



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



BRUNA DE OLIVEIRA GOMES

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE MONITORAMENTO  
EM ANCORAGENS DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM  
MINERAÇÃO

OURO PRETO

2019

BRUNA DE OLIVEIRA GOMES

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE MONITORAMENTO  
EM ANCORAGENS DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM  
MINERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Estabilidade de escavações subterrâneas

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

OURO PRETO

2019

G633a Gomes, Bruna de Oliveira.  
Análise comparativa dos resultados de monitoramento em ancoragens de escavações subterrâneas em mineração [manuscrito] / Bruna de Oliveira Gomes. - 2019.

56f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minas e mineração - Monitoramento. 2. Lavra subterrânea. 3. Ancoragem (Engenharia de estruturas). I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.286

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

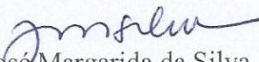
Aos 09 dias do mês de julho de 2019, às 15h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE MONITORAMENTO EM ANCORAGENS DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM MINERAÇÃO**”, pela aluna **Bruna de Oliveira Gomes**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Margarida da Silva (orientador)**, **Prof. M. Sc. José Fernando Miranda e Eng.ª de Minas Ana Luísa Costa Fiorito**.

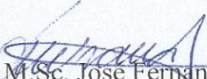
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO** da candidata, com a nota **9,0** concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

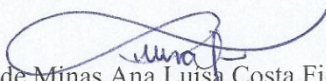
A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

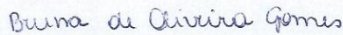
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

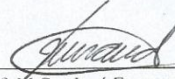
Ouro Preto, 09 de julho de 2019.

  
Prof. Dr. José Margarida da Silva  
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Eng.ª de Minas Ana Luísa Costa Fiorito  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Bruna de Oliveira Gomes

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente aos meus pais e meus irmãos por todo apoio e confiança, por acreditarem no meu potencial e estarem ao meu lado a cada decisão tomada.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Margarida da Silva pela enorme paciência e pelos ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Romério Rômulo e José Fernando, pela amizade, longas conversas e conselhos que levarei pra vida.

Aos meus grandes amigos, que a universidade me proporcionou, e o pessoal da melhor casa, por todo suporte e momentos inesquecíveis.

À Olga, pela eterna paciência e orientações que me fizeram enfrentar todas as dificuldades.

Aos funcionários do DEMIN, por proporcionarem um ambiente propício para os estudos e pelas conversas na correria do dia a dia.

Aos mestres que compartilharam todo conhecimento e experiência ao longo desses anos para minha formação profissional.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino gratuito e de qualidade.

A todos que contrubuíram para minha formação acadêmica ao longo da vida.

## RESUMO

As tensões *in situ* presentes no maciço rochoso são redistribuídas em torno de uma abertura subterrânea, causando alívio e concentração de pressão, podendo desestabilizar a escavação e provocar um colapso da mina. Para o bom desenvolvimento, das explorações mineiras subterrâneas, é necessário um controle rigoroso de estabilidade das escavações, sendo, muitas das vezes, exigidas técnicas e procedimentos de sustentação das aberturas. Para isso, existem diversos dispositivos e processos voltados para estabilizar cada tipo de deformação das paredes da abertura. Diante deste universo de alternativas, este trabalho busca estudar os métodos mais usuais de sustentação de aberturas subterrâneas, dando um enfoque especial nas técnicas de ancoragem, ressaltando suas características e vantagens, estudando parâmetros como capacidade de carga, trecho de ancoragem, diâmetro do parafuso e aditivos na argamassa. Uma forma de monitorar o maciço rochoso para acompanhar suas alterações e a efetividade da aplicação de algum método de sustentação, é por meio do teste de arrancamento, que determina a capacidade de carga da ancoragem. Sendo assim, neste estudo, foi realizada uma análise comparativa dos resultados deste monitoramento. Os resultados obtidos indicam que a capacidade de carga depende principalmente das propriedades mecânicas da argamassa utilizada, que podem ser alteradas a fim de aumentar a capacidade de carga do parafuso.

**Palavras-chave:** parafuso de ancoragem, teste de arrancamento, monitoramento, ancoragem com argamassa, escavação subterrânea, capacidade de carga.

## **ABSTRACT**

In situ stresses present in the rockmass are redistributed around an underground opening, causing pressure relief and concentration, which may destabilize the excavation and cause a collapse of the mine. For a proper development of underground mining operations, strict control of the stability of the excavations is required, and techniques and procedures for sustaining the openings are often required. For this, there are various devices and processes to stabilizing each type of deformation of the opening walls. On this variety of alternatives this work seeks to study the most common methods of support of underground openings, giving a special focus on the anchoring techniques, highlighting its characteristics and advantages, studying parameters such as load capacity, embedded length of the bolt, diameter of the bolt and additives on the grout. Thus, in this study, a comparative analysis of the results of this monitoring was performed. The results indicate that the load capacity depends mainly on the mechanical properties of the grout used, which can be altered in order to increase the bolt capacity.

**Keywords:** anchor bolt, pull out test, monitoring, grouted rockbolt, underground excavation, load capacity.

## LISTA DE NOTAÇÕES

$a/c$  – Relação água/cimento

$A_b$  – Área superficial do parafuso

$D_b$  – diâmetro do parafuso

$L_b$  – Comprimento do parafuso ancorado

$P_b$  - Capacidade de carga do parafuso

$\tau_b$  – Força de adesão

$\tau_g$  - Resistência ao cisalhamento



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Redistribuição das tensões <i>in situ</i> e deslocamento radial associado..	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 2: Exemplo de suporte compressível, o arco.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 3: Exemplo de suporte rígido, o parafuso. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 4: Esteios de madeira. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5: Estrutura geral para avaliação de risco de queda do teto e gerenciamento de risco. .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6: Representação dos arcos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 7: Representação da cinta. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 8: Aplicação de concreto projetado.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 9: Tela de arame soldado.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 10: Tela de arame.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 11: Tela não metálica. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 12: Principais sistemas de ancoragens. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 13: Instalação manual de parafuso.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 14: Principais ancoragens mecânicas pontuais.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 15: Elementos do parafuso de coquilha. ....	32
Figura 16: Elementos do parafuso de cunha. ....	33
Figura 17: Elementos do parafuso <i>Split Set</i> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 18: Elementos do parafuso <i>Swelllex</i> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 19: Tempo de bombeamento de acordo com a relação água/cimento. ..	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 20: Configuração típica de ancoragem com argamassa de resina. .	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 21: Representação de uma cordoalha.....	40
Figura 22: Métodos de aplicação da argamassa de cimento em um furo ascendente.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 23: Elementos principais do equipamento. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 24: Equipamento para os testes de arrancamento. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 25: Resultados dos testes de arrancamento com diferentes parafusos. ..	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 26: Fragmentos plásticos com e sem aditivos. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características da argamassa com diferentes relações água/cimento.....	38
Tabela 2: Influência do diâmetro e área do parafuso na capacidade máxima .....	48
Tabela 3: Influência do comprimento ancorado e área do parafuso na capacidade máxima ...	48
Tabela 4: Influência do comprimento ancorado na capacidade máxima .....	48
Tabela 5: Capacidade de carga do parafuso de acordo com diâmetro do furo e argamassa utilizada. ....	49
Tabela 6: Influência da relação a/c na carga máxima do parafuso. ....	49
Tabela 7: Influência da relação a/c na carga máxima do parafuso. ....	50
Tabela 8: Influência dos aditivos e tempo de cura na carga máxima. ....	50
Tabela 9: Carga máxima com e sem aditivo. ....	51

## SUMÁRIO

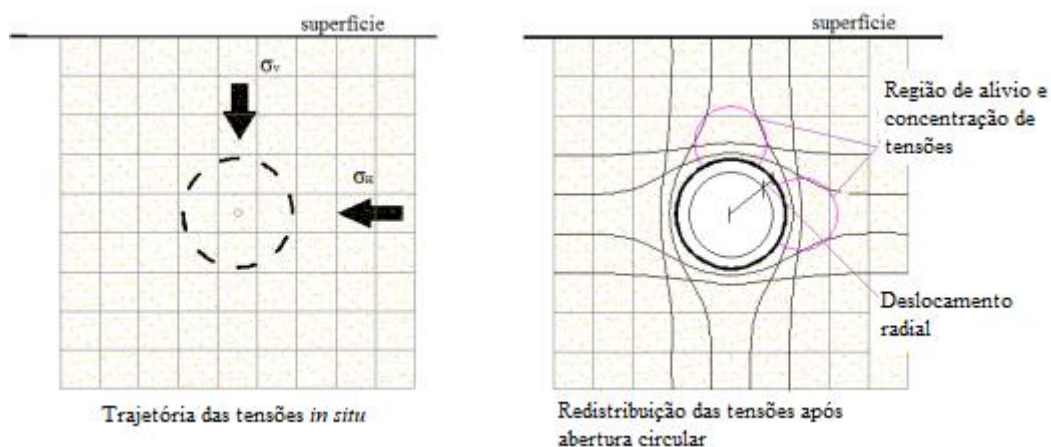
1	INTRODUÇÃO .....	13
2	OBJETIVOS .....	14
2.1	Objetivo geral .....	14
2.2	Objetivos específicos .....	14
3	METODOLOGIA .....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
4.1	Terminologia para os sistemas de sustentação .....	17
4.1.1	Suporte e reforço .....	17
4.1.2	Classificação dos suportes e reforços .....	18
4.1.3	Suportes rígidos e compressíveis .....	18
4.2	História dos métodos de sustentação .....	19
4.3	Controle de riscos .....	21
4.4	Tipos de sustentação .....	22
4.4.1	Arcos (ou cambotas) .....	23
4.4.2	Cinta ( <i>strap</i> ) .....	24
4.4.3	Concreto projetado ( <i>shotcrete</i> ) .....	24
4.4.4	Telas ( <i>mesh</i> ) .....	26
4.4.5	Sistemas de ancoragem .....	28
5	ANÁLISE DAS TÉCNICAS DE ANCORAGENS .....	31
5.1	Ancoragens mecânicas pontuais .....	31
5.1.1	Parafuso de coquilhas ( <i>expansion shell bolt</i> ) .....	32
5.1.2	Parafuso de cunha ( <i>slot and wedge bolt</i> ) .....	33
5.2	Ancoragens mecânicas em coluna total (por fricção) .....	33
5.2.1	Parafuso <i>Split Set</i> (cavilhas de atrito ou estabilizadores) .....	34
5.2.2	Parafuso <i>Swellex</i> .....	35
5.3	Ancoragem química (com argamassa) .....	36
5.3.1	Parafuso com argamassa de cimento .....	37
5.3.2	Parafuso com resina .....	38
5.4	Cabos ( <i>cable bolt</i> ) .....	40

6	TESTE DE ARRANCAMENTO ( <i>pull out test</i> ) .....	42
6.1	Preparação .....	43
6.2	Equipamento e funcionamento .....	44
7	CAPACIDADE DE CARGA DOS PARAFUSOS .....	46
7.1	Características do parafuso.....	47
7.2	Propriedades mecânicas da argamassa.....	49
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	53
9	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

## 1 INTRODUÇÃO

Um maciço rochoso dificilmente será contínuo, homogêneo ou isotrópico. Geralmente apresenta grande quantidade de descontinuidades e uma variedade de materiais que podem ter sofrido diferentes graus de alteração. Sendo assim, a determinação da resistência do maciço dependerá das propriedades da rocha intacta e das descontinuidades, afetando diretamente a estabilidade de uma escavação subterrânea (HOEK *et al.*, 1995)

Ao realizar uma escavação subterrânea, as tensões existentes no maciço são redistribuídas em torno da abertura. Uma forma de representar esses esforços é através de linhas imaginárias em torno do corpo solicitado, representado na Figura 1. Esta redistribuição causa concentração e alívio de pressão em torno da abertura, podendo provocar um colapso da mina. (HOEK & BROWN, 1997, *apud* GONTIJO, 2017).



