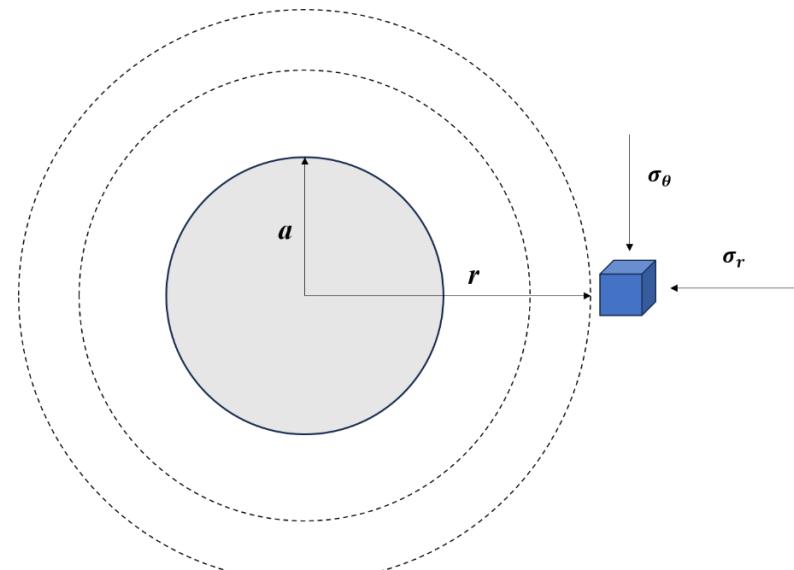
Para um poço circular, a distribuição das tensões radiais ( $\sigma_r$ ) e tangenciais ( $\sigma_\theta$ ) pode ser representada pelas equações fornecidas:

$$\sigma_r = Q \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\sigma_\theta = Q \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.14)$$

**Onde:**  $Q$  é a tensão de confinamento no plano  $r\theta$ ;  $P = \sigma_z$  é a tensão axial constante ao longo do comprimento do poço;  $a$  é o raio do poço;  $r$  é a distância radial a partir do centro do poço.

Figura 2.12 - Poço submetido a um campo de tensões geostáticas



Fonte: Autor, 2025

A presença do poço altera o estado de tensões na rocha, com **alívio radial** na parede e **aumento tangencial**, o que é crítico para avaliação de estabilidade. Em regiões distantes, o efeito do poço torna-se desprezível

### ➤ Tensões de Corte do Poço

No **limite periférico** ( $r = a$ ), o elemento  $M$  estará sujeito a tensões de corte que resultam da diferença entre as tensões tangencial  $\sigma_\theta$  e radial  $\sigma_r$ . A tensão de corte  $\tau$  pode ser expressa como:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \quad (2.15)$$

No limite ( $r = a$ ), isso resulta em:

$$\sigma_c = \frac{2Q - 0}{2} = Q \quad (2.16)$$

Assim, a tensão de corte  $\tau$  no contorno do poço é igual a  $Q$ , ou seja, a tensão de confinamento.

A **rotura de um poço cilíndrico** é atribuída às tensões de corte  $\sigma_c$  que excedem a resistência ao corte ( $\tau$ ).

### ➤ Medidas para garantir a estabilidade

Para garantir a estabilidade de aberturas subterrâneas, são adotadas diversas medidas, incluindo:

- ✓ Escolha da forma e orientação da abertura para minimizar concentrações de tensão e Dimensionamento de sistemas de suporte com base nas propriedades do maciço e nas tensões esperadas.
- ✓ Instalação de sistemas de drenagem para reduzir a pressão da água e evitar infiltrações.
- ✓ Implementação de sistemas de monitoramento para detectar deformações, fraturas ou outros sinais de instabilidade.
- ✓ Uso de técnicas de escavação que minimizem danos ao maciço rochoso, como explosões controladas ou escavação mecânica.

## 2.5. Técnicas de Sustimentos

### 2.5.1. Definição e função dos sustimentos

Sustimentos são estruturas e técnicas utilizadas para garantir a estabilidade de aberturas subterrâneas. Têm como principal função suportar as cargas impostas pelo maciço rochoso, prevenir desmoronamentos e garantir a segurança das operações de mineração. Podem ser classificados em dois tipos principais:

- **Sustimento activo:** Sistemas que aplicam forças activas para estabilizar o maciço rochoso, como parafusos de ancoragem e tirantes. Eles actuam antes que ocorram deformações significativas.
- **Sustimento passivo:** Sistemas que fornecem suporte após a ocorrência de deformações, como betão projetado, revestimento metálico e grades de aço. Eles reagem às cargas impostas pelo maciço.

Os sustimentos desempenham funções críticas em minas subterrâneas, incluindo a estabilização do maciço rochoso, o controlo de deformações, a protecção contra impactos dinâmicos, a melhoria das condições de trabalho e o prolongamento da vida útil da abertura.

#### ➤ Fatores que influenciam a escolha do sistema de sustimento

A seleção do sistema de sustimento em obras subterrâneas (como túneis, galerias ou minas) realmente depende de factores fundamentais listados abaixo e devem ser considerados de forma integrada para garantir segurança, eficiência e custo-efetividade na obra.

- **Propriedades do maciço rochoso:** Resistência, fraturamento, alteração e anisotropias da rocha influenciam diretamente no tipo de sustimento necessário.
- **Estado de tensões:** Tensões in situ e tensões induzidas pela escavação afetam a estabilidade e a escolha do suporte.
- **Geometria da abertura:** O tamanho, a forma e a orientação da abertura determinam o esforço sobre o sustimento.
- **Requisitos operacionais:** Como o tempo de vida útil da obra, a velocidade de escavação e o acesso para equipamentos e pessoas.
- **Condições ambientais:** Presença de água, variações de temperatura e fatores químicos que podem degradar o sustimento.

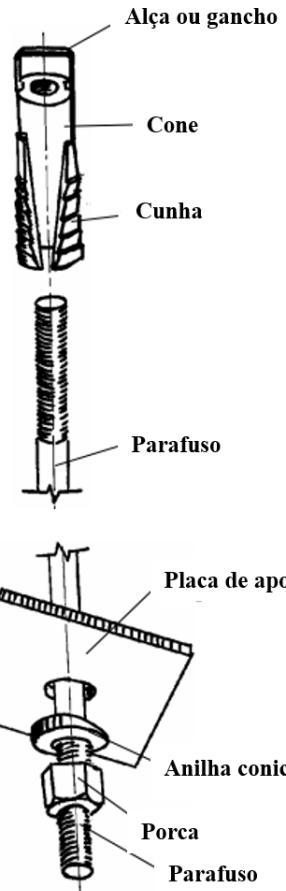
### 2.5.2. Tipos de sustimentos

#### a) Parafusos de ancoragem

Os **parafusos de ancoragem** (*rock bolts*) são um dos sustimentos mais utilizados em exploração subterrânea e engenharia geotécnica. Consistem em barras de aço instaladas em furos perfurados no maciço rochoso, com o objectivo de reforçar a rocha, aumentar a sua resistência ao cisalhamento e prevenir o deslocamento de blocos. Um parafuso de rocha típico consiste nos seguintes componentes:

- **Parafuso:** A parte principal do parafuso, que pode ser lisa ou rosada, dependendo do tipo de ancoragem.
- **Placa de apoio:** Uma placa metálica instalada na superfície da rocha para distribuir a carga do parafuso.
- **Porca e arruela:** Utilizadas para tensionar o parafuso e garantir que ele aplique uma força de compressão no maciço rochoso.
- **Sistema de ancoragem:** Mecanismo que fixa o parafuso no furo, podendo ser mecânico (expansão), resinado ou químico.

Figura 2.13 - Componentes do Parafuso de Ancoragem



Fonte: Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F., 1995, p. 163

#### ➤ Vantagens e Desvantagens

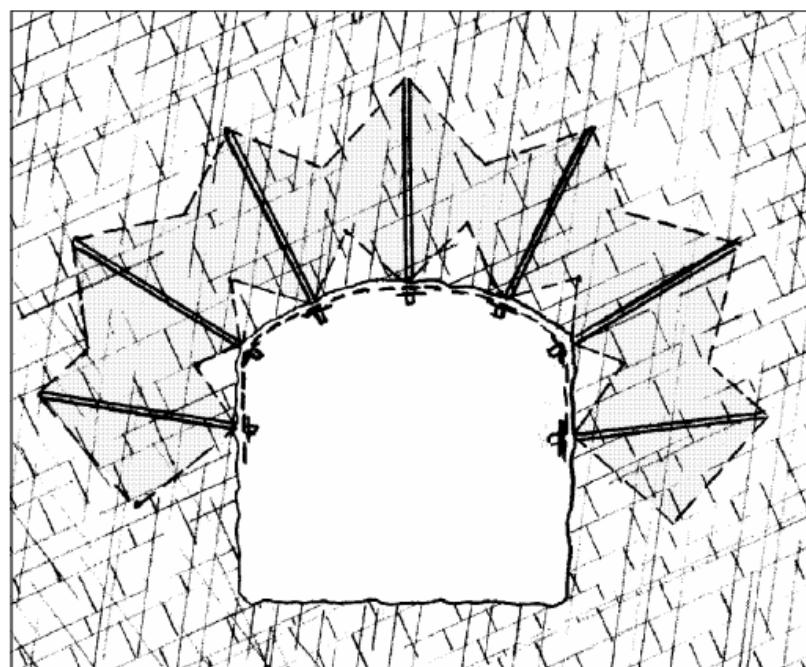
Os parafusos de rocha oferecem suporte imediato e de alta capacidade, sendo eficazes em diferentes tipos de rochas e condições geotécnicas. São econômicos, de fácil instalação com equipamentos simples, e não reduzem a seção da galeria. No entanto, têm algumas desvantagens, como limitada capacidade de carga, dependência da qualidade da rocha e desgaste ao longo do tempo. A instalação pode ser dificultada em condições extremas, há risco de corrosão em ambientes úmidos, e requerem monitoramento constante para garantir sua eficácia.

Figura 2.14 – Aplicação de parafusos de ancoragem, cabos e malhas de aço em zona com elevado índice de queda de blocos.



Fonte: <https://www.wasaki.com.br/>, 2025

Figura 2.15 Chumbadores em padrão para o suporte de rochas fortemente fraturadas, que podem falhar por desagregação ou extrusão. O sombreamento representa uma zona de tensão compressiva, na qual o travamento entre os blocos.



Fonte: Fonte: Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F., 1995,  
p. 149

### ➤ Funções dos parafusos de ancoragem

- ✓ Aumentam a resistência da rocha ao cisalhamento, prevenindo o deslocamento de blocos e a formação de fraturas.
- ✓ Mantêm a integridade das paredes e do teto das aberturas, prevenindo desmoronamentos e quedas de rochas.
- ✓ Limitam a convergência (fechamento da abertura) e o abaulamento (expansão das paredes), mantendo as dimensões da abertura dentro dos limites operacionais.
- ✓ Garantem a segurança dos trabalhadores, reduzindo o risco de acidentes causados por quedas de rochas ou colapsos.

Figura 2.16 Ilustra os parafusos de rocha de simples mecanismo, composto por uma barra de aço, placa de apoio e arruela.



Fonte: <https://www.savoypipinginc.com>

### b) Betão projectado

O betão é, principalmente, concebido para suportar tensões de compressão. No entanto, com a inclusão de armaduras em aço, forma-se um novo material conhecido como betão armado, que passa também a resistir a tensões de tracção.

Figura 2.17 Ilustra a projecção de concreto na construção de um túnel subterrâneo



Fonte: <https://www.keluesolutions.com/shotcrete>, 2025

#### ➤ Vantagens e desvantagens do betão

O betão destaca-se como material de sustimento pela sua elevada resistência à compressão, custo relativamente baixo, disponibilidade e simplicidade dos constituintes, facilidade de aplicação, resistência às condições atmosféricas e longa vida útil. No entanto, apresenta desvantagens, como baixa resistência à tracção (exigindo armadura em aço), fractura súbita sem aviso prévio e ausência de valor residual após fractura, ao contrário da madeira e do aço, que podem ser reutilizados.

#### ➤ Constituintes do betão

O betão é, essencialmente, uma mistura de cimento, agregados (brita ou cascalho, areia) e água. A proporção destes componentes varia consoante a aplicação pretendida. Para além disso, podem ser adicionados materiais suplementares com o objectivo de ajustar características como o tempo de presa e a fluidez.

### a. Cimento

O cimento é o componente principal do betão, responsável por endurecer e manter os agregados coesos quando misturado com água. O tipo mais comum na mineração é o cimento Portland, embora em casos específicos se usem cimentos de presa rápida. A sua produção e utilização são reguladas por normas técnicas específicas em cada país. Para o cimento fabricado pela Cimangola, Figura 2.18, em ambientes quentes, o tempo de presa é reduz significativamente.

Figura 2.18 - Ilustra 1 saco de cimento Portland de fabrico nacional.



Fonte: <https://feitoemangola.gov.ao/produto/cimento-portland>

A quantidade de cimento utilizada numa mistura de **1 m<sup>3</sup>** de betão, chamada "**dosagem**", pode ser calculada conforme a equação proposta por Biron (1983):

$$M_c = \frac{550}{\sqrt[5]{D_{\max}}} \quad (23)$$

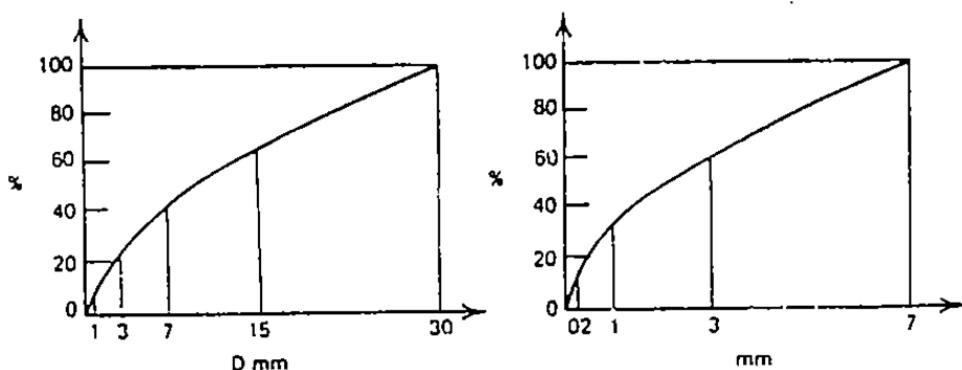
**Onde:**  $M_c$  = dosagem mínima de cimento (kg/m<sup>3</sup>);  $D_{\max}$  = maior tamanho dos agregados (mm)

Quanto maior o tamanho dos agregados, menor a quantidade de cimento necessária, tornando o betão mais económico. A dosagem padrão de  $M_c$  é de 300-350 kg/m<sup>3</sup> e em casos especiais (alta resistência): 400-450 kg/m<sup>3</sup>

### b. Agregados

Os agregados incluem Areia = partículas de 0 a 7 mm e Cascalho/brita = partículas de 7 a 30 mm. Tamanhos > 30 mm não são usados quando o transporte do betão é feito por tubagem. Os agregados formam a estrutura do betão, ajudando a reduzir a sua retração durante a cura. Para um betão de boa qualidade, a distribuição granulométrica dos agregados deve seguir uma curva granulométrica ideal, conforme ilustrado nos gráficos fig. 5.1a (gravilha) e fig. 5.1b (areia).