**Figura 1: Redistribuição das tensões in situ e deslocamento radial associado.**

**Fonte: Adaptado de Gontijo, 2017.**

Caso as características geomecânicas do maciço não forem suficientes para recuperar o equilíbrio e estabilizar a escavação, é necessária aplicação de uma pressão interna na abertura através de um sistema de sustentação (GONTIJO, 2017).

Tais sistemas podem ser utilizados como suporte, que inclui técnicas e dispositivos como madeira, concreto projetado e telas, ou como reforço, por meio de técnicas como parafusos de rocha e cabos (BRADY e BROWN, 2006).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

- Estudar os controles das técnicas de sustentação de minas subterrâneas, mediante comparação de casos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Estudar os métodos de ancoragens mais usuais;
- Analisar caso a caso a capacidade de carga dos parafusos, baseando-se nos resultados de testes de arrancamento;
- Comparar as variáveis que afetam a capacidade de carga, visando delinear as mais recomendadas no quesito segurança.

### 3 METODOLOGIA

O trabalho consiste em uma revisão bibliográfica para estudo das técnicas de sustentação de mina subterrânea com ênfase em parafusos e sua capacidade de carga, através de estudos de caso.

A primeira etapa do trabalho consistiu na pesquisa de artigos e dissertações que abordam o tema em alguns periódicos, através de palavras-chave relacionadas a ele. A análise dos materiais encontrados foi feita através da revisão bibliográfica sistemática utilizando o *software* de gestão de referências, Mendeley. Para a seleção dos artigos, deu-se preferência àqueles que relataram testes de arrancamento (*pull out test*) para que pudesse ser feita a comparação dos resultados.

Posteriormente, foi feito um levantamento bibliográfico de livros, artigos ou dissertações que possuíssem informações para construção de uma base teórica sobre o tema, apresentando o histórico geral dos métodos de sustentação e dos parafusos, conceitos utilizados, avaliação dos riscos e os tipos de sustentação mais utilizados em uma abertura subterrânea.

Com as informações obtidas, foi realizado um estudo mais específico sobre os métodos de ancoragens e os parafusos utilizados, explicando seu funcionamento e ressaltando suas vantagens e desvantagens. Também foram apresentados sucintamente os procedimentos, equipamentos utilizados e funcionamento do teste de arrancamento.

Fez-se uma análise comparativa dos dados dos trabalhos escolhidos na primeira etapa para serem utilizados como estudo de caso. Seguidamente foram apresentados e discutidos os resultados com intuito de comparar as variáveis que afetam a capacidade de carga dos parafusos.

#### 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Os métodos de sustentação de escavações subterrâneas foram, por séculos, externos e passivos. Luo (1999) lembra que desde o primeiro uso do parafuso de cunha em 1927, os parafusos tornaram-se o sistema de suporte mais importante na mineração. Além de ser o método de sustentação mais econômico, é mais eficiente por poder ser um suporte ativo, utilizando a rocha para se sustentar e aplicando esforços internos, atendendo satisfatoriamente uma variedade de condições geológicas e condições de sustentação.

As ancoragens são utilizadas como reforço, unindo a massa rochosa descontínua, fraturada ou laminada, impedindo movimentos e forçando-a a se sustentar. Devido a isso, este método pode ser utilizado em minas e túneis de qualquer tipo de rocha (KILIC *et. al*, 2002, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

O desempenho do sistema de ancoragem na rocha pode ser medido através de teste de arrancamento. Diferentes sistemas, mecânicos, por fricção ou com argamassa, são testados e os resultados obtidos são analisados de forma a definir o melhor tipo de ancoragem e suas características para cada tipo de rocha (KRISTJÁNSSON, 2014).

Para atender a requisitos específicos de suporte e configurações geológicas únicas, vários tipos de parafusos foram desenvolvidos. No entanto, quando são encontrados problemas com os sistemas de suporte de parafusos, é muito difícil e requer considerável perícia para determinar se os problemas são causados por condições geológicas ou práticas de instalação inadequadas. O diagnóstico rápido e correto das causas permitirá ao responsável técnico pela abertura tomar as medidas corretivas apropriadas para evitar que o mesmo problema se repita, minimizando assim futuros problemas potenciais de controle de terreno (LUO, 1999).

Com a finalidade de contextualizar o tema do trabalho, esse capítulo apresenta uma revisão baseada na literatura sobre o conteúdo abordado.



## **4.1 Terminologia para os sistemas de sustentação**

Toda abertura de mina subterrânea está suscetível à instabilidade da rocha que a compõe, sendo uma constante ameaça à segurança tanto dos trabalhadores quanto dos equipamentos. De forma a evitar acidentes, é necessário entender as causas das instabilidades e traçar medidas que possam minimizar ou até mesmo eliminar tais transtornos.

De acordo com Hoek (1995), há duas escalas que comprometem a estabilidade. A primeira, denominada escala da mina, envolve todo o corpo, infraestrutura da mina e massa rochosa circundante. Já a segunda, escala local, se limita às rochas nas proximidades das aberturas subterrâneas. Essa, em geral, é a principal preocupação no projeto de suporte.

### **4.1.1 Suporte e reforço**

O termo suporte é amplamente usado para descrever os procedimentos e materiais usados para melhorar a estabilidade e manter a capacidade de transporte de carga das rochas perto dos limites das escavações subterrâneas. O objetivo primário da prática de sustentação é mobilizar e conservar a força inerente da massa rochosa para que ela se torne autossustentável (BRADY e BROWN, 2006).

De acordo com a prática moderna, particularmente na Austrália, será feita uma distinção entre os termos suporte e reforço, usando as definições introduzidas por Windsor e Thompson (1993, *apud* Brady e Brown, 2006). O suporte é a aplicação de uma força reativa para a superfície de uma escavação e inclui técnicas e dispositivos como madeira, aterro, concreto projetado, tela e conjuntos de aço ou concreto ou revestimentos. Reforço, por outro lado, é um meio de conservar ou melhorar as propriedades gerais da massa rochosa de dentro da massa rochosa por meio de técnicas como parafusos e cabo (BRADY e BROWN, 2006).

#### **4.1.2 Classificação dos suportes e reforços**

Já foi costume descrever formas de sustentação como temporárias ou permanentes. Sustentação temporária era o suporte ou reforço instalado a fim de garantir condições seguras de trabalho durante a mineração. O suporte permanente era posteriormente instalado, sendo necessário ou não a remoção parcial ou total do suporte temporário, caso fosse exigido a permanência da abertura por um longo período de tempo. Atualmente os suportes permanentes são classificados como primário ou secundário. O suporte primário ou reforço é aplicado durante ou imediatamente após a escavação, para garantir condições seguras de trabalho durante a escavação subsequente e para iniciar o processo de mobilização e conservação da resistência da massa rochosa. Qualquer suporte adicional ou reforço aplicado em um estágio posterior é considerado secundário (BRADY e BROWN, 2006) ou mesmo terciário.

Há também a classificação dos suportes como ativos ou passivos. O suporte ativo, descrito como tirante, no caso das ancoragens, impõe uma carga pré-determinada à superfície da rocha no momento da instalação, sendo geralmente indispensável quando é necessário sustentar as cargas de gravidade impostas por blocos de rochas individuais ou por rocha solta. O suporte passivo, não é instalado com um carregamento aplicado, mas desenvolve as suas cargas à medida que a massa rochosa se deforma. Tais parafusos, no caso das ancoragens, são denominados cavilhas (BRADY e BROWN, 2006).

#### **4.1.3 Suportes rígidos e compressíveis**

Relacionando à deformabilidade, os suportes podem ser considerados rígidos ou compressíveis. Os denominados rígidos são suscetíveis de sofrer apenas deformações muito limitadas, de natureza elástica e plástica dos materiais, constituindo, portanto, estruturas praticamente indeformáveis. Os suportes compressíveis são caracterizados por deformar intensamente quando as cargas a que são submetidos atingirem determinados valores (SILVEIRA, 1987). As Figuras 2 e 3 representam, respectivamente, suporte compressível e rígido.



**Figura 2: Exemplo de suporte compressível, o arco.**

**Fonte: Encyclopædia Britannica, S.D.**



**Figura 3: Exemplo de suporte rígido, o parafuso.**

**Fonte: Bulletin, 2017.**

## **4.2 História dos métodos de sustentação**

As primeiras escavações, segundo Lane (2018), possivelmente foram iniciadas na pré-história, na busca pela ampliação das cavernas. Com o tempo, as civilizações antigas foram desenvolvendo métodos de abertura de túneis para irrigação ou passagem de pedestres, como foi feito na Babilônia.

De acordo com Martins (2017), a necessidade de extrair minerais surgiu com o caráter sedentário e agrícola assumidos pelas civilizações. Muitos túneis e galerias escavados foram suportados com vigas e esteios de madeira, surgindo assim, a necessidade de desenvolver métodos de sustentação nas escavações subterrâneas. Na época de colônias na América do Sul, muitas minas metálicas foram suportadas com arcos de pedra e esteios de madeira, como mostrado na Figura 4.



**Figura 4: Esteios de madeira.**

**Fonte: Underground miners, S.D.**

**Fotografo: John Horgran**

A partir do material calcário, foi desenvolvida em 1824 a pedra artificial, atualmente chamado de concreto, que foi utilizada como elemento de suporte na construção de túneis. Em 1910, foi apresentado o “*cementgun*”, um equipamento pneumático para transporte de mistura de cimento e areia que recebe água no terminal de projeção. Esse *spray* de argamassa, criado pela empresa Allentown da Pensilvânia, pode ser considerado o precursor do concreto projetado. No fim da década de 20 do século XX, os suportes com aço predominaram nos Estados Unidos. Depois da última guerra mundial, surgiram os esteios hidráulicos e que permitiram as modernas concepções de sistemas de suportes automarchantes que, acompanhando o avanço das frentes de desmonte, tornaram possíveis nestes, uma mecanização praticamente total. Nas últimas décadas, notou-se uma forte tendência da substituição dos escoramentos de madeira por suportes metálicos (MARTINS, 2017).

Nos últimos anos as técnicas de sustentação em escavações subterrâneas apresentaram uma grande evolução, tendo-se em vista a demanda por estruturas cada vez mais baratas, resistentes, de fácil instalação e que apresentem uma redução da área escavada (SILVA *et al.*, 1998).

Por conta da necessidade de escavações subterrâneas de grande porte e maior velocidade, as pesadas estruturas de aço e espessas paredes de concreto armado não apresentavam vantagens. Foi quando surgiram sistemas baseados na ancoragem, que são constituídos por uma combinação de tirantes, chumbadores, concreto projetado, tela metálica e algumas vezes cambotas (MARTINS, 2017).

### 4.3 Controle de riscos

De acordo com Iannacchione *et. al* (2007), uma das questões de segurança mais importantes em uma escavação subterrânea é a identificação dos riscos de queda do teto. A fim de reduzir a incidência de acidentes causados por tais quedas, é necessário avaliar e gerenciar estes riscos seguindo os procedimentos do fluxograma da Figura 5.

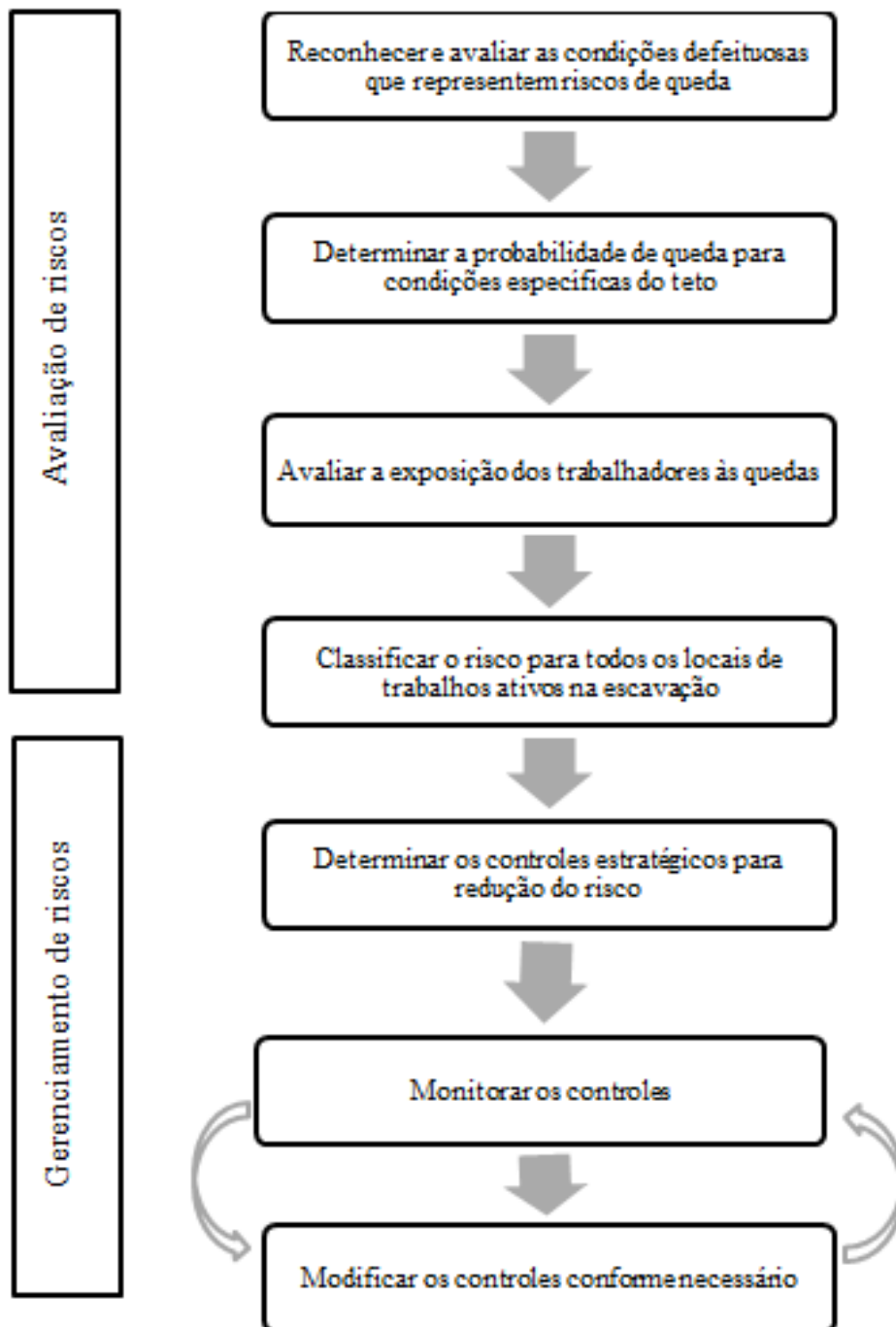


Figura 5: Estrutura geral para avaliação de risco de queda do teto e gerenciamento de risco.  
Fonte: adaptado de Iannacchione *et. al*, 2007.

De acordo com MOSHAB (1999), onde houver necessidade de aplicação de sustentação, a avaliação de risco geotécnico deve apresentar as seguintes informações:

- Até que ponto é necessário a sustentação?
- Quais escavações precisam ser tratadas?
- Qual método de sustentação deve ser usado para cada aplicação?
- Como a sustentação será integrada aos sistemas de controle de solo atual?
- Como a sustentação será integrada aos atuais ciclos de mineração e será necessária alguma alteração nos procedimentos?

Há uma variedade de métodos de sustentação disponíveis que podem ser usados individualmente ou em combinação. Os principais métodos para limitar ou controlar possíveis quedas de rochas são:

- Suportes – arcos, cintas, concreto projetado, telas, entre outros;
- Reforços – parafusos, cabos, enfilagens, injeções e congelamento de terreno (SILVA, 2018b).

#### **4.4 Tipos de sustentação**

Em geral, o reforço de rocha é aplicado principalmente internamente ao maciço rochoso, enquanto o suporte da superfície da rocha se refere àquele que é aplicado externamente ao maciço rochoso. Há uma variedade de métodos de reforço e suporte de rochas disponíveis que podem ser usados individualmente ou em combinação. MOSHAB (1999) destaca os seguintes métodos de sustentação de terreno:

- Cintas;
- Concreto projetado;
- Conjuntos de madeira ou aço;
- Esteios de madeira;
- Esteios hidráulicos;
- Telas;
- Parafusos e cavilhas;
- Placas de concreto fundido;

O tipo de sustentação necessário em um determinado local depende de vários fatores, incluindo a resistência do maciço disponível, a geometria da escavação, as tensões presentes na rocha, as práticas de decapeamento e o processo de intemperismo (VILLAESCUSA, 1999).

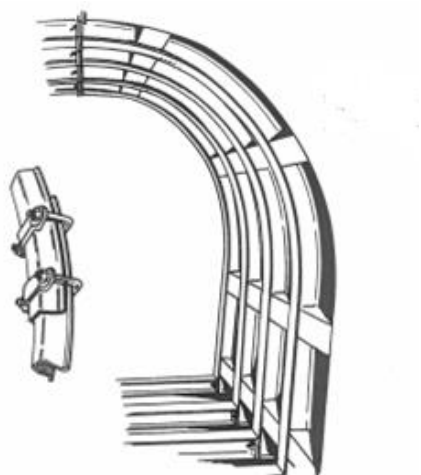
A descrição de todos os métodos está além da finalidade deste trabalho, no entanto, será descrita uma síntese dos métodos de sustentação de rocha mais usuais.

#### **4.4.1 Arcos (ou cambotas)**

Arcos são estruturas metálicas curvilíneas instaladas espaçadamente segundo a seção transversal da escavação. São utilizados como sustentação passiva, suportando o peso da rocha em volta abertura, podendo ser associados com concreto projetado e telas (FERRAZ, 1994, *apud* SILVA, 2018).

Apresentam fácil manuseio uma vez que podem ser fabricados em segmentos e montados no local, dependendo da seção da abertura, e fixados com parafusos (MASCARENHAS, 2014).

São classificados como um método de suporte altamente deformável (SILVA, 2018). A Figura 6 representa esquematicamente os arcos.



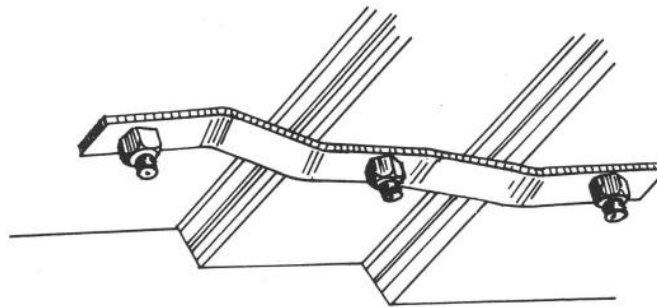
**Figura 6: Representação dos arcos.**

**Fonte: Hoek e Wood, 1987.**

#### 4.4.2 Cinta (*strap*)

Quando a massa rochosa apresenta a maioria dos planos de fraqueza em uma direção, a resistência da rocha é maior da direção destes planos do que através deles. Nessas condições, a cinta pode ser usada para controle do teto da escavação quando somente o uso de parafusos não suporta as placas de rocha (HOEK e WOOD, 1987).

São instaladas em um padrão linear ou de grade, seguindo a superfície da rocha, podendo ser aplicadas em conjunto com outros suportes. Seu uso como método de controle é limitado, pois a superfície da rocha entre as cintas permanece sem suporte e os blocos ainda podem cair (MOSHAB, 1999). A Figura 7 representa a cinta.



**Figura 7: Representação da cinta.**

**Fonte: Hoek e Wood, 1987.**

#### 4.4.3 Concreto projetado (*shotcrete*)

A aplicação do concreto consiste na projeção do material na superfície de aplicação com auxílio de um mangote de alta pressão. A mistura é conduzida pelo mangote até um bico projetor e projetada pela ação do ar comprimido. O material lançado adere à superfície devido à força do impacto. Uma das desvantagens do processo é a perda de concreto durante o lançamento, pois parte do concreto pode não aderir à superfície (DALDEGAN, 2016).

Ao projetar um programa de concreto projetado, MOSHAB (1999) sugere que os seguintes quesitos sejam levados em consideração:

- Aceleradores;
- Aditivos (plastificantes, etc);



- Aplicação correta do concreto;
- Cura (externa ou interna);
- Espessura de concreto projetado;
- Necessidade de drenagem de águas subterrâneas por trás do concreto projetado;
- Presença de águas subterrâneas (por exemplo, quantidade, química, pressão);
- Quantidade de aplicação de concreto necessária;
- Reforço de fibras;
- Resistência do concreto projetado;
- Teste e monitoramento;
- Tipo de mistura de concreto projetado (úmido ou seco);

Existem dois tipos básicos de concreto projetado: mistura de concreto a seco e a úmido. A aplicação por via seca consiste em uma mistura de cimento com agregados que é conduzida até o bocal projetor, onde existe uma entrada de água. Ou seja, a mistura só entra em contato com a água no momento do lançamento. Já a aplicação por via úmida, o concreto é preparado com água e a introdução do ar é mais próxima do bocal de projeção (HOEK e BROWN, 1980; DALDEGAN, 2016).

De acordo com Hoek e Brown (1980), no caso da mistura a seco, o acelerador pode ser adicionado à mistura, mas, no caso do processo de mistura úmida, deve ser adicionado no bocal. A abordagem geral do projeto de mistura é semelhante para o processo de mistura a seco e a úmido, mas há algumas diferenças importantes em detalhes, dependendo de qual processo é usado. A Figura 8 mostra a aplicação do concreto projetado. Em ambos os processos, o *design* da mistura deve satisfazer os seguintes critérios:

- Fluidez (*shootability*) - deve ser capaz de ser colocado no alto com reflexão mínima.
- Resistência inicial - deve ser forte o suficiente para fornecer suporte ao terreno em tempos inferiores a 8 horas.
- Resistência a longo prazo - deve atingir uma resistência específica em 28 dias com a dosagem do acelerador necessária para obter firmeza e resistência precoce.
- Durabilidade - resistência a longo prazo ao meio ambiente.
- Economia - baixo custo de materiais e perdas mínimas devido à reflexão.



**Figura 8: Aplicação de concreto projetado.**  
Fonte: ABC Polymer, 2017.

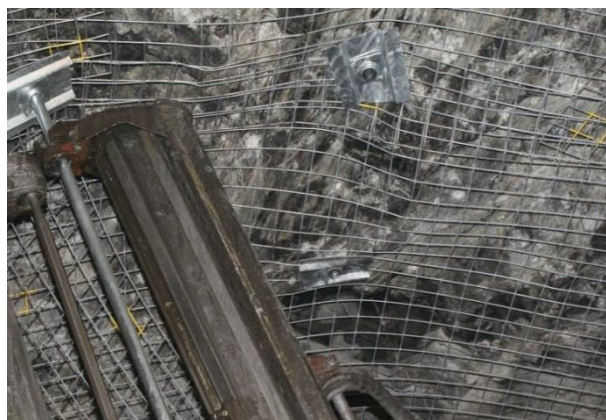
#### **4.4.4 Telas (*mesh*)**

A instalação de telas nas paredes ou teto de uma escavação pode, na maioria das vezes, eliminar quedas de pequenas rochas (MOSHAB, 1999).

Hoek *et al.* (1995, *apud* MOSHAB, 1999) referem-se a essa abordagem como um sistema de suporte de “segurança”, cujo objetivo é evitar quedas inesperadas de pequenas rochas. No entanto, esse tipo de suporte não foi projetado para suportar grandes cargas estáticas ou dinâmicas. Sendo assim, pode ser usado em conjunto com outros elementos para resistir a tais cargas. Esse sistema de suporte também pode ser apropriado, independentemente da altura do teto, em lugares onde a equipe de trabalho se reúne regularmente e em instalações permanentes que contenham equipamento especializado ou explosivos; por exemplo: poços, rampas, túneis, vias principais de transporte, refeitórios, escritórios, estações principais de bombeamento, subestações elétricas principais, câmaras de britagem, transportadores, etc.