Figura 2.19 - Curvas granulométricas da brita e da areia



Fonte: Beckett e Saxena (1969, como citado em Biron, 1983, p. 174)

### c. Outros constituintes

Quadro 2.1 Características e influência dos outros constituintes do betão

Aditivos	Características e Influência
Cloreto de cálcio (CaCl <sub>2</sub> )	Adicionado diretamente à água de mistura. Acelera a cura do betão (reduz para 1-3 dias)
Açúcar	Retarda o tempo de presa do betão e o efeito depende da concentração usada.
Cinza volante	Obtida de centrais termoelétricas. Melhora a fluidez do betão durante o transporte por tubagem.
Sílica pura (SiO <sub>2</sub> ) e Bentonita	Melhoram a fluidez do betão em misturas de baixa qualidade. Necessário quando a dosagem de cimento é baixa (200-250 kg/m <sup>3</sup> ). Quando o cimento está acima de 350 kg/m <sup>3</sup> , esses aditivos podem não ser necessários.

Fonte: Autor, 2025 com base em apontamentos da aula do Professor Eng.<sup>º</sup> Augusto Paulino, Universidade Agostinho Neto, 2023

O "coeficiente das condições de trabalho do betão" refere-se a factores de correção aplicados às propriedades de cálculo do betão (como resistência, módulo de elasticidade, etc.) para ter em conta as **condições reais** em que o betão vai trabalhar na estrutura.

Tabela 2.1 - Coeficientes das condições de trabalho do betão para diferentes estados de consistências

Condições de trabalho	Coeficiente A	
	Brita	Rocha britada
Húmido (afundamento de 2-6 cm)	45	50
Plástico (afundamento de 7-12 cm)	50	63
Fluido (afundamento >12 cm)	58	74

Fonte: Biron e Arioglu (2, p. 175)

#### d. Água

A água é um fator essencial no betão, pois permite a hidratação do cimento e define a "fluidez" da mistura. A quantidade de água necessária depende da granulometria dos agregados e da resistência à compressão desejada. De acordo com os investigadores [3] **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**] a dosagem de água é determinada por:

$$M_a = A(7 - K) \quad (2.17)$$

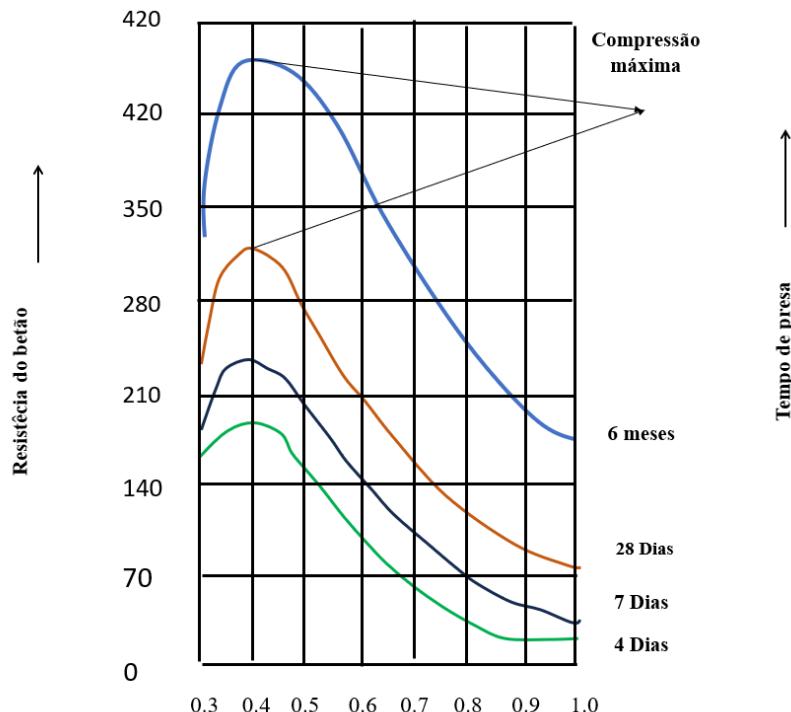
**Onde:**  $M_a$  = quantidade de água, em kg/m<sup>3</sup>;  $A$  = coeficiente de acordo com as condições de trabalho (Tabela 2.1);  $K$  = módulo de finura, ou seja, a percentagem cumulativa de agregados superiores a um determinado tamanho de peneira.

#### ➤ Relação água-cimento

A relação água-cimento é o factor mais importante para a resistência à compressão do betão e influencia o seu transporte por tubagens. A resistência é máxima com uma relação de 0,4,

diminuindo com valores superiores. A finura dos agregados é definida pela soma das percentagens cumulativas retidas nas peneiras normalizadas, dividida por 100.

Figura 2.20 - Resistência à compressão do betão em termos da relação água-cimento. Proporções típicas de mistura para cimento Portland normal: 1 parte de cimento: 2 partes de areia: 4 partes de brita (gravilha)



Fonte: Biron e Arioglu (1983)

### ➤ Resistência a compressão do Betão

Muitas fórmulas são apresentadas para expressar a resistência à compressão em função das proporções. De acordo com Bolomey (1973), citado por Biron e Arioglu (1983), a resistência à compressão do betão define-se segundo:

$$\sigma_b = K \left( \frac{1}{\alpha} - 0,5 \right) \quad (2.18)$$

**Onde:**  $\sigma_b$  = resistência à compressão, em quilogramas por centímetro quadrado, após um determinado tempo de cura;  $\alpha$  = relação água-cimento em peso;  $K$  = coeficiente para 28 dias de cura, 180 = coeficiente para 7 dias de cura, 150.

O betão é um material amplamente estudado e regulamentado, com normas que cobrem desde a produção até à aplicação final. Embora normas britânicas e americanas sejam comuns, recomenda-se que projectos de mineração e subterrâneos considerem também as normas turcas (TS 500) que define os princípios de cálculo, dimensionamento e execução de **estruturas de betão armado**. Estabelece os requisitos mínimos para propriedades dos materiais, métodos de análise estrutural, dimensionamento de secções, detalhamento de armaduras e critérios de durabilidade. Na tabela abaixo estão indicadas as três resistências do betão amplamente utilizadas.

Tabela 2.2 - Resistência à compressão do betão (Norma Turca 500)

<b>Tipo de Betão</b>	<b>Cubos (20 x 20 x 20) (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cilindros (15 x 30 cm) (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Razão (cubo/cilindro)</b>
B 160	160	140	1.14
B 225	225	195	1.15
B 300	300	240	1.25

Fonte: Biron e Arioglu (1983)

### ➤ Resistência à tração

A resistência à tração direta do betão é cerca de 10% da resistência à compressão, enquanto a resistência à tração por flexão (módulo de ruptura) equivale a aproximadamente 15% da resistência à compressão.

#### 2.5.3. Dimensionamento dos sustimentos

##### I. Parafusos de ancoragem

###### a. Comprimento dos parafusos

De acordo com os investigadores [40, 41] (*apud* Biron, p. 107), o comprimento dos parafusos ( $l$ ) deve ser maior do que a altura da abóbada separada do tecto principal. Se a largura da galeria for ( $L$ ), esses comprimentos são determinados conforme segue:

$$\text{Tectos fortes} \quad l = \frac{1}{3} \cdot L \quad (2.19)$$

$$\text{Tectos fracos} \quad l = \frac{1}{2} \cdot L \quad (2.20)$$

Para tectos muito resistentes, onde a ancoragem é realizada para evitar a fragmentação, o comprimento mínimo deve ser de **1 metro**.

### a. Espaçamento dos parafusos

O espaçamento dos parafusos está intimamente relacionado com o seu comprimento. De acordo com as investigações fotoelásticas de Coates e Cochrane (1971), o espaçamento deve seguir a equação:

$$b = \frac{2}{3} \cdot l = \frac{2}{9} \cdot L \quad (2.21)$$

$$l_{\max} = \frac{R_{\max}}{b^2 \cdot \rho} \quad (2.22)$$

**Onde:**  $b$  = Espaçamento dos parafusos, em metros;  $L$  = Largura da galeria, em metros;  $l$  = Comprimento do parafuso, em metros;  $R_{\max}$  = Capacidade máxima de carga do parafuso, ou seja, a força que resulta na cedência do aço, toneladas;  $\rho$  = Densidade da rocha, em **ton/m<sup>3</sup>**.

### b. Diâmetro dos parafusos

O diâmetro dos parafusos é calculado com base na resistência ao escoamento do aço mediante a fórmula apresentada por Biron e Arioglu (1983):

$$R_{\max} = \sigma_e A \quad (2.23)$$

$$R = \frac{R_{\max}}{n} = \frac{0.785d^2\sigma_e}{n} \quad (2.24)$$

$$d = \sqrt{\frac{nR}{0.785\sigma_e}} \quad (2.25)$$

**Onde:**  $R_{\max}$  = capacidade máxima de carga do parafuso (em tração), em quilogramas;  $R$  = força axial admissível no parafuso, em quilogramas;  $n$  = fator de segurança, entre

$2 \rightarrow 4$ ;  $\sigma_e$  = resistência ao escoamento do aço, em kgf/cm<sup>2</sup>;  $A$  = área da secção do parafuso, em cm<sup>2</sup>;  $d$  = diâmetro do parafuso, em centímetros.

### c. Número de Parafusos ( $m$ )

O número ( $m$ ) de parafusos é calculado da seguinte forma, segundo Biron e Arioglu (1983):

$$m \geq \frac{L \cdot h \cdot c \cdot \gamma}{R} \geq \frac{L \cdot h \cdot c \cdot \gamma \cdot n}{0.785\sigma_e \cdot d^2} \quad (2.26)$$

### d. Densidade de Parafusos ( $m_0$ )

Na prática, é comum utilizar um valor de 1 parafuso/m<sup>2</sup>. No entanto, em tectos fracos e fraturados, a densidade deve ser aumentada para garantir a estabilidade.

## II. Betão projetado (shotcrete)

Na preparação de betão para aplicações subterrâneas, devem ser cumpridos dois requisitos fundamentais:

- 1) **Resistência à compressão** – o betão deve possuir a resistência necessária para a aplicação prevista.
- 2) **Fluidez suficiente para transporte por tubagens** – O betão deve apresentar um abatimento de  $7,5 \pm 2,5$  cm para garantir consistência adequada ao bombeamento, com agregados limitados a 30 mm no transporte por tubagem. As proporções de cimento, agregados e água devem ser rigorosamente calculadas para cumprir os requisitos estruturais e operacionais.

### a. Resistência média à compressão

Primeiro, a **resistência média à compressão** deve ser avaliada. De acordo com Lydon (1972) e com o Instituto Americano de Concreto (1972), citados por Biron e Arioglu (2, p. 107), essa avaliação ou ajuste é feito mediante a equação abaixo:

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_b}{1 - tV} \quad (2.27)$$

**Onde:**  $\sigma_{av}$  = resistência média utilizada nos cálculos;  $\sigma_p$  = resistência de projeto (resistência especificada);  $V$  = coeficiente de variação relacionado com as condições de trabalho.

### b. Relação água-cimento

Segundo, a **relação água-cimento** é calculada utilizando várias fórmulas (por exemplo, a fórmula de Bolomey). Em betão fluido, é necessária uma maior quantidade de água.

### c. Volume total de agregado ( $V_i$ )

O volume total de agregados é calculado subtraindo-se o volume de cimento, água e ar de 1 m<sup>3</sup>, sendo o restante dividido entre areia e brita conforme uma proporção definida. Como a preparação do betão envolve várias suposições, é necessário preparar provetes para avaliar a massa volúmica, a compacidade e a fluidez.

### d. Espessura do betão

De acordo com (Rabczewicz, 2004), a seguinte fórmula é dada para **betão projectado** em condições normais. Os resultados concordam bem com os de outros investigadores:

$$t = 0.434 \frac{P \cdot r}{\tau} \quad (2.28)$$

**Onde:**  $t$  = espessura do shotcrete, em metros;  $P$  = tensão sobre o shotcrete, em toneladas por metro quadrado;  $r$  = raio da galeria, em metros;  $\tau$  = tensão de corte admissível do material do shotcrete;

### e. Espessura do revestimento do poço

De acordo com Protodiakonov, conforme citado em Biron e Ariolgu (1983):

$$t = \frac{P \cdot r}{(\sigma_b/F) - P} + \frac{150}{(\sigma_b/F)} \quad (2.29)$$

**Onde:**  $t$  = espessura do revestimento, em centímetros;  $Q$  = pressão lateral sobre o revestimento, em quilogramas por centímetro quadrado;  $H$  = profundidade do poço a partir da superfície, em centímetros;  $r$  = raio do poço, em centímetros;  $\sigma_b$  = resistência

do betão aos 28 dias, em quilogramas por centímetro quadrado;  $F$  = fator de segurança, geralmente 2

## 2.6. Análise de casos reais de transição de lavra a céu aberto para subterrânea

### 2.6.1. Mina de Cullinan

A Mina Premier, localizada na área de Cullinan-Raytonne, África do Sul, é um diatrema de kimberlito, o maior do país. Inicialmente, a extração foi realizada a céu aberto até 1932, atingindo 189 metros de profundidade. A transição para a mineração subterrânea iniciou-se em 1945 devido a questões de estabilidade geotécnica e limitações económicas da mineração a grandes profundidades. A mina adotou métodos de lavra subterrânea com poços, subníveis com bancadas abertas e técnicas de abatimento por gravidade.