Existe uma variedade disponível de telas. Os três principais tipos são: tela de arame soldado (*welded wire mesh*), Figura 9, tela de arame (*chainlink mesh*), Figura 10, e tela não metálica (*non-metallic mesh*), Figura 11. A tela de arame possui maior flexibilidade entre eles, porém não é ideal para reforçar o concreto projetado devido à dificuldade de penetrar o concreto na tela, enquanto a tela soldada é mais adequada para uso com concreto projetado. Onde existem

condições corrosivas, recomenda-se tela galvanizada ou não metálica (HOEK e BROWN, 1987, MOSHAB, 1999).



**Figura 9: Tela de arame soldado.**  
Fonte: NCM, 2018.



**Figura 10: Tela de arame.**  
Fonte: Geobrugg, S.D.

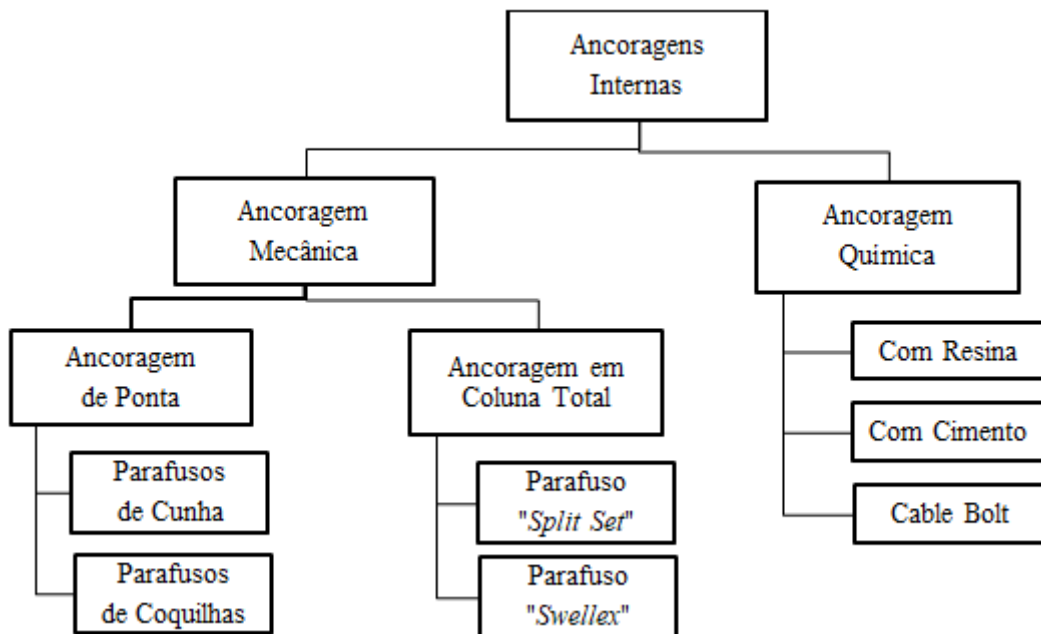


**Figura 11: Tela não metálica.**  
Fonte: NCM, 2019.

#### 4.4.5 Sistemas de ancoragem

As ancoragens possuem características de sustentação que compreendem os suportes, revestimentos e técnicas de reforço (ou tratamento) do maciço rochoso. Apresentam melhor mobilização das forças internas do maciço para sua autossustentação, que é o objetivo primário de um sistema de sustentação. Seu efeito positivo possibilitou a introdução de parafusos com argamassa e cabos, aumentando o reforço dos maciços rochosos no interior das escavações (SILVA, 1998).

O sistema ideal de ancoragem, de acordo com o mesmo autor, deve, inicialmente, agir infinitesimalmente como rígido, a fim de atrair carga de forma a auxiliar na integridade do maciço rochoso. Entretanto, assim que a carga se aproxima de sua resistência à tração limite, a ancoragem deve acomodar grandes deformações sem se romper ou diminuir sua capacidade de suporte. Os principais sistemas de ancoragens são mostrados na Figura 12.



**Figura 12: Principais sistemas de ancoragens.**  
Fonte: Adaptado de Silva, 1998.

De acordo com Silva (1998), as ancoragens mecânicas pontuais são amplamente utilizadas, porém vêm sendo substituídas pelas ancoragens de coluna total com argamassa. A técnica de ancoragem consiste em introduzir em um furo uma barra de aço rígida, com preenchimento ou

não de argamassa de cimento ou resina. Entre as tendências de atirantamento, podem ser destacadas:

- Parafusos ancorados com argamassa;
- Sistema “cable bolt”;
- Parafusos associados a concreto projetado e/ou tela metálica.

#### 4.4.5.1 Histórico dos parafusos

A segurança é um fator importante na construção moderna. Todos os regulamentos tornaram-se mais rigorosos para proporcionar condições de trabalho mais seguras para os trabalhadores e também para garantir que o trabalho finalizado seja seguro para uso. Métodos avançados baseados em dados empíricos são usados mais atualmente do que antes. A principal razão é devido aos requisitos dos construtores em relação a projetos difíceis e complexos (STATENS VEGVESEN, 1999, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

KRISTJÁNSSON (2014) lembra que nos anos de 1855-1861, os parafusos foram usados pela primeira vez em construção quando o Canal Telemark, que conecta a costa de Telemark com o interior de Skien a Dalen na Noruega, foi construído. A Figura 13 mostra a instalação manual de parafusos.



**Figura 13: Instalação manual de parafuso.**  
Fonte: MailOnline, 2014

Em 1927 foram utilizados parafusos mecânicos em uma mina de metal nos Estados Unidos (BOLSTAD e HILL, 1983, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Os primeiros tipos de parafusos utilizados no subsolo foram cavilhas de atrito (*split set*) e de cunha (*wedge bolts*). Desde então, os parafusos evoluíram significativamente. O foco principal hoje é que os parafusos têm que ser resistentes o suficiente para sustentar o peso morto dos blocos instáveis (STATENS VEGVESEN, 1999, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Mais tarde, os parafusos se tornaram o método de suporte mais dominante na construção subterrânea em todo o mundo. As empresas de mineração foram pioneiras no uso de parafusos, principalmente empresas dos Estados Unidos, África do Sul e Noruega. O Departamento de Minas dos EUA (USBM<sup>1</sup>, hoje NIOSH) foi a primeira instituição a usar a tecnologia de aparafusamento de teto em 1947, a tecnologia foi empregada para reduzir o número de acidentes fatais causados por quedas do teto (KRISTJÁNSSON, 2014).

Por ser um método barato e prático, os parafusos são usados com suportes em túneis, cavernas, cortes de rocha e fundação. Eles também são utilizados como um reforço de base ao construir pontes, docas e barragens em rocha. Seu uso como suporte de rocha aumentou significativamente desde 1970, provavelmente por causa da mecanização e taxa de produção de perfuração. Para lidar com isso, a taxa de reforço teve que aumentar e novos tipos de suporte de rochas evoluíram para resolver problemas relacionados à rocha. A maioria dos problemas atuais de estabilidade pode ser resolvido com parafusos de rocha e concreto projetado e, se usados com equipamentos modernos, fornecem método de suporte rápido e eficaz (STATENS VEGVESEN, 1999, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Não existe um método de análise universal para determinação de projeto de sustentação (ou suporte) e avaliação de estabilidade de escavação. Cada projeto é específico para as circunstâncias e condições específicas de cada local: tensões *in situ*, profundidade, presença de água, entre outras (AGUIAR, 2010, *apud* MARTINS, 2017).

---

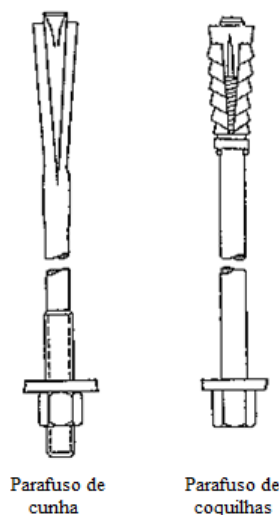
<sup>1</sup> U.S. Bureau of Mines, principal órgão do governo dos Estados Unidos que conduz pesquisas científicas e dissemina informações sobre a extração, processamento, uso e conservação de recursos minerais.



## 5 ANÁLISE DAS TÉCNICAS DE ANCORAGENS

### 5.1 Ancoragens mecânicas pontuais

De acordo com Hoek e Wood (1987), os parafusos ancorados mecanicamente podem ser divididos em dois grupos: parafusos de coquilha e parafusos de cunha. Estes proporcionam um suporte eficaz em muitas condições, como quando blocos de rocha são soltos por juntas em interseção, planos de assentamento na rocha ou quando os blocos se soltam devido à má qualidade da detonação. Sustentam o peso morto do material solto e são frequentemente usados com a adição de tela, onde pequenos fragmentos (blocos) de rocha podem cair entre os parafusos. A Figura 14 apresenta as duas principais ancoragens mecânicas pontuais.



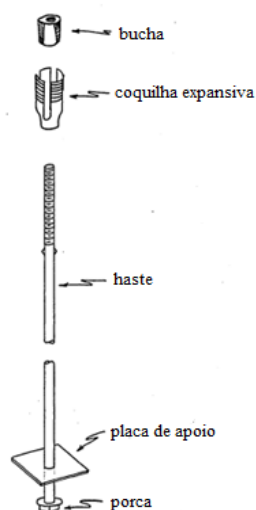
**Figura 14: Principais ancoragens mecânicas pontuais.**  
Fonte: Adaptado de Priester *et. al*, 1993.

Estes parafusos são normalmente tensionados com uma chave convencional ou com uma chave de torque pneumática até cerca de 70% da sua carga de ruptura final, a fim de apertar o bloco solto e as cunhas. Isso proporciona o máximo de intertravamento entre os blocos e ajuda a rocha a se sustentar. Infelizmente, existem alguns problemas com parafusos ancorados mecanicamente. Os parafusos desgastados que perderam toda a sua tensão tendem a deslizar progressivamente com o tempo ou se romper, a capacidade do parafuso reduz para zero podendo levar a uma queda de rocha. Esta é uma das principais desvantagens dos parafusos ancorados mecanicamente, porém não é um problema para os outros tipos, como parafusos

com argamassa e ancorados por fricção. Se ocorrer deslizamento ou a face da placa se romper nos parafusos ancorados por fricção, o comprimento restante do parafuso ainda estará ancorado e ainda fornecerá suporte (HOEK e WOOD, 1987).

### 5.1.1 Parafuso de coquilhas (*expansion shell bolt*)

Os parafusos de coquilhas, como descrito por Lucio (1962), consistem em uma barra de aço de seção circular, rosqueada com uma porca na extremidade externa e uma coquilha expansiva com uma bucha na extremidade interna. A Figura 15 representa os elementos do parafuso de coquilhas.



**Figura 15: Elementos do parafuso de coquilha.**  
Fonte: Adaptado de Lucio, 1962.

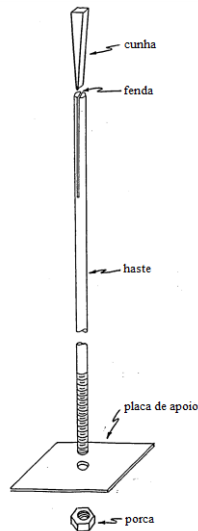
Após a inserção do parafuso, é aplicado um torque e a bucha é puxada para dentro da coquilha que é forçada a se expandir contra a parede do furo e o parafuso é tensionado. Na extremidade externa, são utilizadas uma porca e placa de apoio para distribuir a carga do parafuso na face da rocha. Além disso, uma arruela ou ajuste cônico é necessário para compensar o fato de que a face da rocha está muito raramente em ângulo reto com o parafuso (HOEK *et.al*, 1995).

Os mecanismos de ancoragem deste tipo de parafuso são o atrito e o intertravamento entre a coquilha e a parede do furo. Devido ao comprimento limitado da coquilha expansiva, a capacidade de carga do parafuso é relativamente baixa, sendo recomendado para rochas menos resistentes a fim de evitar deslizamento (LI, 2013, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).



### 5.1.2 Parafuso de cunha (*slot and wedge bolt*)

O parafuso de cunha, como descrito por Lucio (1962), é uma barra de aço de seção transversal circular encaixada em uma cunha, na extremidade com fenda, e rosqueada na outra com uma porca e uma placa de apoio. A Figura 16 apresenta os elementos do parafuso de cunha.



**Figura 16: Elementos do parafuso de cunha.**  
**Fonte: Adaptado de Lucio, 1962.**

O parafuso é colocado, com a cunha parcialmente inserida na fenda, no furo até atingir o fundo. Com uma perfuratriz ou outra máquina de percussão, o parafuso é instalado a partir da outra extremidade, forçando a cunha para dentro da fenda, prendendo os pinos do parafuso contra a parede do furo. Enquanto a percussão continua, as garras de cada lado da ranhura abrem um sulco na rocha. Desta maneira, a extremidade interna do parafuso é fixada na rocha. Na extremidade rosçada, a placa de apoio é inserida e a porca é apertada com um torque prescrito. Com o aperto da porca, o parafuso é tensionado e uma das extremidades é fixada à rocha, causando compressão e induzindo o efeito autossuportante (LUCIO, 1962).

### 5.2 Ancoragens mecânicas em coluna total (por fricção)

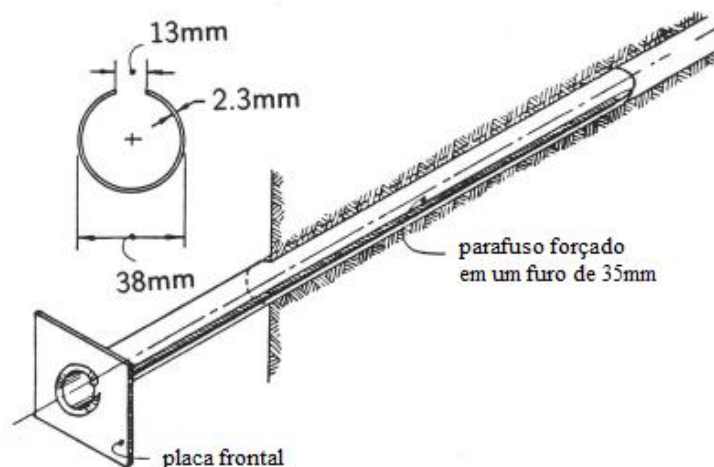
Os parafusos de fricção são aparafusados de maneira especial, usando a resistência de atrito ao deslizamento gerado por uma força radial contra a parede do furo ao longo de todo o comprimento do parafuso, sem necessidade de auxílio como dispositivos de travamento mecânico ou argamassa (LI, 2013, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Os parafusos ancorados por fricção não podem ser tensionados e, portanto, eles devem ser instalados antes da ocorrência de qualquer movimento na rocha. A experiência tem mostrado que uma combinação de detonação cuidadosa e instalação destes parafusos, podem fornecer um sistema de suporte eficaz que suporta uma gama muito maior de condições de rocha do que os parafusos ancorados mecanicamente (HOEK e WOOD, 1987).

Uma das principais vantagens dos parafusos de ancoragem por atrito é que eles acomodam grandes formações rochosas. No entanto, eles não toleram alta capacidade de carga (LI, 2011, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

### 5.2.1 Parafuso *Split Set* (cavilhas de atrito ou estabilizadores)

Os estabilizadores *Split Set* foram originalmente desenvolvidos por Scott em 1977 e são fabricados e distribuídos pela Ingersoll-Rand. O sistema, ilustrado na Figura 17, consiste em um tubo de aço de alta resistência com fenda e uma placa frontal. É instalado empurrando-o para um orifício ligeiramente subdimensionado e a força de mola radial gerada, pela compressão do tubo em forma de C, fornece a ancoragem por atrito ao longo de todo o comprimento do orifício. (HOEK *et al.*, 2005).



**Figura 17: Elementos do parafuso Split Set.**  
Fonte: Adaptado de Hoek e Wood, 1987.

Como o sistema é rápido e simples de instalar, ele ganhou aceitação dos mineradores em todo o mundo. O dispositivo é particularmente útil em ambientes de explosão de rocha (*rockburst*)

moderados, porque ele irá deslizar em vez de romper e, quando usado com tela, reterá a rocha quebrada gerada por uma explosão suave. Desde que a demanda imposta aos estabilizadores do *Split Sets* não exceda sua capacidade, o sistema funciona bem e pode ser considerado para muitas aplicações de mineração. (HOEK *et al.*, 2005)

A corrosão continua sendo um dos principais problemas com este tipo de cavilha, já que não pode ser utilizado com argamassa. A galvanização do tubo ajuda a reduzir a corrosão, mas provavelmente não é uma medida preventiva que pode ser usada para aplicações de longo prazo em ambientes agressivos (HOEK *et al.*, 2005). SILVA (2018) cita o caso da Mina Córrego do Sítio 2, em Santa Bárbara-MG, que vem aplicando tirantes com resina em área onde havia cavilhas *Split Set*, para reabilitação e reimplantação da extração de minério contendo ouro.

Além disso, o diâmetro do furo perfurado para a instalação da cavilha é outro fator crítico, uma vez que não pode ser pequeno, dificultando seu encaixe, ou grande demais (HOEK & WOOD, 1987).

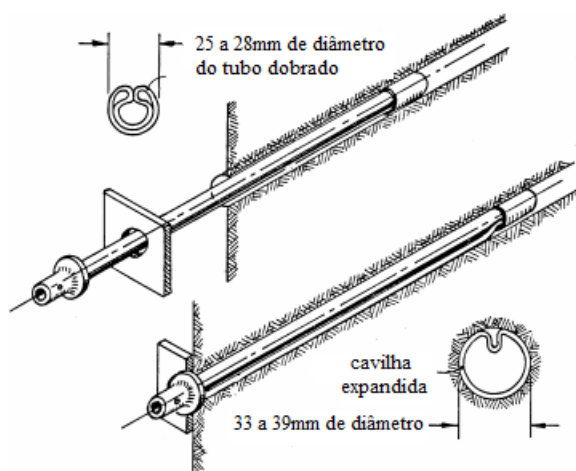
### **5.2.2 Parafuso *Swellex***

Desenvolvido e comercializado pela Atlas Copco, o sistema *Swellex* (Figura 18) consiste em um tubo dobrado durante a fabricação, em formato de C, para criar um diâmetro menor que o furo. Não é necessária qualquer força de pressão durante a inserção e o parafuso é ativado por injeção de água a alta pressão que o infla até entrar em contato com as paredes do furo. A corrosão é o maior problema, pois a superfície externa do tubo está em contato direto com a rocha, sendo necessários revestimentos resistentes à corrosão (HOEK *et al.*, 1995).

O intertravamento mecânico do parafuso e da rocha impede o deslizamento do parafuso. O tubo dobrado expandido leva a alguma redução no comprimento, o que coloca o *Swellex* em tensão (HOEK e WOOD, 1987).

Assim como o parafuso *Split Set*, a corrosão é um problema em instalações a longo prazo (HOEK & WOOD, 1987) e a velocidade de instalação é a principal vantagem do sistema *Swellex*, em comparação com os parafusos convencionais e as cavilhas. Na verdade, o custo

total de instalação do *Swellex* ou dos estabilizadores *Split Set* tende a ser menor que o dos sistemas de reforço com argamassa, quando o tempo de instalação é levado em consideração (HOEK *et al.*, 1995).



**Figura 18: Elementos do parafuso Swellex.**  
Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 1995.

### 5.3 Ancoragem química (com argamassa)

As ancoragens com argamassa são aplicadas como um meio de controle do terreno, possuindo ampla aplicação geotécnica. Por ser um sistema muito eficaz, tanto mecanicamente quanto economicamente, estão sendo cada vez mais utilizados em vez dos parafusos ancorados mecanicamente (CAO *et. al.*, 2014).

Como descrito por Kristjánsson (2014), tais parafusos consistem em uma barra de aço e placa de apoio, semelhante às ancoragens mecânicas, porém o que os diferem é a utilização do material de ligação, caracterizando esse tipo de parafuso. Além disso, a superfície da barra apresenta nervuras para que haja uma boa mistura do catalisador e argamassa e aumentar a aderência por fricção entre a barra e a argamassa. Alguns fabricantes ressaltam ainda a seção elíptica do parafuso como elemento importante (ALVES, 2018).

A argamassa refere-se principalmente à resina ou materiais cimentícios que são ou bombeáveis ou encapsulados. Sua principal finalidade é fornecer um mecanismo para transferência de carga entre o parafuso e a massa rochosa e aumentar a resistência através da aderência química, fricção e intertravamento mecânico (CAO *et al.*, 2014).

Além disso, fornecem proteção contra a corrosão (STATENS VEGVESEN, 1999, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

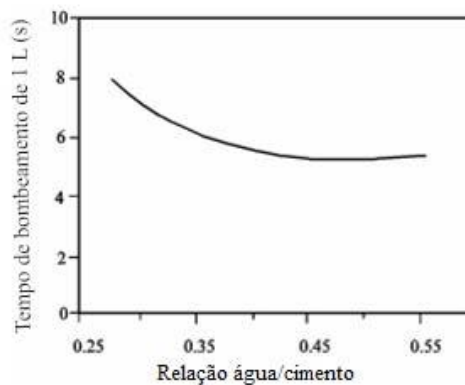
São parafusos passivos, não ativados na fase de instalação e, por se autotensionarem quando a rocha começa a se mover e dilatar, a instalação do parafuso deve acontecer o mais rápido possível, antes que a rocha comece a deformar e os parafusos percam sua força de intertravamento e cisalhamento (KILIC *et al.*, 2002, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

### **5.3.1 Parafuso com argamassa de cimento**

O uso do cimento como argamassa é o método mais antigo de ancoragem química. Por apresentar uma possível contração do cimento e maior tempo de cura, seu uso acaba se tornando limitado a escavações onde não há necessidade de um processo rápido (PENG e TANG, 1983, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

A argamassa utilizada deve ser bombeada facilmente, não podendo ser uma mistura muito grosseira ou muito fluida, assim é necessária uma avaliação da relação água/cimento. Além disso, é importante garantir que o espaço anular entre o parafuso e a parede do furo esteja completamente preenchido com argamassa (HOEK *et al.*, 1995).

A relação água/cimento e as características da argamassa foram estudadas por Hyett *et al.* (1992), usando cimento Portland. A Figura 19 exibe o tempo de bombeamento de 1L de argamassa de acordo com a relação água/cimento. A Tabela 1 apresenta as características da argamassa com diferentes relações água/cimento. Tais resultados mostram que as propriedades da argamassa de relação de mistura de 0,35 a 0,4 são significativamente melhores que as outras. Sendo assim, essa faixa de proporção é um bom ponto de partida para uma mistura de argamassa para esta aplicação (HOEK *et. al.*, 1995).



**Figura 19: Tempo de bombeamento de acordo com a relação água/cimento.**  
**Fonte: Adaptado de Hoek *et. al*, 1995.**

**Tabela 1: Características da argamassa com diferentes relações água/cimento.**

Relação água/cimento	Característica da argamassa no final do tubo	Características da argamassa quando manuseada
< 0,3	Seca e rígida.	Muito seca pra grudar na mão.
0,3	Úmida, escorre levemente com o tempo.	Gruda na mão, facilmente enroladas em esferas úmidas.
0,35	Molhado, escorre com o tempo.	Gruda na mão.
0,4	Escoa viscosamente sob o próprio peso.	Gruda na mão, mas escorre quando agitada.
0,5	Escoa prontamente e espalha ao impacto com terreno.	Gruda na mão, porém escorre instantaneamente.