Figura 2.21 - Observa-se a cratera resultante da lavra a céu aberto da mina, com destaque para os bancos em espiral característicos da metodologia de exploração por bancadas



Fonte: <https://www.civitatis.com/es/johannesburgo/excursion-mina-diamantes-cullinan/>, 2025

Os sustimentos utilizados incluem parafusos de ancoragem, que garantem a estabilidade das paredes dos túneis, especialmente nas colunas de minério; malhas de aço, que previnem quedas de material e mantêm a integridade da rocha; betão projetado, aplicado para reforçar paredes e tetos, frequentemente com fibras de aço para maior resistência à tração; e pilares naturais ou artificiais, utilizados para suportar zonas profundas ou de elevado risco de colapso. Os critérios de dimensionamento incluem fatores de segurança entre 1,5 e 3,0, considerando a resistência dos materiais e a estabilidade geotécnica. São realizados estudos geomecânicos para avaliar as propriedades mecânicas e

físicas das rochas, como a resistência, o índice de qualidade da rocha e as tensões induzidas pela mineração. A profundidade da mina também influencia as tensões, exigindo o uso de suportes mais robustos.

### **Desafios enfrentados durante a transição**

- A movimentação do maciço rochoso foi um desafio constante, causando subsidência, afetando a estabilidade das infraestruturas e áreas adjacentes.
- *Desmoronamentos ocasionais e falhas nas paredes finais* em zonas de transição entre a lavra a céu aberto e subterrânea.

### **Soluções Adotadas**

- Uso de sistemas como geofones e inclinômetros para detectar problemas precocemente.
- Aplicação de shotcrete e cabos de ancoragem logo após a escavação.
- Uso de técnicas controladas de extração, como o anel de corte, para evitar falhas nas paredes finais.
- Uso de pilares naturais como suporte durante a transição.

### **Erros e falhas corrigidas**

O layout inicial da mina gerou dificuldades operacionais e riscos de deslizamento para os trabalhadores. Para resolver, foi adotado um layout em espinha de peixe offset, melhorando a segurança. O sistema de ventilação, antes insuficiente, foi otimizado com ventiladores mais potentes e ajustes no layout. Problemas de fragmentação excessiva do minério também foram solucionados com técnicas específicas de enfraquecimento dos pilares e controle da fragmentação, garantindo maior estabilidade e melhores condições de operação.

### **Lições Aprendidas e Boas práticas para o presente trabalho**

O monitoramento geotécnico contínuo desempenhou um papel essencial na condução segura das operações subterrâneas, permitindo a identificação precoce de sinais de instabilidade no maciço rochoso. Essa abordagem possibilitou ajustes tempestivos nas atividades de escavação e sustentação, aumentando a eficiência e a segurança do projeto. Paralelamente, a aplicação imediata de shotcrete combinado com a instalação de chumbadores provou ser uma prática altamente eficaz e replicável em diferentes condições geomecânicas, proporcionando o confinamento necessário das paredes e tetos das galerias logo após a escavação. Adicionalmente, a adoção de uma sequência controlada de extração foi fundamental para o alívio gradual das tensões internas do maciço, minimizando a concentração de esforços e prevenindo colapsos prematuros das estruturas subterrâneas. Essa combinação de técnicas, integradas a um rigoroso plano de monitoramento, resultou em um ambiente de trabalho mais estável e na otimização dos processos construtivos.

### 2.6.2. Mina Ekati, Canadá

A Mina Ekati está situada na região de Lac de Gras, nos Territórios do Noroeste, no Canadá. O depósito é de kimberlito, com várias pipes kimberlíticas. A operação iniciou-se com lavra a céu aberto nas pipes Panda, Koala, Beartooth e Fox. Com o esgotamento das reservas rasas e as questões económicas e geotécnicas associadas à profundidade das lavras a céu aberto, iniciou-se a transição para lavra subterrânea, adoptando-se três métodos principais: Subnível de Retiro (*Sublevel Retreat – SLR*), Escavação por Subníveis (*Sublevel Caving – SLC*) e Escavação em Inclinação (*Incline Caving – IC*). A escolha do método dependia das características geológicas específicas de cada pipe kimberlítica.

Figura 2.22 - Ilustra a lavra a céu aberto nas pipes Panda e Koala, no Canadá e que posteriormente passaram para operações subterrâneas

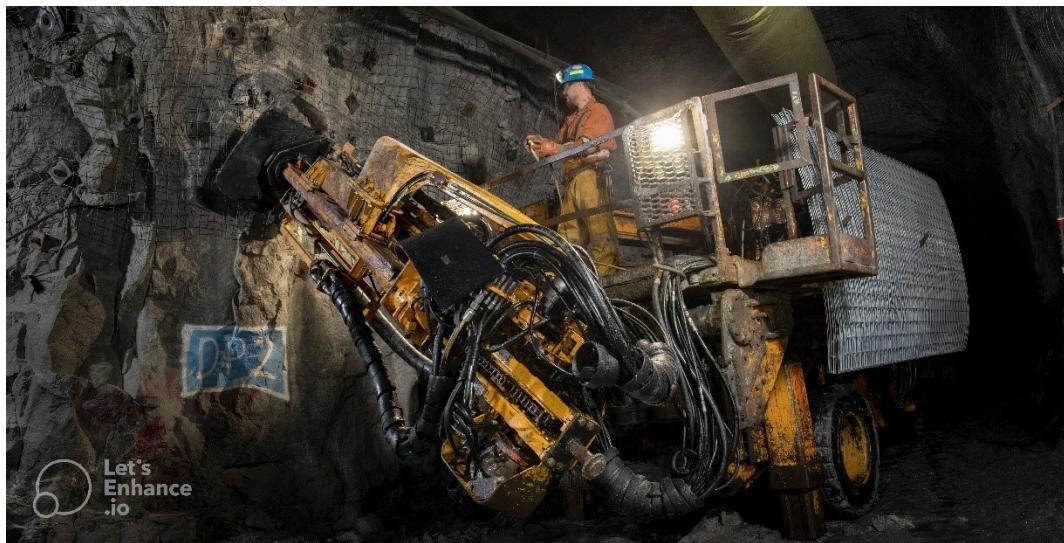


Fonte: <http://edukavita.blogspot.com/2014/09/mina-de-de-ekati.html>, 2025

A infraestrutura subterrânea incluiu a escavação de rampas de acesso e shafts para transporte de minério e pessoal. Foram instalados sistemas de ventilação para garantir a segurança operacional. A estabilidade das estruturas foi assegurada por parafusos de ancoragem, redes de aço, betão projetado (shotcrete) com fibra de aço e cabos de ancoragem longos, dimensionados com factores de segurança variando entre 1,5 e 3,0, considerando a resistência das rochas, as tensões induzidas e a profundidade da mina. As tecnologias e métodos de suporte utilizados incluíram a utilização de fibra de aço no shotcrete e sistemas mecanizados de ancoragem, implementados para melhorar a resistência e eficiência dos sustentos. Durante a transição, foram observados problemas como subsidência da superfície, desmoronamentos e falhas nas paredes finais nas zonas de transição entre a lavra a céu aberto e subterrânea. Para lidar com

esses desafios, foram adoptadas a implementação de monitorização geotécnica contínua, reforços imediatos e secundários com shotcrete e cabos de ancoragem, e ajustes na sequência de extracção para minimizar tensões rochosas.

Figura 2.23 - Implementação de parafusos de ancoragem e redes ou malhas de aço de com auxílio de uma perfuradora de ancoragens



Fonte: <https://burgundydiamonds.com/ekati-mine/>

### Lições Aprendidas e Boas Práticas para o Presente Trabalho

Entre os aspectos positivos observados durante o processo, destaca-se a utilização de sistemas mecanizados de ancoragem, que proporcionaram maior rapidez, segurança e qualidade na instalação dos elementos de sustentação. Além disso, a escolha criteriosa dos métodos de lavra subterrânea, alinhada às características geológicas locais, foi decisiva para o sucesso da transição operacional, garantindo maior estabilidade e controle do maciço rochoso. Por outro lado, alguns erros e falhas, foram identificados e corrigidos ao longo da execução. Entre eles, destacam-se os ajustes realizados no layout dos drawpoints, que permitiram uma melhor eficiência na recuperação do minério e maior fluidez das operações, e as melhorias implementadas no sistema de ventilação, fundamentais para assegurar a renovação do ar, controlar a temperatura e reforçar a segurança dos trabalhadores em ambiente subterrâneo.

## Capítulo 3 – Estudo de Caso

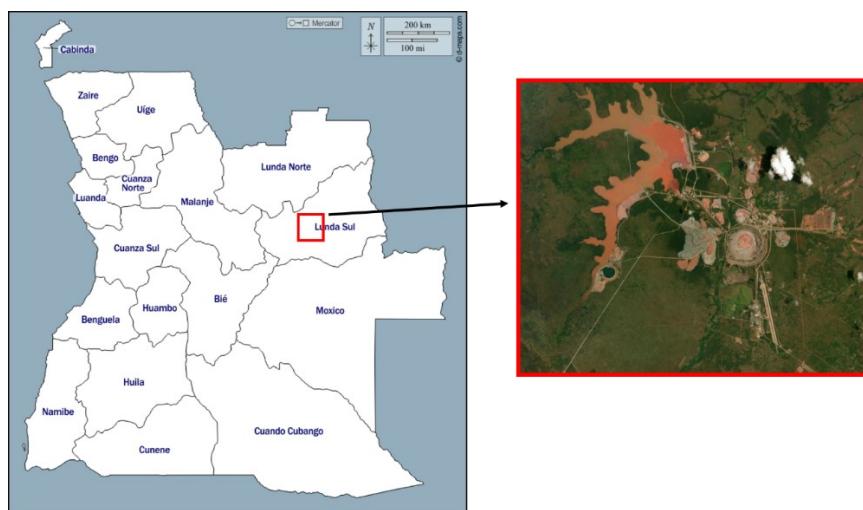
O estudo de caso da Mina de Catoca foi seleccionado pela sua relevância e complexidade, representando um cenário real em que a transição da exploração a céu aberto para subterrânea constitui uma necessidade iminente.

### 3.1. Caracterização da Mina de Catoca

#### 3.1.1. Localização

A Mina de Catoca está localizada na província da Lunda Sul, no nordeste de Angola, a cerca de 35 km da cidade de Saurimo e aproximadamente 840 km a leste de Luanda, capital do país. Situada nas coordenadas geográficas 9°04'00" S de latitude e 20°18'00" E de longitude, a mina opera num corpo kimberlítico de forma subvertical e é actualmente a quarta maior mina de diamantes do mundo. A região apresenta um clima tropical húmido, com presença significativa de cursos de água, como o rio Cassai e Lova, o que influencia directamente o nível freático da mina e impõe desafios operacionais. A província da Lunda Sul faz fronteira a norte com a Lunda Norte, a sul com o Moxico, a oeste com Malanje e a leste com a República Democrática do Congo, situando-se numa região estratégica para a exploração de recursos minerais em Angola.

Figura 3.1 - Mapa de localização da mina de Catoca

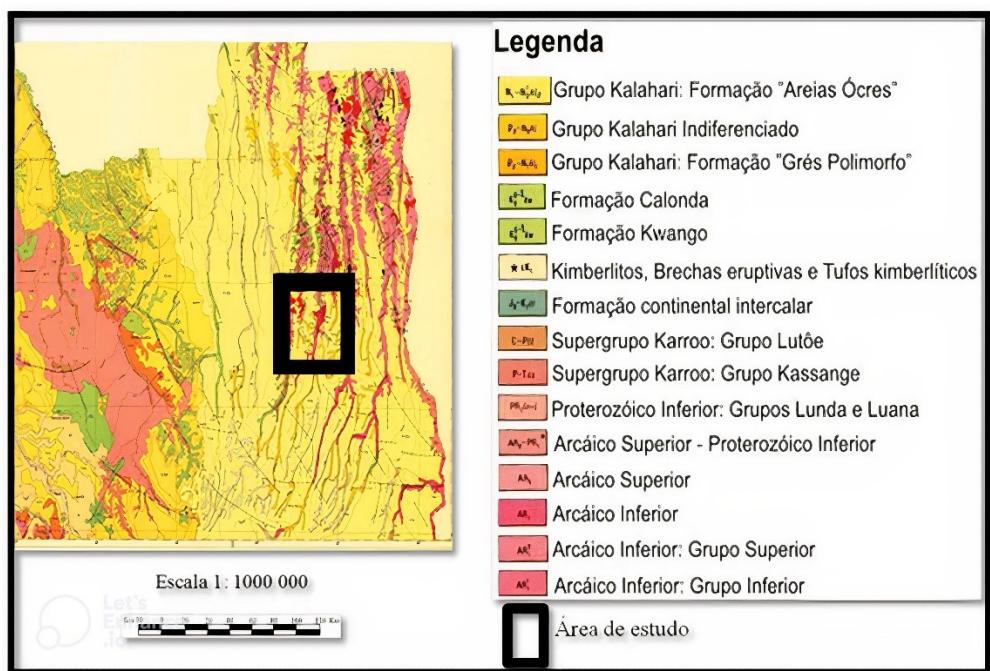


Fonte: Autor, 2025 (recurso: ArcGis)

### 3.1.2. Ambiente Geológico e Geotécnico

O kimberlito de Catoca encontra-se encaixado em rochas metassedimentares do Complexo de Cassai, com predominância de xistos e quartzitos. A área é geologicamente estável, mas apresenta zonas de fraturaçāo associadas a episódios tectónicos antigos. O sistema hidrogeológico da região requer medidas de desaguamento significativas para permitir a escavação segura abaixo do nível freático. Este complexo de rochas cristalinas de base foi coberto por formações sedimentares recentes, nomeadamente, a Formação de Kalahari e a Formação de Calonda.