**Fonte: Adaptado de Hoek *et. al*, 1995.**

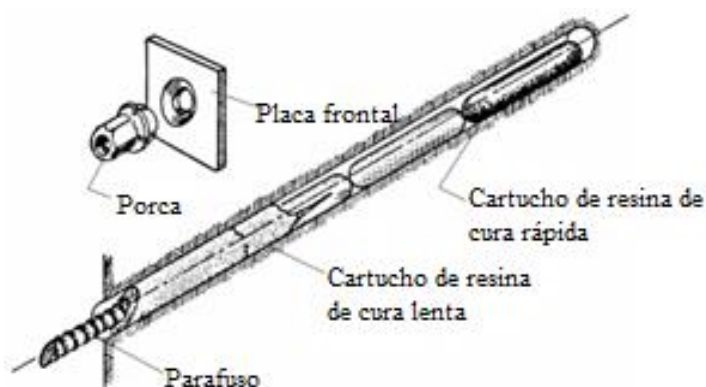
Alguns parâmetros devem ser considerados ao testar a capacidade de carga dos parafusos com argamassa. Tais parâmetros incluem a forma, o diâmetro e o comprimento do parafuso, resistência da rocha e da argamassa (KILIC *et al.*, 2002, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

### 5.3.2 Parafuso com resina

Os cartuchos de resinas utilizados nas ancoragens químicas são constituídos por duas unidades, um contendo resina e outro um catalizador. Seu alto custo compensa pela velocidade de instalação, porém pode apresentar vida útil limitada já que, dependendo das condições de armazenamento, pode ser de apenas seis meses (HOEK *et al.*, 1995).

Sua instalação é simples, os cartuchos são empurrados até o final do furo e o parafuso é inserido de forma rotativa através de uma broca. As cápsulas de plástico se rompem e a resina e catalizador são misturados. A cura da resina, dependendo de suas especificações, ocorre em

minutos (HOEK *et al.*, 1995). A Figura 20 mostra uma configuração típica para instalação de uma ancoragem com argamassa de resina.



**Figura 20: Configuração típica de ancoragem com argamassa de resina.**  
Fonte: Adaptado de Hoek *et. al*, 1995.

Para instalação adequada, a mistura e tempo de cura são fatores fundamentais a serem observados. Se a resina for excessivamente misturada, a resistência da ancoragem diminuirá. Se a cura for perturbada antes de ser concluída, a resistência final da resina não será obtida (Peng e Tang, 1983, *apud* Kristjánsson, 2014).

Há uma incerteza sobre a proteção contra corrosão em longo prazo e reação das resinas com águas subterrâneas. Para tais aplicações também é indicado o uso de cimento (HOEK *et al.*, 1995).

Kristjánsson (2014) indica a necessidade de avaliar a relação diâmetro do furo e diâmetro do parafuso para uma instalação bem sucedida. Para a mistura adequada e maior capacidade de ancoragem, o espaço entre o furo e o parafuso não pode ser muito grande. Sendo assim, SILVA (2018a) sugere diferenças de 3 a 4 mm e 5 a 10 mm (SILVEIRA, 1987) e recomenda excesso de 10% de resina para preencher eventuais fraturas ao longo do furo. A diferença ótima é de 6,4 mm, conforme Wilding e Thomson (1981).

Conforme Hudson (2013 *apud* SILVA, 2018a), o comprimento de trecho de resina deve prover aderência suficiente do parafuso ao furo. Isto deve assegurar que uma eventual ruptura durante carregamento do parafuso não aconteça ao longo da interface rocha–argamassa ou haste-argamassa. Para isso recomenda-se que seja acima de 40 cm.

Esse tipo de ancoragem funciona na maioria das rochas, porém em algumas rochas argilosas, por conta do escorregamento dos cartuchos, ou altamente fraturadas, o uso de cimento como argamassa pode ser uma solução mais eficaz (HOEK *et. al*, 1995).

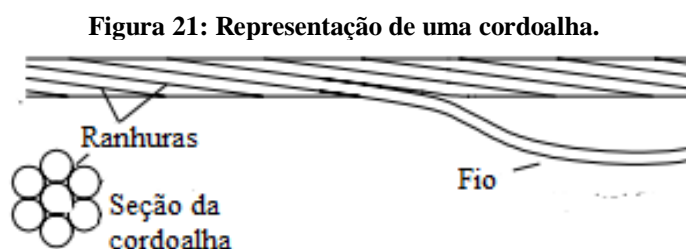
#### 5.4 Cabos (*cable bolt*)

Hutchinson e Diederichs (1996) e Brady e Brown (2006) descrevem os cabos como elementos de aço longos de alta resistência à tração. Consistem em vários fios enrolados formando um tendão flexível. Normalmente são utilizados para fornecer reforço ou suporte, podendo ou não sere pré-tensionados.

Windsor (2001, *apud* Brady e Brown, 2006) define os seguintes termos associados aos cabos:

- Fio (*wire*) - um único elemento de seção sólida.
- Cordoalha (*strand*) - um conjunto de fios helicoidalmente torcidos.
- Cabo - um arranjo de fios ou cordoalhas.
- Tendão - fios ou cordas pré-tensionados.
- Cavilha - fios ou cordoalhas sem tensão.

Os cabos apresentam alta versatilidade para suporte de rochas por serem flexíveis o suficiente para serem dobrados a um raio relativamente pequeno, o que viabiliza a instalação em locais confinados. Podem ser fabricados em várias configurações de fios e comprimentos maiores que os parafusos e para a contenção da face podem ser utilizados placas de apoio, correias ou malha. Além disso, podem ser instalados mais de um cabo em um único furo com intuito de aumentar a capacidade de tração (HUTCHINSON & DIEDERICHS, 1996). A Figura 21 mostra a representação de uma cordoalha com seis fios e sua seção.

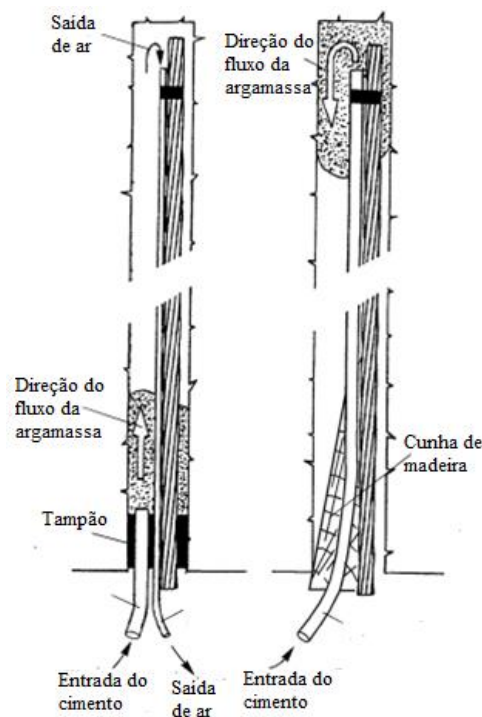


Fonte: Adaptado de Hutchinson e Diederichs, 1996.



Conforme o cabo é puxado, a interferência resultante dos fios de aço em espiral com suas marcas ou ranhuras com a argamassa utilizada, causa deslocamento radial ou dilatação da interface entre a argamassa e o cabo. A dilatação radial induz uma pressão confinante que, juntamente com o coeficiente de atrito entre os fios e a argamassa, geram a tensão de cisalhamento que resiste ao deslizamento do cabo (HOEK *et al.*, 1995).

A Figura 22 mostra os métodos convencionais de aplicação da argamassa de cimento em um furo ascendente, que pode ser aplicado tanto na instalação de cabos quanto de parafusos com argamassa de cimento. A imagem à esquerda representa o “método do tubo de respiro” onde a argamassa é injetada no furo através de um tubo grosso e o ar existente no furo é retirado por outro tubo de diâmetro menor. Ambos os tubos são vedados na boca do furo por meio de um tampão de algodão ou argamassa de secagem/cura rápida. O principal problema deste método é identificar quando o furo está completo por argamassa. Um método alternativo, representado à direita, chamado de “método do tubo de argamassa”, consiste em apenas um tubo de injeção de argamassa mantido juntamente ao cabo por uma cunha instalada na boca do furo. A argamassa é injetada até aparecer na boca do furo (HOEK *et al.*, 1995).



**Figura 22: Métodos de aplicação da argamassa de cimento em um furo ascendente.**  
**Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 1995**

## **6 TESTE DE ARRANCAMENTO (*pull out test*)**

Em toda abertura subterrânea, é necessário o monitoramento do maciço rochoso, para acompanhar as alterações do mesmo e aplicação ou troca do método de sustentação, caso seja necessário. O teste de arrancamento é uma forma de monitoramento realizada nas ancoragens instaladas e para determinar sua resistência a curto prazo.

O teste de arrancamento feito na ancoragem mede sua capacidade de trabalho, que é a carga no sistema de ancoragem em que o aumento significativo do deslocamento começa, e a capacidade máxima, que corresponde à carga máxima que o sistema suporta (ASTM, 2014).

Sua medição não abrange todo o sistema de suporte do teto ou parafusos pré-tensionados, são aplicados apenas para sistemas de ancoragens mecânicas, com cimento ou resina e outros sistemas similares. Os dados obtidos nos testes podem ser utilizados para determinar a ancoragem mais adequada de acordo com as informações do desempenho relativo dos diferentes tipos de parafusos avaliados no mesmo tipo de rocha (ASTM, 2014).

De acordo com Gontijo (2017), a maioria das operações aplicam uma carga de até 60% da capacidade da ancoragem, de acordo com as especificações do fabricante. Para monitorar a carga, o teste deve ser aplicado e 95% das ancoragens devem ser aprovadas para liberação da área, caso contrário, outro teste deve ser feito em 10% das ancoragens instaladas no local e destes, ainda 95% deles devem ser aprovados. Se ainda assim não for aprovado, as ancoragens devem ser reinstaladas e os testes executados novamente em 10% das novas ancoragens.

## 6.1 Preparação

Quando um teste é realizado, as ancoragens devem ser do estoque de produção padrão do fabricante, sem defeitos e dimensões conhecidas, de forma a ajustar o teste de acordo com tais informações (KRISTJÁNSSON, 2014).

Para avaliar o desempenho da ancoragem, o parafuso, as roscas, porcas e outros componentes devem ser mais resistentes que a ancoragem. Em algumas circunstâncias, pode ser necessário o reforço do parafuso ou rosca para fins de avaliação da âncora. Conjuntamente podem ser realizados testes laboratoriais para complementar os testes de campo, avaliando os componentes em relação à resistência a corrosão, qualidade dos materiais e consistência das dimensões (ISRM, 1993).

De acordo com Singh e Goel (2006), a qualidade dos parafusos também deve ser verificada em laboratório testando cinco parafusos por 1000, como segue:

- Ensaio de tração na ancoragem;
- Ensaio de tração na porca e placa de apoio;
- Teste de tração na haste;
- Teste para determinar a relação torque-tensão.

Os furos devem ser profundos o suficiente, não necessariamente tão profundo quanto o comprimento do parafuso. Também devem ser retos o suficiente e serem soprados e lavados previamente, de forma a eliminar todos os fragmentos, antes da inserção do parafuso (ASTM, 2014).

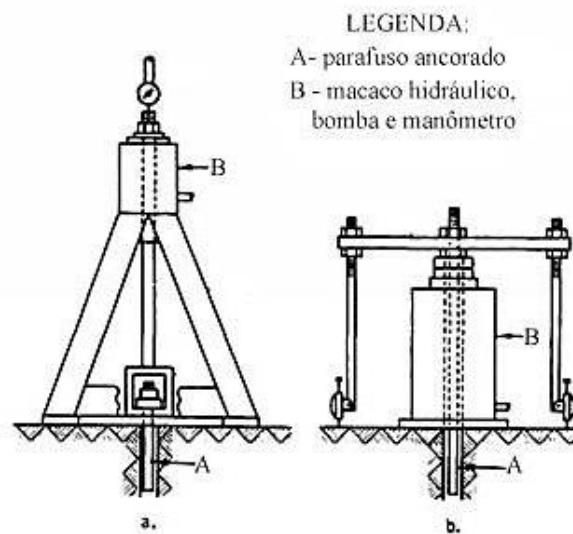
Caso os testes sejam realizados em parafusos com argamassa, deve-se considerar o tempo de cura recomendado uma vez que varia consideravelmente e isso afeta a resistência. Mais de uma ancoragem deve ser testada usando tempos de cura semelhantes para avaliar o efeito do tamanho do trecho de argamassa na resistência da mesma (ASTM, 2014).