Figura 3.2 - Geologia regional da área em estudo, excerto extraído da Carta Geológica de Angola



Fonte: Araújo et al. (1992, apud Balão, Pinho e Duarte, 2022)

A estrutura geológica da Mina de Catoca é complexa e o corpo mineralizado subdivide-se em três partes diferentes. A Central, até ~ 500 m de profundidade, é composta por kimberlito tufístico. A parte que circunda as paredes da chaminé tem a forma de anel e é composta por kimberlitos e rochas derivadas dos mesmos e representa o principal minério industrial (kimberlito porfírico). A parte central do corpo mineralizado, abaixo de 560 m, é composta por brechas kimberlíticas autolíticas. Até à profundidade de 460 m o teor médio dos diamantes está distribuído de forma desigual, sendo a parte ocidental mais rica que a oriental. As rochas encaixantes são constituídas por gnaisse. Na profundidade de 650 a 700 m as rochas são representadas por várias espécies e material monolítico sólido.

## 1) Maciço de gnaisse

### a. Descontinuidades

Foram identificadas três famílias de descontinuidades no maciço de gnaisse. As principais características das descontinuidades incluem atitude, persistência, abertura e rugosidade, como apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 3.1 - Família de descontinuidade no maciço de gnaisse

Família	Persistência (m)	Abertura (mm)	Rugosidade
1	10	Fechada	Lisa
2	> 20	0,2	Estriada
3	10	0,05	Lisa

Fonte Sociedade Mineira de Catoca (2023)

Tabela 3.2 - Valores de espaçamento e RQD por setor no gnaisse

Setor	Espaçamento (cm)			RQD (%)
	Família 1	Família 2	Família 3	
1	160	27	85	96
2	160	51	85	100
3	80	12	85	79
4	80	41	85	98

Fonte: Sociedade Mineira de Catoca (2023)

### b. Resistência à Compressão Simples

A resistência à compressão simples do gnaisse foi estimada utilizando o esclerômetro de Schmidt. O valor médio da resistência à compressão simples foi de 170 MPa, confirmado por ensaios de compressão puntiforme, que resultaram em 166 MPa.

## 2) Maciço de Kimberlito

### a. Descontinuidades

No maciço de kimberlito, foram identificadas três famílias de descontinuidades, conforme mostrado na Tabela 3.3. A família é predominante e influencia significativamente os modos de ruptura. O RQD médio foi de 15%, indicando um alto grau de fraturamento e blocos rochosos menores em comparação ao gnaisse.

Tabela 3.3 - Família de descontinuidade do Kimberlito

Família	Espaçamento (cm)	Persistênci a (m)	Preenchimento (mm)	Rugosidade
1	4	15	1.7	Lisa a rugosa
2	35	<1	1	Estriada a rugosa
3	40	<1	-	Rugosa

Fonte: Sociedade Mineira de Catoca (2023)

### b. Resistência à Compressão Simples

A resistência à compressão simples do kimberlito foi estimada utilizando o esclerômetro de Schmidt e a fórmula de Katz et al. (2000). O valor médio encontrado foi de 110 MPa, significativamente menor que o do gnaisse, o que influencia os modos de ruptura, como tombamento e deformação do maciço.

#### 3.1.3. Classificações geomecânicas

Tabela 3.4 - Índices geomecânicos e classificação dos maciços para o gnaisse e Kimberlito

Classificação Geomecânica		Gnaisse	Kimberlito
RMR	Valor	76	58
	Classe	II	III
	Descrição da rocha	Boa	Regular
Q	Valor	10	0,66
	Classe	V	VI
	Descrição da rocha	Regular	Ruim

Fonte: Sociedade Mineira de Catoca (2023)

**c. Propriedades mecânicas dos maciços rochosos**

➤ **Coesão e ângulo de atrito**

Com base na classificação RMR, os valores de coesão e ângulo de atrito foram estimados para os dois maciços, conforme mostrado na

Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Propriedades Mecânicas dos maciços rochosos de acordo com RMR

<b>Tipo de rocha</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de atrito interno (°)</b>
Gnaisse	300 – 400	25 – 45
Quimberlito	100 – 200	25 – 30

Fonte: Sociedade Mineira de Catoca (2023)

**3.2. Condições técnicas e operacionais da Mina de Catoca**

Figura 3.3 - Uma visão geral do Kimberlito de Catoca

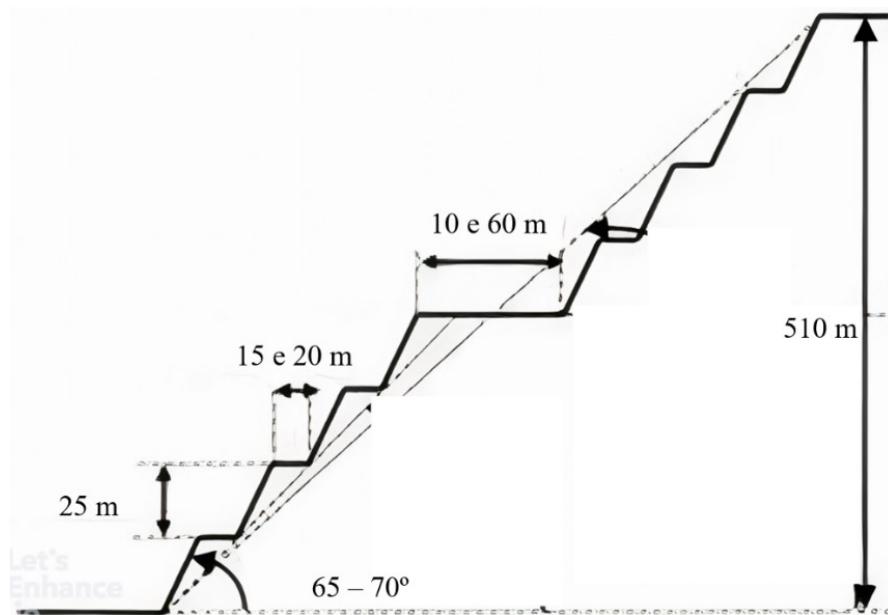


Fonte: <https://www.catoca.com/visao-global-do-kimberlito-catoca/>, 2025

Modo de exploração actual	Céu aberto (Bancadas e Taludes)
Sistema de transporte	Cíclico
Diâmetro da mina	1 670 metros
Profundidade efectiva	Cerca de 510 metros
Altura das bancadas	Variável entre 10 e 60 metros
Área superficial da chaminé	64 ha (1997) 45,5 ha (actual)

Largura das bermas de segurança      Entre 15 e 20 metros

Figura 3.4 - Parâmetros geométricos fundamentais da Mina



Fonte: Autor, 2025, baseado nos parâmetros geométricos reais da mina, 2025

### 3.3. Lavra a céu aberto de Catoca Vs Necessidade de Transição

A decisão de considerar a transição da lavra a céu aberto para lavra subterrânea na Mina de Catoca assenta, essencialmente, em três razões técnicas principais: as **condições geológico-mineiras, a eficiência operacional em profundidade e os custos de exploração**. Segundo o Diretor-geral da Sociedade Mineira de Catoca, Eng.<sup>º</sup> Benedito Paulo Manuel, estas são as principais motivações que sustentam a análise de viabilidade para a mudança de método.

- Com o aprofundamento da mina, a estabilidade dos taludes diminui devido à fraturação e alterações litológicas, reduzindo o fator de segurança. Além disso, o aumento do nível freático exige sistemas de desaguamento mais complexos e caros, afetando a viabilidade económica da lavra a céu aberto.
- Do ponto de vista da eficiência conforme a Tabela 3.6, a relação estéril/minério cresce substancialmente à medida que a lavra avança em profundidade, resultando em volumes superiores de material a remover por tonelada de minério útil extraído. Este facto implica maiores consumos de combustível, desgaste de equipamentos, aumento de custos logísticos e maiores exigências de manutenção das rampas de acesso.

Tabela 3.6 - Indicadores de eficiência da exploração mineira de Catoca

Ano	Estéril Removido (m <sup>3</sup> )	Minério Extraído (m <sup>3</sup> )	Relação Estéril/Minério
2015	6 460 900	6 210 600	1,04
2016	5 480 600	5 186 700	1,06
2017	9 737 800	6 458 500	1,51
2018	10 199 300	5 922 000	1,72
2019	10 163 700	5 511 000	1,84
2020	9 013 100	4 947 400	1,82
2021	133 904 200	62 608 000	2,14

Fonte: Adaptado de Sociedade Mineira de Catoca (2023)

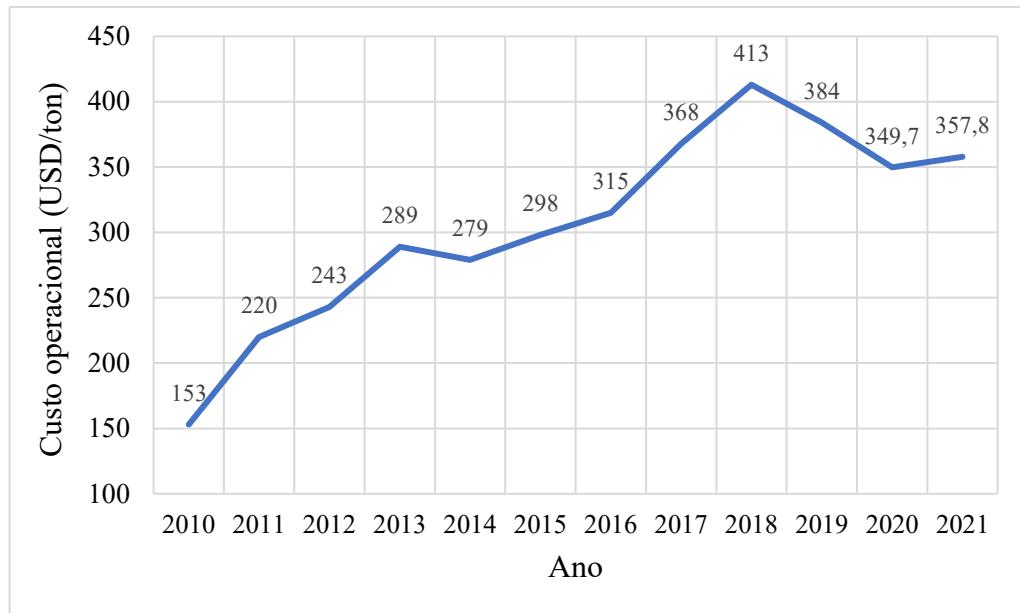
Figura 3.5 -Análise da relação Estéril/Minério da Mina de Catoca ao longo de 7 anos de exploração a céu aberto



Fonte: UNIVERSIDADE DE LISBOA. Instituto Superior Técnico (2019)

- Acresce que, do ponto de vista económico, os custos operacionais da lavra a céu aberto tornam-se progressivamente mais elevados à medida que a profundidade aumenta. Conforme o gráfico representado na Figura 3.6, o custo médio por tonelada de minério extraído, considerando o desmonte e a remoção de estéril, na mina de Catoca é de 305,8 USD/t ao longo dos últimos 12 anos de operação.

Figura 3.6 - Representação dos custos operacionais da Mina de Catoca nos últimos 12 anos de operação por método de exploração a céu aberto



Fonte: UNIVERSIDADE DE LISBOA. Instituto Superior Técnico (2019)

### 3.4. Método de Lavra Subterrânea – Método de abatimento controlado

A escolha do Método de abatimento controlado como método de lavra subterrânea para a Mina de Catoca fundamenta-se em várias razões técnicas e económicas que o tornam a opção mais adequada face às condições geológicas e operacionais da mina.

- **Condições Geotécnicas:** O corpo mineralizado é formado por kimberlito de baixa resistência, cercado por gnaisse, o que favorece o uso do método de abatimento controlado para a extração eficiente do minério.
- **Profundidade:** Com a mina superando 500 metros de profundidade, a transição para lavra subterrânea torna-se necessária. O método de abatimento controlado permite a extração eficiente do minério, reduzindo a movimentação de estéril.
- **Segurança e Sustentabilidade:** O método de abatimento controlado aumenta a segurança ao evitar que operadores precisem subir mais de 500 metros e reduz o impacto ambiental, graças à menor movimentação de estéril e à diminuição da pegada de carbono.

Tabela 3.7 - Parâmetros técnicos e operacionais sobre o método de abatimento controlado

<b>Parâmetros</b>	
Altura das Galeria acesso/produção	3-4 metros
Largura da Galeria	4-6 metros
Profundidade da Galeria	300-600 m
Distância Entre Galerias	25-40 m
Comprimento do Bloco	300-500 m
Largura do Bloco	100-300 m
Altura do Bloco	50-100 m
Ângulo de subida da mina	10-15°
Distância de Subníveis	30-100 metros
Taxa de Extração Inicial	70-80%
Relação de Diluição	30-50%
Profundidade do Poço Vertical de Acesso	800 m
Diâmetro do Poço de acesso (ventilação)	12 m (6 m)
Capacidade de Transporte do Poço	Até 2.000 ton/dia
Número de Poços de acesso (ventilação)	1 (1)
Tipo de Poço	vertical

### 3.5. Proposta de Dimensionamento de Sustimentos

#### 3.5.1. Layout da mina subterrânea

O layout proposto para a mina subterrânea é racional e eficiente, organizando acessos, ventilação e níveis de produção de forma a otimizar a recuperação do corpo mineralizado (Figura 3.7 e Figura 3.8). A Configuração proposta para o poço principal, desenvolvido nas encaixantes é apresentado na Figura 3.9. Esta organização permite a integração dos sistemas de escavação e escoamento de forma funcional, respeitando as condições geotécnicas identificadas.