A argamassa deve ser fresca/nova. No caso da resina, o cartucho deve ser compatível com o comprimento e diâmetro do poço e da ancoragem. Já o cimento, a mistura e o equipamento de injeção devem ser compatíveis com as recomendações do fabricante (KRISTJÁNSSON, 2014).

Idealmente, o parafuso deve romper por cisalhamento, na interface parafuso-rocha ou parafuso-argamassa. No entanto, as características da rocha podem afetar significativamente na resistência, sendo assim, para obter valores consideráveis, os furos devem ser feitos seguindo o procedimento habitual de perfuração da mina e em todos os tipos de rocha nos quais os parafusos serão instalados (ASTM, 2014).

## 6.2 Equipamento e funcionamento

O equipamento utilizado no teste de arrancamento é bem simples. Compreende um macaco hidráulico com bomba manual e mangueira de pressão capaz de aplicar uma carga maior que a resistência do parafuso a ser testado, causando um deslocamento de pelo menos 50mm, e um apoio de parafusos e porcas que ajustam a superfície do maciço rochoso para que a carga seja aplicada de forma axial à ancoragem (ISRM, 1993). A Figura 23 mostra os elementos principais do equipamento.



**Figura 23: Elementos principais do equipamento.**  
Fonte: Adaptado de ISRM, 1993.

Alguns parafusos devem ser tensionados durante sua instalação, sendo assim, devem ser testados com uma unidade de acoplamento adequado (Fig. 23a). Os parafusos testados sem pré-tensão utilizam um macaco hidráulico centralizado no furo (Fig. 23b). A porcentagem de tensão de parafuso aplicada inicialmente no momento do teste pode ser estimada a partir da

carga necessária para soltar a placa frontal e arruelas (ISRM, 1993). A Figura 24 mostra o equipamento utilizado para os testes de arrancamento.



**Figura 24: Equipamento para os testes de arrancamento.**

**Fonte: Hilti, s.d.**

## 7 CAPACIDADE DE CARGA DOS PARAFUSOS

A ancoragem instalada deve ser adequada ao comportamento da rocha de forma a atingir o equilíbrio de maneira econômica e sem comprometer a segurança da abertura (KRISTJÁNSSON, 2014, *apud* FOO *et al.*, 2011)

De acordo com o desempenho de deformação da carga, citado por Kristjánsson (2014), os parafusos de rocha podem ser categorizados em três grupos:

- Parafusos dúcteis (*ductile bolts*);
- Parafusos de absorção de energia (*energy-absorbing bolts*);
- Parafusos de resistência/força (*strength bolts*).

Os parafusos dúcteis acomodam grandes deformações, porém não suportam carga alta. Os de resistência apresentam alta capacidade de carga, porém baixa deformação. Os parafusos de absorção de energia suportam cargas elevadas e também acomodam grandes deformações (LI, 2012, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

A Figura 25 apresenta resultados de testes arrancamento realizados em laboratório por Li (2013). O autor mostra exemplos de curvas de reação de suporte não lineares para vários tipos de parafusos de rocha.

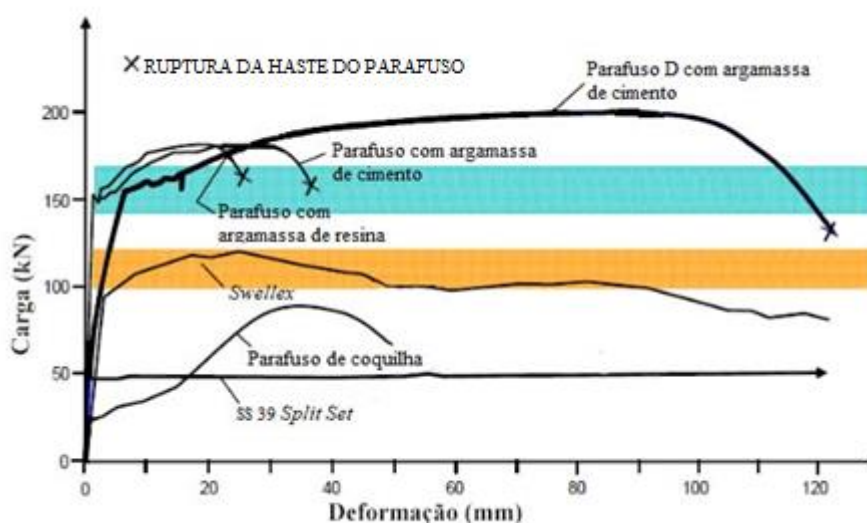


Figura 25: Resultados dos testes de arrancamento com diferentes parafusos.

Fonte: Adaptado de Kristjánsson, 2014.

Swellex e Split Set são parafusos de ancoragem por atrito (ou fricção). Tais parafusos podem acomodar grandes formações rochosas, mas sua capacidade de carga é bastante baixa. A figura mostra que os parafusos *Swellex* tem alta capacidade de carga, cerca de 120 kN, comparados com o *Split Set*, com capacidade de apenas 50kN. Por acomodar grandes deslocamentos, são classificados como parafusos dúcteis (LI, 2011, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Os parafusos D (abreviação para “parafusos deformáveis”) podem tolerar altas cargas, cerca de 200 kN, e deformações da rocha, até 120 mm. Sendo assim, são descritos como parafusos absorvedores de energia (NTNU, 2014, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Os parafusos de ancoragem química não suportam altas deformações, se rompem com cerca de 20 mm a 30 mm, no entanto têm alta capacidade de carga, uma vez que suportam mais de 150 kN. Por apresentar tais características, são descritos como parafusos de resistência/força (LI, 2013, *apud* KRISTJÁNSSON, 2014).

Os resultados dos testes de arrancamento fornecem informações sobre a capacidade de carga axial dos parafusos de rocha. Eles também dão recomendações para selecionar tipos de parafusos apropriados para propósitos específicos (KRISTJÁNSSON, 2014, *apud* LI, 2013).

Com o teste de arrancamento é possível selecionar o melhor sistema de ancoragem e a argamassa a ser utilizada. Para isso, é necessário avaliar diferentes condições de aplicação que podem afetar significativamente na resistência do sistema. Algumas dessas condições serão estudadas a seguir, baseando em testes realizados por diversos autores e os resultados encontrados.

## **7.1 Características do parafuso**

Kilic *et al.* (2002) realizaram testes de arrancamento, em laboratório, a fim de verificar a influência do diâmetro do parafuso, da área superficial e do comprimento do parafuso ancorado na capacidade máxima do sistema usando argamassa de cimento em material basáltico.

De acordo com os resultados encontrados, indicados na Tabela 2, usando o mesmo comprimento ancorado com cimento Portland com relação água/cimento de 0,4, a capacidade de carga máxima aumenta com o aumento do diâmetro e a área do parafuso.

**Tabela 2: Influência do diâmetro e área do parafuso na capacidade máxima**

$d_b$ (mm)	$L_b$ (cm)	$A_b$ (cm <sup>2</sup> )	$P_b$ (kN)
10	24,2	76	43,2
12	24,2	91	54,7
14	24,2	106	59,2
16	24,2	122	73,6
18	24,2	137	81,6

Fonte: Adaptado de Kilic *et al.* (2002)

O mesmo teste, porém com variação do comprimento ancorado e mesmo diâmetro (12 mm), apresentou os resultados da Tabela 3. Nota-se que a carga máxima também depende do comprimento do parafuso ancorado, que aumenta com o aumento desse comprimento.

**Tabela 3: Influência do comprimento ancorado e área do parafuso na capacidade máxima**

$L_b$ (cm)	$A_b$ (cm <sup>2</sup> )	$P_b$ (kN)
15	57	44,3
24,7	93	72,8
27	102	79
30	113	90,2
32	121	91,7

Fonte: Adaptado de Kilic *et al.* (2002)

O mesmo teste foi realizado por Kristjánsson (2014). Usando cimento Zinkbolt, com a relação a/c de 0,4, os resultados obtidos apresentados na Tabela 4 indicam que a carga máxima aumenta com o comprimento ancorado.

**Tabela 4: Influência do comprimento ancorado na capacidade máxima**

$L_b$ (cm)	$P_b$ (kN)
10	87
15	118
20	180
30	~200

Fonte: Adaptado de Kristjánsson (2014).



## 7.2 Propriedades mecânicas da argamassa

Bajwa *et al.* (2017) fizeram um estudo comparativo do desempenho do cabo de cordoalha lisa (*plain strand*) fixado com cimento (Minova Stratabinder HS com relação a/c de 0,45) e resina (“XXSlow Resin Premix” por J-lok Resins Jennmar), preparado de acordo com as recomendações do fabricante. O catalisador para a proporção de argamassa foi de 93% XXSlow Resin Premix e 7% catalisador de óleo), além do impacto do diâmetro do furo nos resultados. A Tabela 5 apresenta os resultados da capacidade de carga de acordo com o diâmetro do furo e a argamassa utilizada.

**Tabela 5: Capacidade de carga do parafuso de acordo com diâmetro do furo e argamassa utilizada.**

Diâmetro (mm)	Carga máxima média (kN)	
	Cimento	Resina
27	117	70
37	97	143

**FONTE: Adaptado de Bajwa & Li (2017).**

Apesar da diferença na carga máxima de acordo com o diâmetro do furo, a capacidade do parafuso também depende das propriedades mecânicas da argamassa que podem ser alterados pela relação água/cimento, tempo de cura e aditivos.

Os testes de arrancamento feitos por Kilic *et al.* (2002), também avaliaram a influência da alteração das propriedades mecânicas da argamassa no sistema. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, a relação água/cimento afeta consideravelmente a resistência ao arrancamento do parafuso. Tal relação não pode ser maior que 0,4 em peso, pois o excesso de água reduz a resistência a longo prazo, uma vez que parte da água é consumida pela hidratação do cimento utilizado.

**Tabela 6: Influência da relação a/c na carga máxima do parafuso.**

Relação a/c	$d_b$ (mm)	$P_b$ (kN)	$\tau_b$ (Mpa)
0,34	12	80,9	7,93
0,36	12	79,0	7,75
0,38	12	77,4	7,59
0,40	12	75,3	7,38

**Fonte: Adaptado de Kilic *et al.* (2002)**

A força de adesão (*bond strength*) depende da resistência ao cisalhamento da interface parafuso-argamassa. Assim, qualquer alteração na propriedade mecânica dos materiais altera a resistência ao cisalhamento.

Apesar da relação a/c de 0,34 apresentar o melhor resultado de força de adesão e capacidade de carga, a bombeabilidade (*pumpability*) diminuiu e apresenta dificuldades de aplicação. O inverso ocorre com o aumento da relação a/c. Sendo assim, deve-se levar em consideração a viscosidade da argamassa.

Os resultados encontrados por Kristjánsson (2014), apresentados na Tabela 7, também confirmam a influência da relação água/cimento.

**Tabela 7: Influência da relação a/c na carga máxima do parafuso.**

Relação a/c	$L_b$ (cm)	$P_b$ (kN)
0,40	200	180
0,46	200	167
0,50	200	~140

Fonte: Adaptado de Kristjánsson (2014).

Com intuito de obter argamassas com diferentes propriedades mecânicas através de aditivos, Kilic *et al.* (2002) acrescentaram areia silicosa (100  $\mu\text{m}$ ; 500  $\mu\text{m}$ ), cinza volante (*fly ash*) (10  $\mu\text{m}$ ; 200  $\mu\text{m}$ ) com proporção de 10% do peso do cimento e cimento branco na proporção água/cimento de 0,40. Os resultados obtidos, juntamente com os resultados sem aditivo, se encontram na Tabela 8.

**Tabela 8: Influência dos aditivos e tempo de cura na carga máxima.**

Tipo de argamassa	$P_b$ (kN)	$\tau_g$ (Mpa)	$\tau_b$ (MPa)	$A_b$ (cm <sup>2</sup> )	Tempo de cura (dias)
a/c = 0,40	16,53	2,04	1,94	84	1
a/c = 0,40	43,75	4,99	5,20	84	3
a/c = 0,40	55,28	6,22	6,63	84	5
a/c = 0,40	57,59	7,95	6,83	84	7
a/c = 0,40	59,84	9,17	7,14	84	14
10% areia	55,45	6,73	6,73	83	21
10% cinza	58,15	7,34	6,32	83	21
5% cinza	56,01	8,05	6,73	83	21
Cimento branco	58,15	8,15	7,03	83	21
a/c = 0,40	75,26	10,39	7,34	102	21
a/c = 0,38	77,39	10,70	7,54	102	21
a/c = 0,36	78,99	11,30	7,75	102	21
a/c = 0,34	80,87	11,93	7,95	102	21

Fonte: Adaptado de Kilic *et al.* (2002)

Em relação a todas as alterações feitas na argamassa de cimento, os aditivos não apresentaram resultados significativos o suficiente na capacidade de carga, apesar da resistência ao cisalhamento e a força de adesão apresentarem, no geral, bons resultados.

Observar-se também, que o tempo de cura influencia na estabilidade do parafuso. Comparando os resultados da relação a/c de 0,4, quanto maior o tempo de cura, maior a força de adesão. Além disso, a capacidade de carga cresce significativamente.

Diferente dos resultados obtidos na argamassa de cimento, os aditivos podem fazer uma grande diferença na capacidade de carga dos parafusos ancorados com resina. Para que o sistema funcione, o parafuso deve fragmentar o plástico do cartucho e misturar os componentes da resina durante a instalação.

De forma a determinar a ação do aditivo na capacidade de carga, Cao *et al.* (2016) realizaram testes de arrancamento em 3 tipos de parafusos, ancorados com resina de poliéster e pequenas partículas de aço como aditivo e obteve os resultados da Tabela 9.

**Tabela 9: Carga máxima com e sem aditivo.**

Parafuso	Carga máxima (kN)	
	Sem aditivo	Com aditivo
1	92	108
2	115	135
3	79	90

**Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2016)**

A carga máxima aumentou com o uso do aditivo que, através do intertravamento mecânico, que é um efeito de chaveamento (*keying effect*) criado pelas partículas no caso de deslizamento do parafuso, aumentando a força de adesão.

O enlramento (*gloving*), que consiste no envolvimento do parafuso pelo plástico do cartucho, pode afetar a transferência de carga no sistema de ancoragem. Neste mesmo experimento, o aditivo fornece uma forma de reduzir significativamente o enlramento, gerando uma força extra para fragmentação do envoltório e ampliando a faixa de trituração no processo de instalação do parafuso. A Figura 26 mostra a fragmentação do envoltório de plástico com e sem aditivo.



**Figura 26: Fragmentos plásticos com e sem aditivos.**  
**Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2016)**

A fim de verificar o quanto o enlramento afeta a transferência de carga, que é o mecanismo pelo qual a força gerada é mantida no parafuso como consequência da deformação do maciço, Craig (2012) apresentou testes de arrancamento utilizando dois tipos de configuração da cápsula: catalizador à base de água (1/3 de volume) com mastic (2/3 de volume) e catalizador a base de óleo (7% do volume) com mastic (93% do volume).

Os resultados para os testes que não consideraram a presença de enlramento, foram de 12tf a 15tf, e os que consideraram enlramento foram de 12tf a 13tf. Os resultados não indicaram grande diferença na força de adesão dos testes.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta as principais propriedades que afetam a capacidade de carga do sistema de ancoragem de acordo com testes de arrancamento feito por outros autores.

Tanto o comprimento ancorado quanto o diâmetro do parafuso, têm influência significativa na capacidade de carga, porém os resultados indicaram que a capacidade depende principalmente das propriedades mecânicas da argamassa utilizada, que podem ser alteradas. Melhorar as propriedades mecânicas do material de injeção aumenta a capacidade de carga do parafuso.

A proporção água/cimento não pode ser elevada, pois parte da água é consumida na hidratação do cimento e isso reduz a resistência a longo prazo. Do mesmo modo tal relação não pode ser baixa, pois afeta a bombeabilidade. A proporção ótima indicada pelos testes varia entre 0,34 e 0,4.

O tempo de cura também tem grande influência na estabilidade do parafuso. Ao aumentar o tempo de cura, a força de adesão e capacidade de carga do parafuso também aumentam.

A utilização de aditivos não apresentou muita diferença na argamassa de cimento, porém na argamassa de resina, o aditivo utilizado atuou com o efeito de chaveamento, favorecendo a resistência ao cisalhamento e aumentando a capacidade de carga. Além disso, proporcionou uma melhor fragmentação do plástico do cartucho.

Os testes realizados por Craig (2012) indicaram que o enlívamento não é prejudicial para a força de adesão na superfície parafuso/resina, como foi considerado.

Os estudos realizados por Cao *et al.* (2016), Bajwa & Li (2017), Kilic *et al.* (2002) e Kristjánsson (2014) podem servir de base para escolha dos materiais e limitação da quantidade de testes. Como tais características e propriedades variam de acordo com o parafuso e argamassa utilizada é indicada a realização de testes a fim de adotar o melhor procedimento.

Dessa forma, os objetivos propostos nesse estudo foram alcançados.

## **9 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

Este trabalho buscou não só estudar os métodos de ancoragens mais usuais, como também comparar as variáveis que afetam a capacidade de carga dos parafusos. Como dito anteriormente, as características e propriedades variam de acordo com o parafuso e argamassa utilizada.

Sendo assim, são apresentadas as possíveis considerações para estudos posteriores, que se acredita serem pontos interessantes a serem explorados:

- Realizar testes de arrancamento com argamassa de resina e cimento, variando os comprimentos ancorados, diâmetro do furo e dos parafusos, a fim de comparar qual argamassa atua melhor na ancoragem química.
- Realizar testes comparativos com a resina de poliéster e a de silicatos, que vem sendo inserida atualmente no mercado.
- Pesquisar sobre a ocorrência de enlramento e, através de testes, averiguar se realmente é prejudicial na força de adesão na interface parafuso/resina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, AA. DSI Underground. Comunicação na Semana Integrada de Engenharia. UFOP. 2018.

ABC POLYMER INDUSTRIES. Disponível em: <<https://abcpolymerindustries.com/fiber-reinforced-shotcrete/>>. Acesso em: Março 2019.

ASTM. **Standard test method for rock bolt anchor pull test**. West Conshohocken: [s.n.]. 2014.

BAJWA, P. S.; HAGAN, P.; LI, D. **A comparison between resin and a cementitious material in the grouting of cable bolts**. University of Wollongong. Wollongong, p. 193-203. 2017.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining**. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2006. 626 p.

BULLETIN. Disponível em: <<https://www.ausimmbulletin.com/feature/review-ventilation-gas-management-underground-mines/>>. Acesso em: Março 2019.

CAO, C.; REN, T.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; WANG, F. Experimental investigation of the effect of grout with additive in improving ground support. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Xuzhou, v. 85, p. 52 - 59, 2016.

CAO, C.; REN, T.; COOK, C. D. Introducing aggregate into grouting material and its influence on load transfer of the rock bolting system. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 24, p. 325 - 328, 2014.

CRAIG, P. Addressing resin loss and gloving issues at a mine with coal roof. **Coal Operators' Conference**, Wollongong, p. 120 - 128, 2012.

DALDEGAN, E. Engenharia Concreta, 2016. Disponível em: <<https://engenhariaconcreta.com/concreto-projetado-conheca-as-principais-caracteristicas/>>. Acesso em: Março 2019.

ENCYCLOPÆDIA Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/rock-bolt/images-videos/media/506071/124432>>. Acesso em: Março 2019.

GEOBRUGG. Disponível em: <<https://www.geobrugg.com/de/MESHA-Installation-Handler-7977,7859.html>>. Acesso em: Maio 2019.

GONTIJO, A. **Proposta e desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo de convergência em ambientes subterrâneos**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 100. 2017.

HILTI. Disponível em: <[https://www.hilti.sa/content/dam/documents/pdf/meta-sa/Hilti%20OST\\_KSA.pdf](https://www.hilti.sa/content/dam/documents/pdf/meta-sa/Hilti%20OST_KSA.pdf)>. Acesso em: Abril 2019.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground excavations in rock**. 1. ed. Londres: CRC Press, 1980.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of underground excavations in hard rock**. 1. ed. Londres: CRC Press, 1995.

HOEK, E.; WOOD, D. F. **Support in underground hard rock mines**. Underground Support Systems. Montreal: [s.n.]. 1987. p. 1-6.

HUTCHINSON, D. J.; DIEDERICHS, M. S. **Cableboltig in underground mines**. 1. ed. Richmond, B. C.: BiTech, 1996.

HYETT, A. J.; BAWDEN, W. F.; COULSON, A. L. Physical and mechanical properties of normal Portland cement pertaining to. **Rock support in mining and underground construction**, Rotterdam, p. 341 - 348, 1992.

IANNACHIONE, A.; BAJPAYEE, T. S.; PROSSER, L. Methods for determining roof fall risk in underground mines, 2007.

INTERNATIONAL, A. **Standart test method for rock bolt anchor pull test**. [S.l.]: [s.n.]. 2014.

ISMR. **Suggested method for determining the strength of a rock bolt anchor (pull test)**. Salzburg: [s.n.]. 1993.

KILIC, A.; YASAR, E.; CELIK, A. G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt. **Tunneling and underground space technology**, 17, 2002. 355 - 362.

KRISTJÁNSSON, G. **Rock bolting and pull out test on rebar bolts**. Norwegian University of Science and Technology. Trontêmio, p. 126. 2014.

LANE, K. Tunnels and underground excavations. **Encyclopedia Britannica**, 2018. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/tunnel>>. Acesso em: Fevereiro 2019.

LUO, J. et al. **A new rock bolt design criterion and knowledge-based expertsystem for stratified roof**. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, p. 189. 1999.



MAIL ONLINE. Disponível em: <<https://www.dailymail.co.uk/news/article-2633713/Rare-early-flash-photography-images-Cornish-miners-digging-tin-1890s-reveal-perilous-conditions-toiled.html>>. Acesso em: Abril 2019.

MARTINS, C. F. V. **Avaliação das normas reguladoras de mineração para minas subterrâneas no Brasil e da legislação mineral brasileira para segurança em subsolo**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 182. 2017.

MASCARENHAS, A. M. **Estudo de caso: escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o método NATM - região portuária, centro do Rio de Janeiro/RJ**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 64. 2014.

MOSHAB. **Surface rock support for underground mines - Code of practice**. [S.l.]. 1999.

NCM. Disponível em:

<[https://www.ncm.co.za/downloads/brochure/6793\\_NCM\\_Rockstop\\_Brochure\\_SA\\_BR026-R08.pdf](https://www.ncm.co.za/downloads/brochure/6793_NCM_Rockstop_Brochure_SA_BR026-R08.pdf)>. Acesso em: Março 2019.

PRIESTER, M.; HENTSCHL, T.; BENFHIN, B. **Tools for Mining**: Techniques and processes for small scale mining. Braunschweig: Vieweg, 1993. 537 p.

SILVA, J. M.; LIMAS, C. A.; TERRA, K. L. M. Tendências na sustentação de minas subterrâneas. **Brasil Mineral**, São Paulo, n. 168, p. 50 - 56, 1998.

SILVA, J. M. Ancoragens, Estabilidade de Escavações Subterrâneas. DEMIN/EM/UFOP. 2018.

SILVA, J. M. Estabilidade de Escavações Civas e de Mineração. In *The Mine*, n.73,p.31-33. 2018b.

SILVEIRA, T. **Técnicas de sustentação em minas subterrâneas (Noções gerais)**. Ouro Preto: [s.n.], 1987.

SINGH, B.; GOEL, R. K. **Tunneling in weak rocks**. 1. ed. Londres: Elsevier, 2006.

VILLAESCUSA, E. The reinforcement process in underground mining. **ResearchGate**, Kalgoorlie, 1999.