Figura 3.7 - Layout proposto para a infraestrutura subterrânea utilizando o método de abatimento controlado

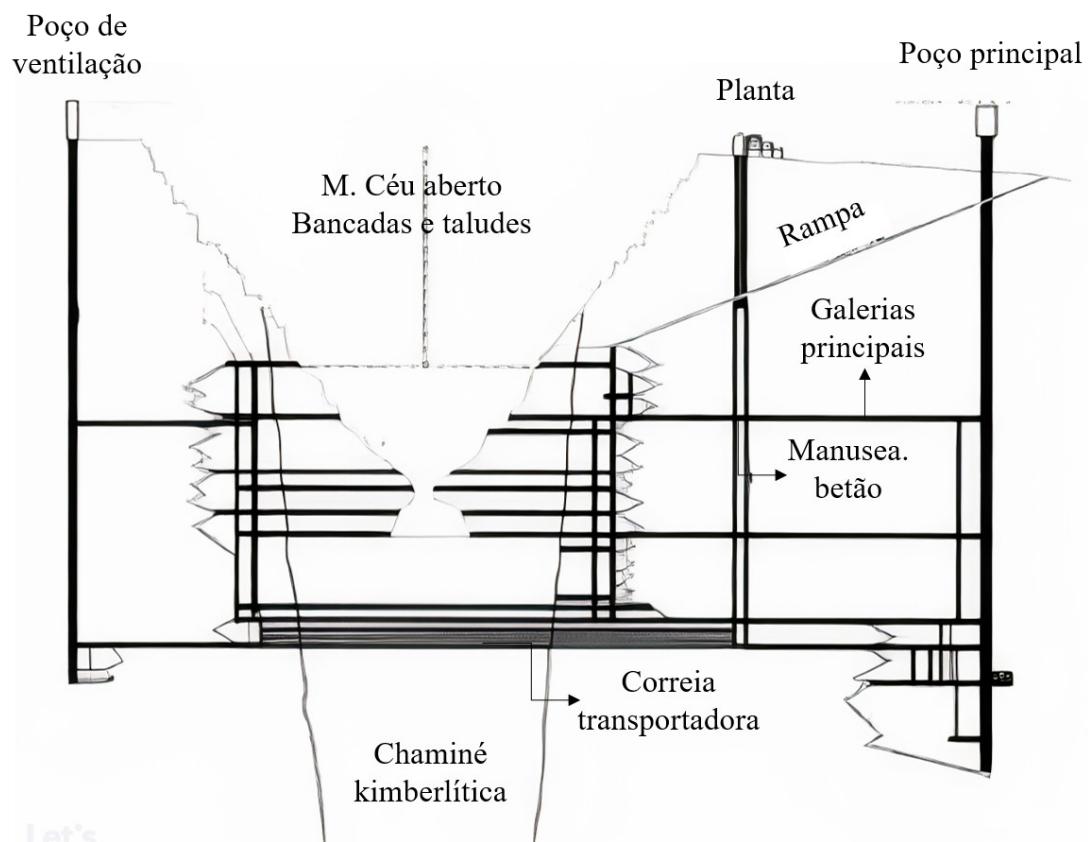
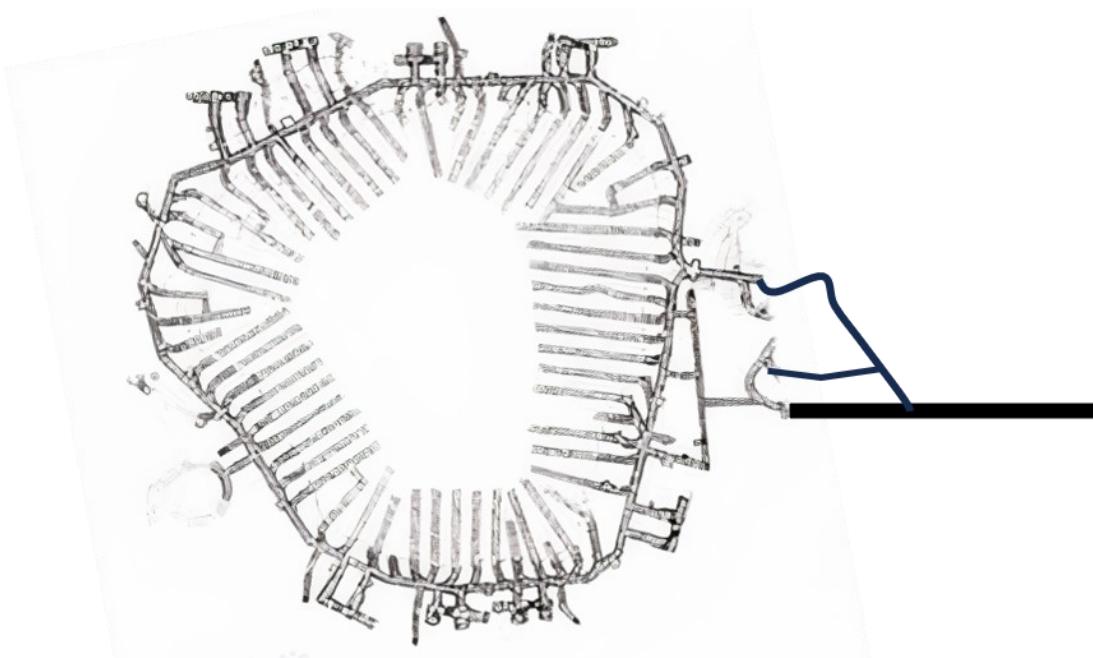
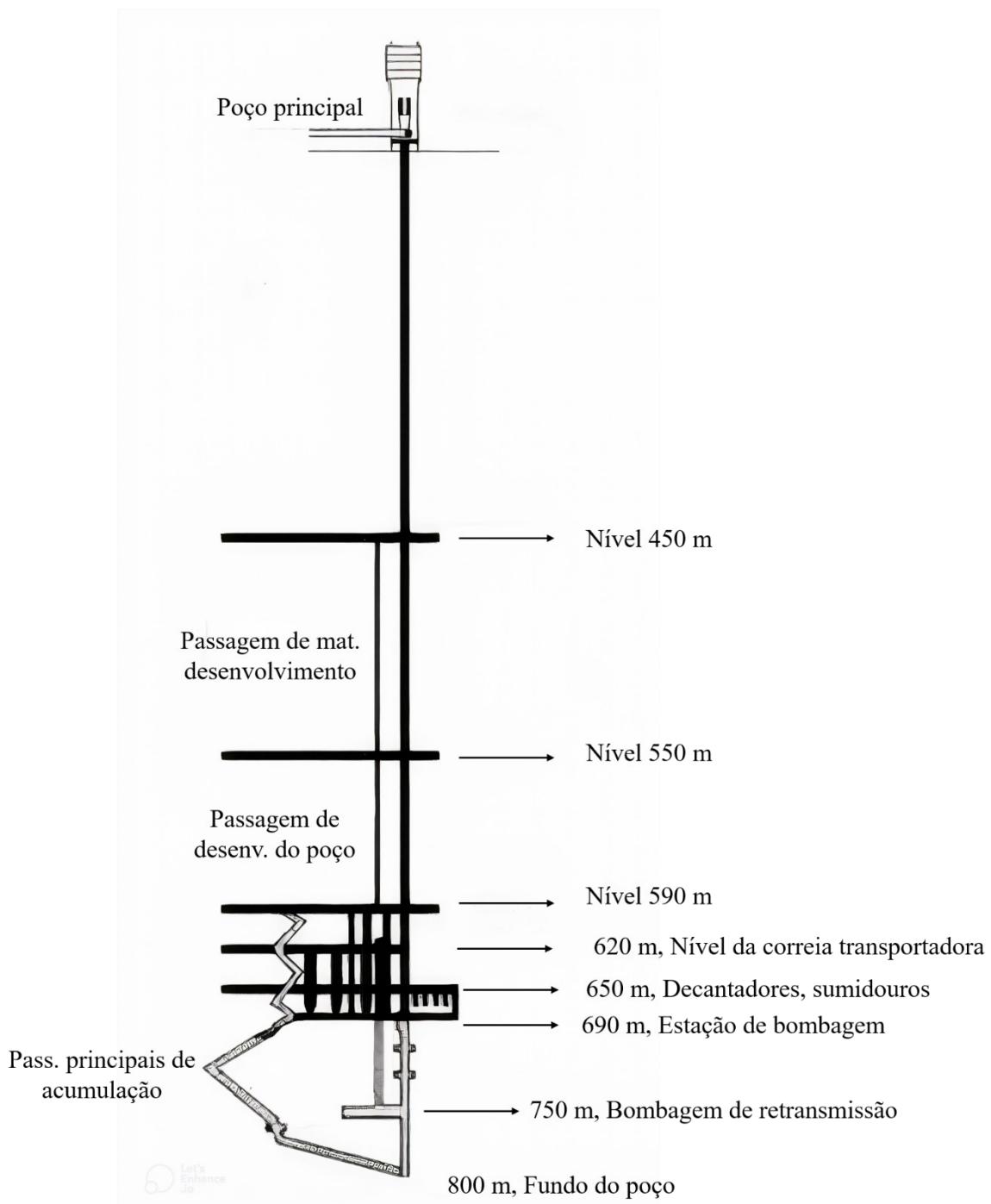


Figura 3.8 – Planta do nível de transição em vista superior



Fonte: Adaptado de Hustrulid, William e Richard

Figura 3.9 - Configuração proposta para o poço principal, desenvolvido nas encaixantes - Gnaisse

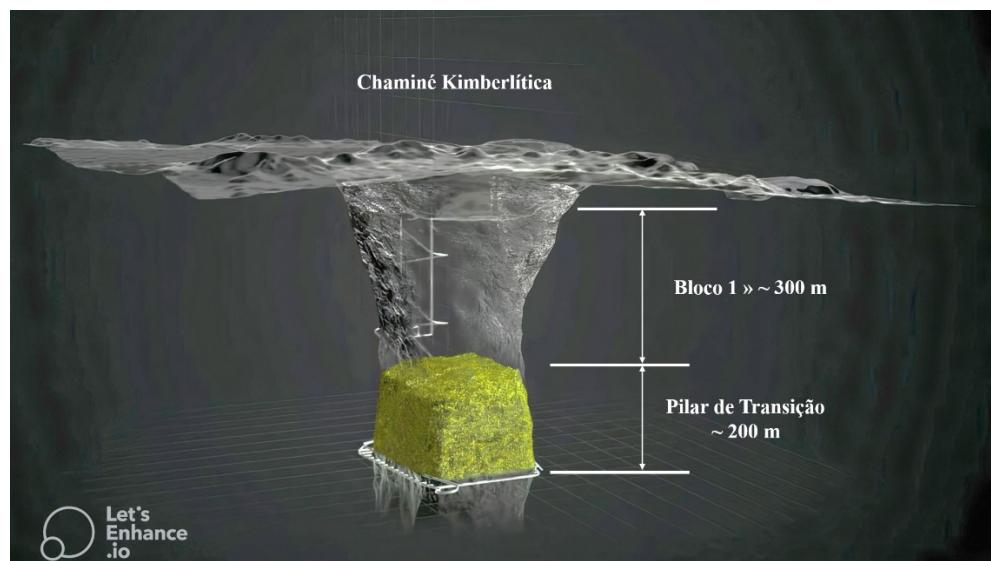


Fonte: Adaptado de Hustrulid, William e Richard

### 3.5.2. Esquema de transição

A transição da lavra a céu aberto para a lavra subterrânea será efectuada através de um esquema que prevê a criação de um pilar de transição. Este pilar garante a estabilidade entre os dois métodos e permite que a exploração a céu aberto prossiga temporariamente, enquanto se desenvolve a primeira fase da mina subterrânea. Esta abordagem possibilita uma adaptação gradual e economicamente eficiente da operação (, onde está representado o esquema de transição com o pilar de separação entre os métodos).

Figura 3.10 - Esquema de transição com o pilar de separação entre os métodos de lavra a céu aberto e subterrânea

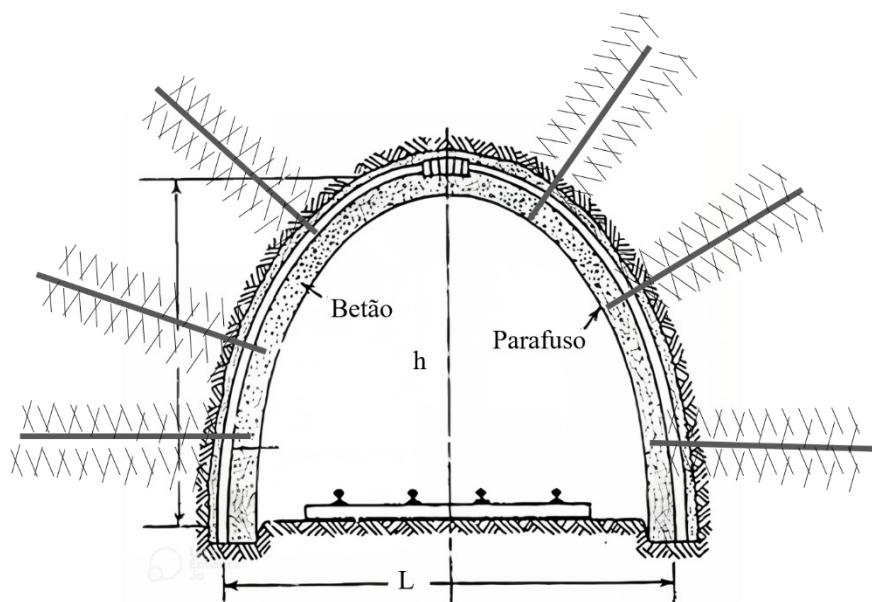


Fonte: Autor, 2025

### 3.5.3. Técnicas de sustimento

A estratégia de sustimento proposta tem como objectivo garantir a estabilidade das escavações subterrâneas e a segurança dos trabalhadores. Os tipos de suporte seleccionados incluem a aplicação de parafusos de ancoragem com cabos e malhas de aço, bem como a utilização de betão projectado (shotcrete), reservado para casos especiais, como a contenção de quedas de blocos de tamanho reduzido (visualização dos sistemas propostos). A elevada densidade de parafusos (Figura 3.11) nas laterais da galeria é justificada pela geometria da secção elíptica, que concentra a tensão tangencial máxima, favorecendo a ocorrência de ruturas nesta zona.

Figura 3.11 - Sistema combinando de sustimento de parafusos de ancoragem e betão projectado nas paredes da galeria



Fonte: Autor, 2025

### i. Betão

Para reforço combinado, será utilizado o betão da classe B 300, conforme mostrado na Tabela abaixo, devido à sua alta resistência à compressão, que é essencial para garantir a estabilidade e segurança das estruturas de suporte de carga pesada, como sustimentos e pilares. Este tipo de betão, com resistência de 300 kgf/cm<sup>2</sup> em cubos, proporciona a robustez necessária para suportar as pressões e esforços no ambiente subterrâneo, sendo ideal para a aplicação em lavra subterrânea, onde exigências de resistência são elevadas.

Tabela 3.8 - Tipos de betão classificado por cubos

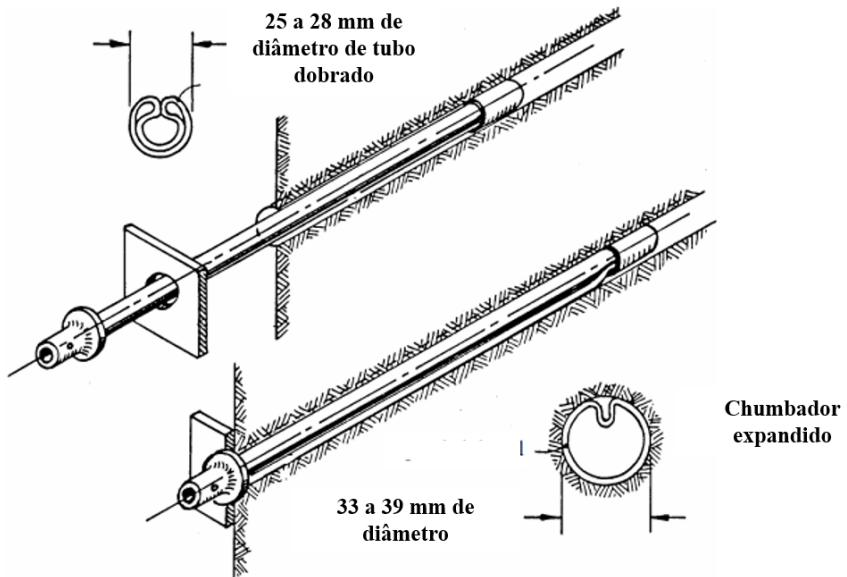
<b>Tipo de Betão</b>	<b>Cubos (20 x 20 x 20) (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Razão (cubo/cilindro)</b>
B 160	160	1.14
B 225	225	1.15
B 300	300	1.25

Fonte: Biron e Arioglu (1983)

## ii. Parafusos de rocha - Chumbadores Swellex

Desenvolvido e comercializado pela Atlas Copco, o sistema 'Swellex' está ilustrado na Figura 3.12. O chumbador, que pode ter até 12 m de comprimento, consiste num tubo de 42 mm de diâmetro que é dobrado durante a fabricação para criar uma unidade com diâmetro entre 25 e 28 mm, podendo ser inserida num furo com diâmetro de 32 a 39 mm. Nenhuma força de empurrão é necessária durante a inserção, e o chumbador é ativado por injeção de água de alta pressão (aproximadamente 30 MPa ou 4.300 psi), que infla o tubo dobrado até que entre em contato íntimo com as paredes do furo.

Figura 3.12 - Chumbador Swellex da Atlas Copco



Fonte: Adaptado de Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F., 1995, p.

## Capítulo 4 - Análise de Resultados

### 4.1. Abertura do poço vertical de secção circular

#### 4.1.1. Tensões in situ

Considere:

Raio do poço principal	$r = 6 \text{ m}$
Formação	Gnaisse
Densidade	$2,9 \text{ kgf/m}^3$

Para decidir se o poço deve ser revestido com shotcrete, é necessário definir o comportamento das tensões antes e após a abertura do poço. Primeiramente, vamos calcular a Pressão horizontal atuando no contorno do sobre o revestimento do poço.

$$Q = \frac{0,1 \cdot v \cdot \gamma \cdot H}{1 - v} = \frac{0,1 \cdot 0,25 \cdot 2,9 \cdot 800}{1 - 0,25} \\ = 77,33 \text{ kgf/cm}^2$$

Sabe-se que  $\sigma_r' = 0$  (mínimo) no contorno do poço. Por outro lado, a Tensão tangencial máxima  $\sigma_\theta'$  é igual a  $2Q$ .

$$\sigma_\theta' = 2 \cdot 77,33 \\ = 154,66 \text{ kgf/cm}^2$$

#### 4.1.2. Tensão de Corte

A máxima tensão de corte atuando na periferia do poço é dada pela máxima tensão

$$\sigma_c = \frac{\sigma_\theta' - \sigma_r'}{2} = \frac{154,66 - 0}{2} \\ = 77,33 \text{ kgf/cm}^2$$

Assim, a ruptura deste poço acontece se a resistência ao corte ( $\tau$ ) for menor que  $77,33 \text{ kgf/cm}^2$ .

### 4.1.3. Critério de Ruptura e Análise de estabilidade

Formação		Gnaisse
Coesão	$c$ [kPa]	350
Ângulo de atrito Interno	$\phi$ [°]	40°
Tensão normal	$\sigma_n$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	$2 \cdot Q \cdot \cos^2 \theta$
Ângulo tangencial	$\theta$ [°]	$45^\circ + \frac{\phi}{2}$

O ângulo tangencial é assim dado por:

$$\theta = 45^\circ + \frac{40^\circ}{2} = 45 + 20$$

$$\theta = 65^\circ$$

65° é o angulo entre o plano de ruptura e a tensão tangencial máxima de 154,66 kgf/cm<sup>2</sup>

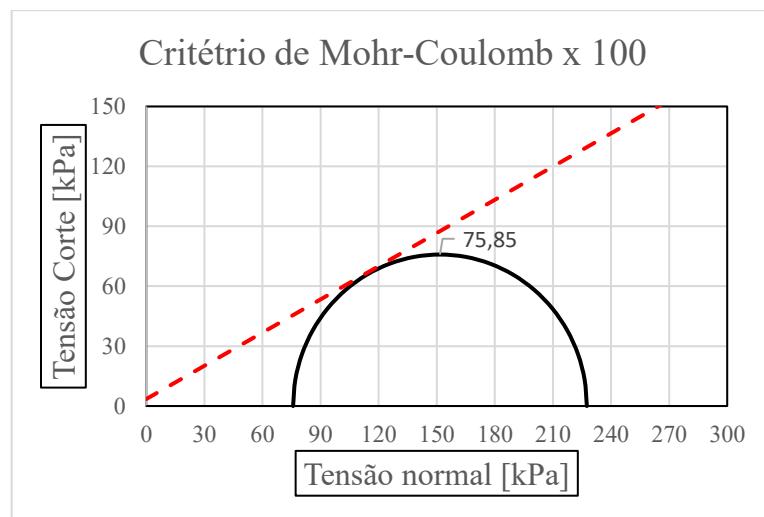
A tensão normal ( $\sigma_n$ ),

$$\sigma_n = 2 \cdot 77,33 \cdot \cos^2(65^\circ)$$

$$\sigma_n = 27,63 \text{ kgf/cm}^2$$

Com o critério de Mohr Coulomb avaliamos a resistência ao corte do gnaisse analiticamente e através do ciclo de Mohr e envoltória de Coulomb, conforme a o gráfico abaixo

Tabela 4.1 – Observa-se o Critério de Mohr-Coulomb para análise do ponto de rotura do poço



$$\tau = 0,010197 \cdot 350 + 27,63 \cdot \tan(40^\circ)$$

$$\tau = 26,75 \text{ kgf/cm}^2$$

## 4.2. Abertura de galerias horizontais

Considere:

Formação	Gnaisse	Kimberlito
Profundidade	700 m	$H = 250$ m (nível de exploração)
Densidade	$\gamma_G = 2,9 \text{ t/m}^3$	$\gamma_k 3,5 \text{ t/m}^3$
Galerias	Principais	Produção
Coef. de Poisson	$m=0,25$	$m=0,20$
Horizonte	H20	H16

### 4.2.1. Tensões Iniciais

As cargas principais atuantes no maciço rochoso antes da escavação são:

$$P = 0,1 \cdot \gamma \cdot H$$

$$P_G = 0,1 \cdot 2,9 \cdot 700 = 203 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$P_k = 0,1 \cdot 3,5 \cdot 250 = 87,5 \text{ Kgf/cm}^2$$

Pressão horizontal pode ser definida em função do peso das camadas e o coeficiente de Poisson.

$$Q = \frac{\nu \cdot P}{1 - \nu}$$

$$Q_G = \frac{203 \cdot 0,25}{1 - 0,25} = 67,70 \text{ kgf/cm}^2$$

$$Q_K = \frac{87,5 \cdot 0,20}{1 - 0,20} = 21,88 \text{ kgf/cm}^2$$

### 4.2.2. Identificação de Regiões Críticas

Uma vez calculadas as tensões induzidas pela escavação, o próximo passo é identificar as regiões de máxima e mínima tensão tangencial:

- **Máximos de ( $\sigma_\theta$ ):** ocorrem quando  $\theta$  é  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , maior risco de ruptura ou fratura, especialmente em rochas com baixa resistência ao corte

$$\sigma_{\theta G}' = (203 - 67.70) + 2 \cdot \frac{4}{3} \cdot 203 = 676.63 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{\theta k}' = (87.5 - 21.88) + 2 \cdot \frac{3.50}{2.125} \cdot 87.5 = 354.24 \text{ kgf/cm}^2$$

- **Mínimos de ( $\sigma_\theta$ ):** ocorrem quando  $\theta$  é  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , maior estabilidade devido a menores esforços tangenciais.

$$\sigma_{\theta G}'' = (67.70 - 203) + 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot 203 = 169.20 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{\theta k}'' = (21.88 - 87.5) + 2 \cdot \frac{2.125}{3.5} \cdot 203 = 180.88 \text{ kgf/cm}^2$$

#### 4.2.3. Avaliação da Condição de Estabilidade

Com valores máximos e mínios de  $\sigma_\theta$  encontrados, é possível definir a condição de estabilidade

- Garantimos a **estabilidade máxima** quando

$$\sigma'_\theta = \sigma''_\theta$$

Como os requisitos de estabilidade ( $\sigma'_\theta = \sigma''_\theta$ ) das galerias de acesso e produção não são atendidos, a necessidade de sustimento é clara.

### 4.3. Dimensionamento dos parâmetros dos sustimentos

Na fase anterior foi possível analisar o comportamento do maciço de gnaisse e de kimberlito, diante das aberturas feitas e se concluiu que é clara a necessidade de sustimento. Então, o passo a seguir é definir os parâmetros dos parafusos de ancoragem e revestimento de betão que garantam a estabilidade e segurança das aberturas.

#### 4.3.1. Parafusos de ancoragem

Considere:

Rocha do tecto	Gnaisse	Kimberlito
Largura da galeria	$L = 6 \text{ m}$	$L = 4.25 \text{ m}$
Densidade do tecto imediato	$\gamma = 2,9 \text{ t/m}^3$	$\gamma = 3.5 \text{ t/m}^3$
Distância entre filas de parafusos	$c = 1 \text{ m}$	$c = 1 \text{ m}$

### a. Comprimento dos parafusos

De acordo com a Equação (3.21), o comprimento do parafuso deve ser determinado.

$$l_G = \frac{6}{2} = 3 \text{ m}$$

$$l_K = \frac{4.25}{2} = 2.125 \sim 2 \text{ m}$$

Portanto, o comprimento mínimo recomendado para os parafusos nas galerias principais e de produção é 3 metros e 2 metros, respectivamente. Os parafusos devem suportar o peso estático do tecto, conforme ilustrado na **Fig. 3.19**.

### b. Número de parafusos

O número **m** de parafusos é encontrado mediante a Eq. (2.26 [2, p. 42]):

$$m \geq \frac{L \cdot h \cdot c \cdot \gamma}{R} \geq \frac{L \cdot h \cdot c \cdot \gamma \cdot n}{0.785\sigma_e \cdot d^2}$$

**Onde:**  $n$  = fator de segurança;  $\sigma_e$  = resistência ao escoamento do aço;  $d$  = diâmetro do parafuso, em centímetros.

Se considerarmos parafusos com **d = 2,5 cm** e feitos de **aço St. 37** ( $\sigma_e = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ ) e um fator de segurança **n = 2**, então o dimensionamento dos parafusos pode ser realizado substituindo os valores na equação.

$$m_G = \frac{6 \cdot 1.75 \cdot 1.0 \cdot 2.9 \cdot 2}{0.785 \cdot 24000 \cdot (0.025)^2} = 5.39 \sim 5$$

$$m_K = \frac{4.25 \cdot 1.75 \cdot 1.0 \cdot 3.5 \cdot 2}{0.785 \cdot 24000 \cdot (0.025)^2} = 4.42 \sim 4$$

### c. Densidade de parafusos

A densidade de parafusos  $m_o$  é calculada da seguinte forma:

$$m_o = \frac{m}{L \cdot c}$$

$$m_{oG} = \frac{6}{6 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 1/m^2$$

$$m_{ok} = \frac{4}{4,42 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 1/m^2$$

#### d. Espaçamento de parafusos

O espaçamento dos parafusos é determinado:

$$b_G = \frac{m_o}{c} = \frac{1}{1} = 1 \text{ m}$$

$$b_K = \frac{m_o}{c} = \frac{1}{1} = 1 \text{ m}$$

Devemos verificar o comprimento do parafuso em relação à carga máxima que o mesmo pode suportar:

$$R_{\max} = 0.785d^2\sigma_e$$

$$R_{\max} = 0.785 \cdot 24000 \cdot (0.03)^2 = 11,775 \text{ tf/m}^2$$

$$l_{\max} \leq \frac{R_{\max}}{b^2 \cdot \rho}$$

$$l_{G\max} = \frac{11.775}{(1.0)^2 \cdot 2.9} = 4.06 \text{ m}$$

$$l_{K\max} = \frac{11.775}{(1.0)^2 \cdot 3.5} = 3.36 \text{ m}$$

#### 4.3.2. Revestimento de Betão projectado

##### a. Resistência à Compressão do Betão

Utilizando as normas técnicas Turcas para a resistência do Betão [Tabela 2.2, p. 40], a resistência à compressão escolhida é de **225 kgf/cm<sup>2</sup>** após 28 dias. Este é o parâmetro central que define a qualidade do betão. Consideremos **boas condições de trabalho** ( $V = 0,15$ ) com **95% dos provetes aceitáveis** ( $t_0 = 1,645$ ). Então, a resistência média, conforme a Eq(2.26) citada no capítulo 2, p. 42 é:

$$\sigma_{av} = \frac{225}{1 - 1.645 \cdot 0.15} = 292,88 \rightarrow 300 \text{ kgf/cm}^2$$

Portanto, a resistência média ficou em 292,88 kgf/cm<sup>2</sup>, mas, como não há um valor definido em normas técnicas, escolhemos a resistência superior mais próxima, definida por normas técnicas de concepção de betão, 300 kgf/cm<sup>2</sup>.

### b. Relação água/cimento

Assim, o fator  $\alpha$  conforme apresentado por Bolomey, citado por Biron e Arioglu (1983)

$$300 = 180 \left( \frac{1}{\alpha} - 0,5 \right) \text{ kgf/cm}^2$$

$$300 = 180 \left( \frac{1}{\alpha} - 0,5 \right)$$

$$\alpha = 0.4515$$

### c. Dosagem de água

Considerada uma dosagem de **Mc = 350 kg/m<sup>3</sup>** para 1 m<sup>3</sup> de betão, a quantidade de água será:

$$M_a = 350 \times 0.4515 = 158 \text{ kg/m}^3$$

A condição de fluidez deve ser verificada. Considerando um módulo de finura de **4.73**, a quantidade água é ajustada em:

$$M_a = 74 (7 - 4.73) = 160$$

### d. Dosagem de agregados/inertes

Se  $\rho_c$  e  $\rho_i$  forem as densidades do cimento e do cascalho, respectivamente

$$\frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_i}{\rho_i} + \frac{M_a}{\rho_a} + V_{ar} = 1 \text{ m}^3$$

A quantidade de ar é considerada como **1%** e a quantidade de agregados é dada por:

$$\frac{350}{3.11} + \frac{M_i}{2.65} + 158 + 10 = 1000 \text{ l}$$

$$M_i = 1906,57 \rightarrow 1907 \text{ kg}$$

Para resumir, todos os constituintes para **1 m<sup>3</sup>** de betão são os seguintes:

- Cimento = 350 kg; Água = 158 kg; Agregado total = 1907 kg

Estes valores não são definitivos. Após os testes, devem ser feitas correções caso os resultados não atinjam uma resistência à compressão de **300 kgf/cm<sup>2</sup>**.

### e. Espessura do revestimento de betão para as galerias

Em condições normais de trabalho a espessura do shotcrete é dada pela Eq. (2.28, na p. 43):

$$t = 0.434 \frac{P \cdot r}{\tau}$$

A resistência ao corte do shotcrete é aproximadamente **0,2  $\sigma_b$**  (resistência à compressão de **300 kgf/cm<sup>2</sup>** ou **3000 tf/m<sup>2</sup>**). Sendo assim, o revestimento monolítico suporta cargas de cisalhamento em até **600 tf/m<sup>2</sup>**. Em obras subterrâneas, assumirmos um **fator de segurança de 3**, a resistência ao corte admissível será:

$$\tau_{sf} = \frac{0.2 \cdot \sigma_b}{F} = \frac{0.2 \cdot 3000}{3} = 200 \text{ tf/m}^2$$

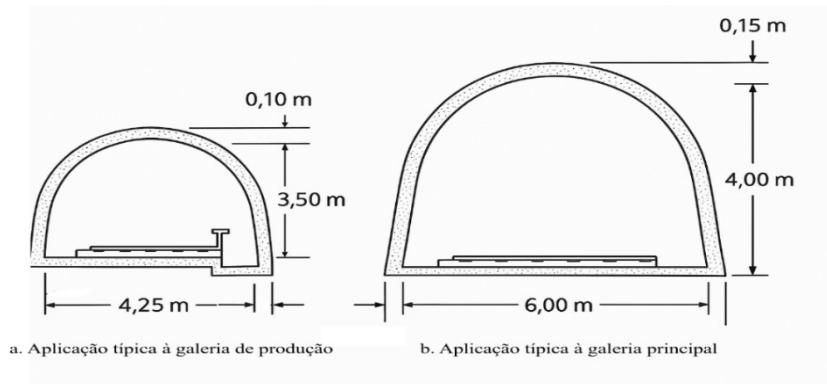
Para galerias de produção e principais com  $r_1 = 2,125 \text{ m}$  e  $r_1 = 3,0 \text{ m}$ , respectivamente:

$$t_1 = 0.434 \frac{18,37 \cdot 2.125}{200} = 0.10 \text{ m}$$

$$t_2 = 0.434 \frac{19,67 \cdot 3.0}{200} = 0.15 \text{ m}$$

A espessura do **betão** para a galeria de produção é de **0,10 m**, e para a galeria principal, é de **0,15 m**.

Figura 4.1 - Apresenta as aplicações típicas para as galerias de produção com 4,25 m de largura e galerias de fundo de poço com 6,0 m de largura na futura mina de Catoca, explorada pelo método de abatimento controlado



Fonte: Autor, 2025

**f. Espessura do revestimento de betão para o poço**

Assumindo  $\sigma_b = 300 \text{ kgf/cm}^2$  a resistência à compressão do revestimento, a espessura do revestimento segundo a Eq.(2.29 de Protodiakonov (p. 43), considerando um fator de segurança  $F = 2$

$$t = \frac{58 \cdot 250}{(300/2) - 58} + \frac{150}{(300/2)}$$

$$t = 158,61 = 160 \text{ cm}$$

## Capítulo 5 - Discussões de Resultados

### 5.1. Tensões na abertura do poço

#### 5.1.1. Tensões naturais

Os valores das tensões apresentados na Tabela 5.1 refletem o comportamento do maciço em profundidade. A profundidade exerce uma pressão considerável sobre o maciço, o que é esperado devido à sobrecarga das camadas superiores. O coeficiente de Poisson sugere uma resposta moderada à compressão, o que implica que o material se expandirá lateralmente sob pressão.

Tabela 5.1 – Tensões de confinamento no maciço.

Variável	Equação	Tensão [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Tensão vertical	$P = 0.1 \cdot \gamma \cdot H$	232
Tensão de confinamento	$Q = \frac{\nu \cdot P}{1 - \nu}$	77, 33

Esses resultados indicam que, a essa profundidade, o maciço estará sujeito a tensões significativas, o que exige sistemas de sustentação robustos para garantir a segurança operacional. Comparando com outras minas de profundidade similar, como as de **Cullinan** e **Ekati**, é possível confirmar que essas condições são comuns em operações subterrâneas e requerem monitoramento constante.

#### 5.1.2. Tensões induzidas e críticas

Conforme apresentado na Tabela 5.2, a tensão radial  $\sigma_r$  atinge o valor mínimo (zero) na periferia do poço, quando  $r=6$ , indicando que sua influência desaparece nesse ponto. Por outro lado, a tensão tangencial  $\sigma_\theta$  atinge o valor máximo, conforme dado pela equação  $\sigma_\theta = 2Q$ , evidenciando que a maior tensão ocorre ao longo da periferia do poço. Esses comportamentos são típicos em poços onde a distribuição das tensões depende da posição radial e do carregamento aplicado.

Tabela 5.2 Tensões induzidas e tensões críticas na periferia do poço

Variável	Equação	Tensão [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_r''$	$\sigma_r = Q \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right)$	0
$\sigma_\theta'$	$\sigma_\theta = Q \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$	154,66

### 5.1.3. Critério de ruptura e tensão de corte

A resistência ao corte do gnaisse é menor que a tensão de corte (Tabela 5.3), tornando necessário o suporte no poço principal para resistir aos esforços de corte. Para garantir segurança, exige-se um fator de segurança mínimo de 3, o que significa que o revestimento deve ter resistência ao corte 3 vezes maior que a tensão aplicada.

Tabela 5.3 Valores da análise do critério de ruptura Hoek Brown

Variável	Equação	Tensão [kg/cm <sup>2</sup> ]
Tensão de corte	$\sigma_c = \frac{\sigma_\theta' - \sigma_r''}{2}$	67,57
Resistência ao corte	$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan (\phi)$	26,75

## 5.2. Tensões na abertura de galerias

A uma profundidade de 700 m, o peso das camadas de gnaisse gera uma tensão vertical de 203 kgf/cm<sup>2</sup>, resultando numa tensão de confinamento (Q) de 77,33 kgf/cm<sup>2</sup>. Esses valores indicam as condições de alto pressão e confinamento associado à profundidade, o que exige sistemas robustos de sustentação para garantir a estabilidade da mina. No caso do kimberlito, a exploração a céu aberto está prestes a atingir os 600 m, como indicado na Figura 3.7, p. 57, com a camada acima das galerias de produção a 250 m, funcionando como pilar de transição (Figura 3.10 p. 59).

Tabela 5.4 Tensões iniciais no maciço rochoso

Tensão [kg/cm <sup>2</sup> ]	Galerias principais	Galerias de Produção
Pressão vertical	203	87,50
Tensão de confinamento	77,33	21,88

### 5.2.1. Identificação das regiões críticas

O maior risco de ruptura nas galerias ocorre nas laterais da cavidade, devido à alta influência da tensão tangencial, que atinge 676 kgf/cm<sup>2</sup>. Essa alta tensão tangencial nas laterais pode levar a falhas estruturais se não for devidamente controlada. Para garantir a estabilidade das galerias principais no maciço de gnaisse, é necessário que as tensões tangenciais máximas e mínimas se igualem, o que não é este caso, tornando óbvio que a necessidade sustento é clara, conforme ilustra a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Identificação das regiões críticas e tensões tangenciais máximas e mínimas

Região Crítica ( $\sigma_\theta$ )	Gnaisse kgf/cm <sup>2</sup>	Kimberlito kgf/cm <sup>2</sup>
0° - 180°	676.63	354.24
90° - 270°	169.20	180.88

### 5.2.1. Pressão total sobre as galerias

Conforme a Tabela 5.6, a pressão total atuante no maciço de Gnaisse é de 19,67 tf/m<sup>2</sup>, enquanto no Kimberlito é ligeiramente inferior, com 18,37 tf/m<sup>2</sup>. Estas diferenças resultam das variações nas alturas críticas e tensões verticais, influenciando o comportamento mecânico e a estabilidade dos maciços.

Tabela 5.6 - Análise da Pressão total sobre as galerias pelo Modelo de Protodiakonov

Parâmetro	Equação	Maciço de Gnaisse	Maciço de Kimberlito
Coef. de resistência	$f = \sigma_c/100$	17,34	11,22
Altura crítica, m	$h = I/f$	0,173	0,189

Tensão vertical, tf/m <sup>2</sup>	$P_v = h \cdot \gamma$	4,92	6,48
Carga total, kN/m	$q_t = P_v \cdot a$	48,27	63,57
Pressão total ( $P_t$ ), tf/m <sup>2</sup>	$P_t = \frac{4}{3} \cdot l \cdot h \cdot a \cdot \gamma$	19,67	18,37

### 5.3. Dimensionamento dos parâmetros de sustimentos

#### 5.3.1. Parafusos de Ancoragem

##### a. Comprimento de parafusos

O dimensionamento dos parafusos de ancoragem foi definido em função das larguras das galerias, sendo 3 metros nas galerias de produção e 6 metros nas galerias principais. Assim, determinou-se o uso de parafusos de 2 metros para as galerias de produção e de 3 metros para as galerias principais. Estes comprimentos são adequados para garantir o ancoramento em zonas de maciço menos fraturado.

##### b. Número de parafusos necessários

Os parafusos de ancoragem são fabricados em aço St. 37, com limite de escoamento de 2400 kgf/cm<sup>2</sup>. Para garantir a estabilidade, são aplicados 5 parafusos no tecto das galerias principais e 4 nas galerias de produção, com densidade de instalação de 1 parafuso por metro quadrado em malha 1 × 1 m. Cada parafuso suporta uma carga máxima de 11,775 tf/m<sup>2</sup> antes de atingir o escoamento, assegurando a resistência necessária para suportar as tensões actuantes nas galerias.

A verificação da estabilidade é feita em função da **carga máxima**, do **comprimento real** e do **comprimento máximo**, conforme apresentado na Tabela 5.7

Tabela 5.7 - Verificação dos comprimentos dos parafusos de ancoragem

Parafuso aço St. 37	Comprimento real ( $l$ )	Comprimento Máx ( $l_{max}$ )
P/gnaisse	3	4.06
P/Quimberlito	2	3.36

O comprimento real de 3,0 m é menor do que 4,06 m, o comprimento é considerado seguro para as galerias principais situadas nas encaixantes. Por outro lado, nas galerias de produção o comprimento real de 2,125 é menor que 3,36, portanto, bastante seguro.

### **5.3.2. Dimensionamento do revestimento monolítico do Poço e Galerias**

#### **a. Resistência à Compressão do Betão**

Com base numa resistência de 225 kgf/cm<sup>2</sup>, a resistência média ajustada ( $\sigma_{av}$ ) foi calculada em 292,88 kgf/cm<sup>2</sup>, considerando um coeficiente de variação de 0,15 e um nível de confiança de 95%. Este ajuste garante que 95% dos provetes satisfaçam a resistência mínima exigida. Para reforçar a segurança do projecto, adotou-se uma resistência média de 300 kgf/cm<sup>2</sup>, em conformidade com a Tabela 2.2 p. 40, assegurando a fiabilidade do betão mesmo perante variações nas condições de execução.

#### **b. Dosagem dos constituintes do Betão**

Para atingir a resistência média de 300 kgf/cm<sup>2</sup>, a proporção ideal água/cimento foi determinada em  $\alpha = 0,4515$ , indicando uma relação relativamente baixa. Este valor assegura um equilíbrio adequado entre resistência e trabalhabilidade do betão, garantindo fluidez suficiente sem comprometer a sua performance estrutural.

Tabela 5.8 Dosagem de constituintes de betão

Variável	Equação	Resultado
Quantidade de cimento ( $M_a$ )	Padrão	350
Quantidade de água ( $M_a$ )	$M_a = M_c \times \alpha$	200
Quantidade de inerte ( $M_i$ )	$M_i = \rho_i(1 - V_{ar} - V_a - V_c)$	1907

#### **c. Espessura do revestimento de betão para as galerias**

A resistência ao corte do shotcrete foi considerada como 20% da resistência à compressão de 3000 tf/m<sup>2</sup>. Aplicando um factor de segurança de 3, obteve-se uma resistência ao corte admissível de 200 tf/m<sup>2</sup>. Este valor garante que o shotcrete resistirá às tensões de corte actuantes nas galerias, assegurando a sua estabilidade com uma margem de segurança adequada.

- Para a galeria de produção (raio  $r_1 = 2,125$  m), a espessura calculada foi de 0,10 m.

- Para a galeria principal (raio  $r_2 = 3,0$  m), a espessura calculada foi de 0,15 m.

**d. Espessura do Revestimento de betão para o poço**

A pressão horizontal sobre o revestimento do poço foi calculada em 58 kgf/cm<sup>2</sup>, considerando a profundidade de 800 metros, a densidade da formação de 2,9 t/m<sup>3</sup> e o coeficiente de Poisson de 0,25. Este valor serviu de base para o dimensionamento da espessura do revestimento, utilizando a fórmula de Protodiakonov, assegurando a resistência necessária para suportar os esforços actuantes.

## **Conclusão**

No presente trabalho, os objetivos específicos propostos foram alcançados, permitindo uma compreensão abrangente das condições geomecânicas e da estabilidade das escavações na mina em estudo.

Primeiramente, o maciço rochoso foi caracterizado por meio de parâmetros geomecânicos, utilizando métodos como o Índice de Resistência Geológica (RMR) e o Sistema Geomecânico de Classificação (SGI), além da avaliação da resistência e de outras propriedades relevantes. Essas análises forneceram uma base sólida para a compreensão do comportamento do maciço rochoso. Em seguida, a estabilidade das escavações foi analisada com base em critérios de ruptura, utilizando o critério de Mohr Coulomb para validar os resultados. Essa etapa permitiu identificar áreas críticas e avaliar os riscos associados à instabilidade do maciço. Por fim, foram dimensionados os sistemas de suporte, considerando as condições geológicas e operacionais específicas da mina. Os suportes principais foram implementados nas áreas críticas, com destaque para o uso de parafusos de ancoragem e concreto projetado, garantindo a segurança e a estabilidade das escavações.

Dessa forma, os objetivos propostos foram cumpridos, contribuindo para a otimização das operações de escavação e suporte na mina, com base em uma análise geomecânica robusta e criteriosa.

## Recomendações

Com base nos resultados obtidos, propõem-se as seguintes recomendações para optimizar a segurança e eficiência das operações na mina:

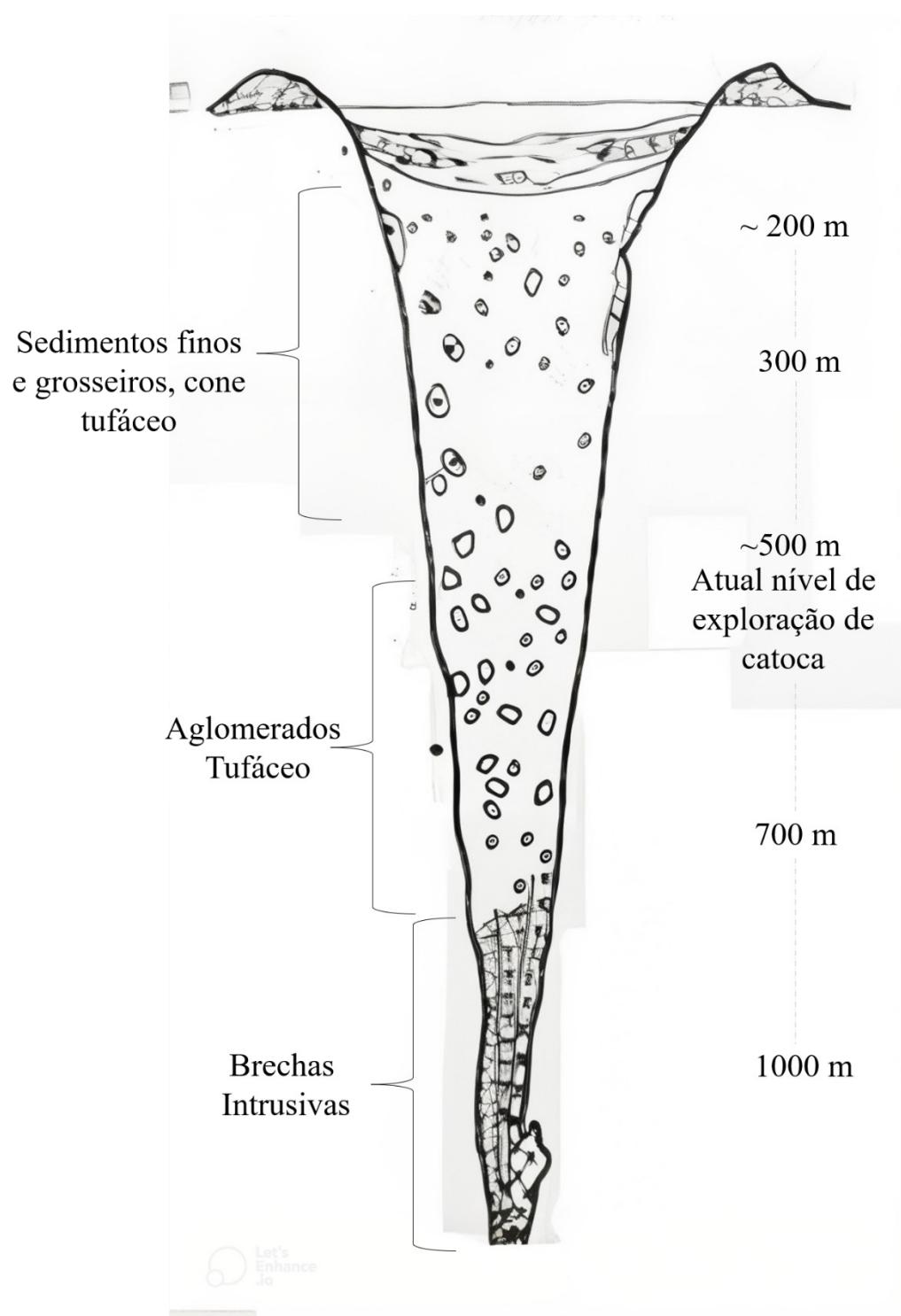
- ✓ **Monitorização contínua do maciço rochoso:** Implementação de um sistema de monitorização geotécnica, utilizando instrumentação como extensómetros e piezómetros, para acompanhar as deformações e o comportamento do maciço rochoso ao longo do tempo. A monitorização real no terreno permitirá validar e ajustar os parâmetros usados no modelo.
- ✓ **Reavaliação periódica dos parâmetros geomecânicos:** Recomenda-se a reavaliação regular dos parâmetros geomecânicos, como RMR, SGI e RQD, especialmente em áreas onde as condições geológicas ou operacionais possam ter mudado. Esta reavaliação deve ser baseada em dados actualizados e recolhidos directamente no campo.
- ✓ **Aperfeiçoamento dos sistemas de sustimento:** Embora os sistemas de sustimento actuais tenham sido dimensionados adequadamente, sugere-se que novas tecnologias, como parafusos autoperfurantes ou fibras de reforço no betão projectado, sejam testadas e incorporadas. A aplicação destas inovações pode ser melhor avaliada com base em observações de campo.
- ✓ **Estudos complementares:** Para as áreas críticas identificadas, recomenda-se a realização de estudos complementares, como modelações numéricas avançadas ou ensaios laboratoriais adicionais, para uma melhor compreensão do comportamento do maciço rochoso. Estes estudos devem ser realizados com dados actualizados e baseados em informações geotécnicas recolhidas no terreno.

## Referências bibliográficas

1. AUGUSTO, Paulino. *Apontamentos da disciplina de Operações Mineiras 3.* Universidade Agostinho Neto, 2022. Material não publicado.
2. BALAO, N.C.C., PINHO, A.B. e DUARTE, I.M.R., 2022. *Características geotécnicas das rochas encaixantes da Chaminé kimberlítica de Catoca (Angola).* In: SILVA GOMES, J.F., ANTÓNIO, C.C., AFONSO, C.F. e MATOS, A.S., eds. *Atas do Congresso sobre Engenharia Geotécnica Aplicada.* Porto: INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 28 de Setembro de 2022.
3. BIRON, Cemal; ARIOGLU, Ergin. *Design of Supports in Mines.* New York: John Wiley & Sons, 1983.
4. COATES, Donald Franklin; COCHRANE, Thomas Samuel. *The Use of Rock Bolting: Research and Design Specifications.* Canadian Mining Journal, Março, 1971.
5. DIAS, José. *Apontamentos da disciplina de Técnicas de exploração subterrânea.* Universidade Agostinho Neto, 2022. Material não publicado.
6. HARTMAN, Howard Lloyd; MUTMANSKY, Jan Martin. *Introductory Mining Engineering.* 2.<sup>a</sup> edição. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
7. HOEK, Edward; KAISER, Peter Klaus; BAWDEN, William Francis. *Support of Underground Excavations in Hard Rock.* Rotterdam: A.A. Balkema, 1995.
8. HUSTRULID, William A.; BULLOCK, Richard L. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies.* Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2001. ISBN 978-0-87335-193-5
9. PAULINO, Augusto. *Apontamentos da disciplina de Operações Mineiras 3.* Universidade Agostinho Neto, 2023. Material não publicado.
10. SOCIEDADE MINEIRA DE CATOCA. *Relatório de Sustentabilidade 2022.* Saurimo: Catoca, 2023. Disponível em: <https://www.catoca.com>. Acesso em: 24 abr. 2025.
11. STEPHANSSON, Ove. *Fundamentals of Rock Joints.* Rotterdam: A.A. Balkema, 1981.
12. THOMAS, Leslie James. *An Introduction to Mining.* [S.l.]: Methuen & Company, 1951
13. UNIVERSIDADE DE LISBOA. Instituto Superior Técnico. *Extended Abstract – Estudos de transição de lavra em Catoca.* Lisboa, 2019.

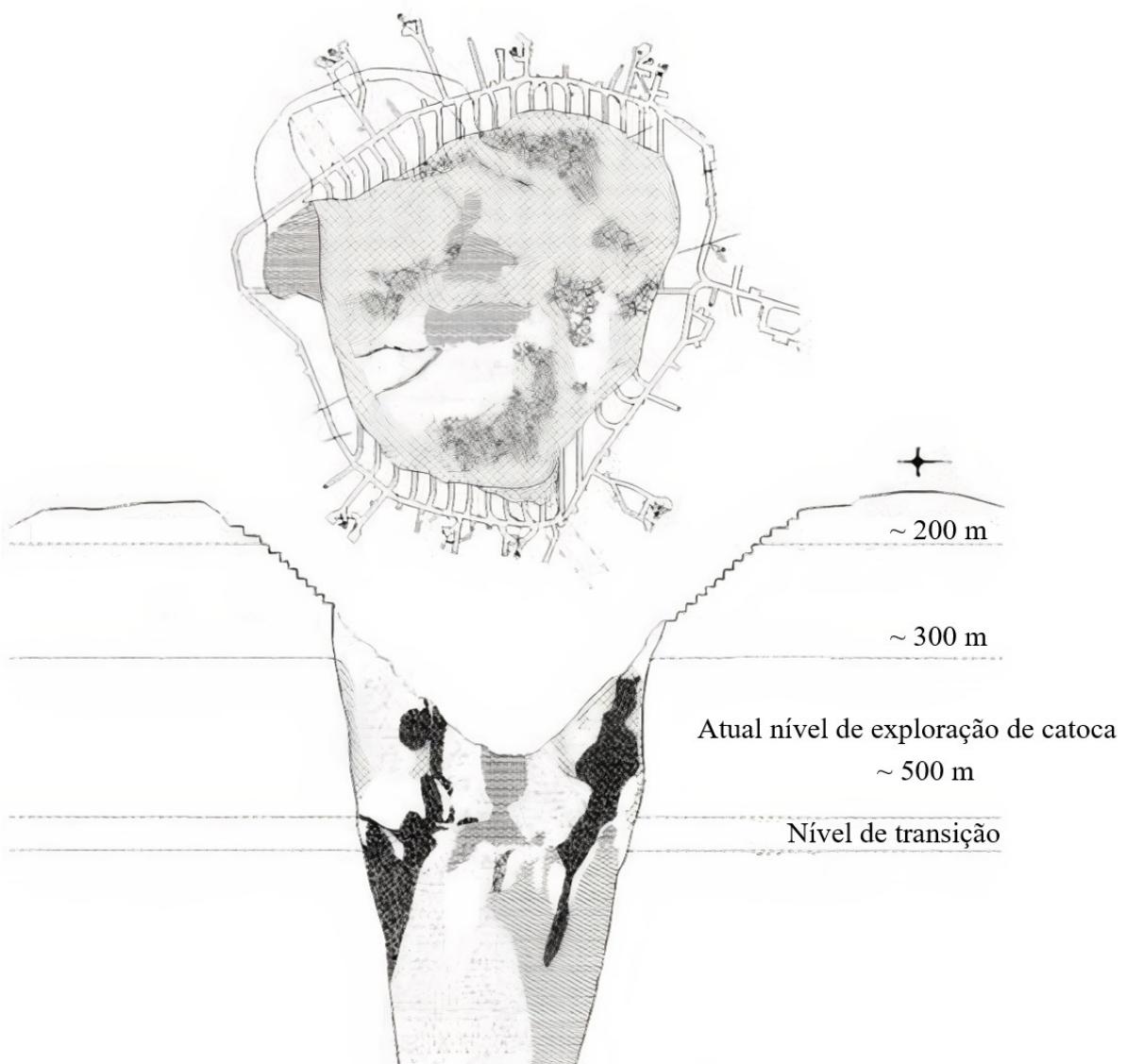
## APÊNDICES

Figura A1 – Chaminé Kimberlítica



Fonte: Autor, adaptado de Gemas do Brasil, 2025

Figura A2 – Planta superior e de perfil do esquema de transição



Fonte: Autor, adaptado de Hustrulid e Bullock, 2025