



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

MILENA MILANEZ RODRIGUES AGUIAR

**MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES EM ABERTURAS
SUBTERRÂNEAS POR TIRANTES DE ANCORAGEM QUÍMICA E MECÂNICA –
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

CRATEÚS
2025

MILENA MILANEZ RODRIGUES AGUIAR

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES EM ABERTURAS
SUBTERRÂNEAS POR TIRANTES DE ANCORAGEM QUÍMICA E MECÂNICA – UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê de
Negreiros Moreira.

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A23m Aguiar, Milena Milanez Rodrigues.
Métodos de Dimensionamento de Suportes em Aberturas Subterrâneas por Tirantes de Ancoragem
Química e Mecânica : Uma Revisão Bibliográfica / Milena Milanez Rodrigues Aguiar. – 2025.
71 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2025.

Orientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.

1. Dimensionamento de Suportes. 2. Métodos de Dimensionamento. 3. Aberturas Subterrâneas. I. Título.
CDD 622

MILENA MILANEZ RODRIGUES AGUIAR

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES EM ABERTURAS
SUBTERRÂNEAS POR TIRANTES DE ANCORAGEM QUÍMICA E MECÂNICA – UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê de
Negreiros Moreira.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

À minha família e àqueles que, com sua
infinita bondade, sempre me guiaram ao longo
da jornada.

.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pelo apoio incondicional e pelo exemplo de força e resiliência. À minha irmã, pelo apoio constante e por sempre acreditar em mim e no meu potencial. O incentivo de ambas foi essencial para que eu permanecesse firme.

Aos meus avós, por todo o afeto, conselhos e ensinamentos que marcaram minha trajetória.

Aos amigos que fiz ao longo desta caminhada, agradeço pelas trocas, reflexões e pelo auxílio mútuo, onde nosso compartilhamento de conhecimentos transcendeu as fronteiras acadêmicas.

À LARMI, que representou um verdadeiro divisor de águas na minha graduação.

Aos professores que tive o privilégio de acompanhar, especialmente aqueles que, mesmo diante das adversidades do campus, se dedicaram a oferecer um ensino de excelência.

Ao meu orientador e à banca examinadora, pela valiosa dedicação de tempo e pelas contribuições feitas a este trabalho.

Aos funcionários da UFC, por sua incansável dedicação em manter o funcionamento adequado dos laboratórios, salas, biblioteca, espaços de convivência, entre outros.

À UFC, pelo ensino de qualidade que proporcionou ao longo dessa jornada.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para esta caminhada, meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

Ao se realizar uma escavação em um maciço rochoso, as tensões preexistentes neste material sofrem uma redistribuição significativa, resultando em um novo estado de tensões que pode comprometer a estabilidade da abertura. A fim de mitigar os riscos de desestabilização e garantir a segurança das operações, são empregadas diversas técnicas de suporte, as quais envolvem a instalação de estruturas de contenção no perímetro da escavação ou no próprio maciço rochoso. Dentre os sistemas de suporte mais comumente empregados, destacam-se o concreto projetado, as telas metálicas, as cambotas e os arcos metálicos. Além disso, os sistemas de reforço, como os tirantes ancorados com resina, os *swellex*, os *split-sets* e os cabos *bolt*, têm se mostrado cada vez mais eficientes e versáteis. O presente estudo teve como objetivo principal realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de dimensionamento de suportes e reforços utilizados em escavações subterrâneas, com foco nas técnicas mais empregadas atualmente. A partir dessa revisão bibliográfica sistemática, foi possível compilar e sistematizar as informações disponíveis na literatura técnica, reunindo dados que visam auxiliar tomadores de decisão no processo de dimensionamento de reforços em aberturas subterrâneas, no que tange tirantes com ancoragem química e tirantes do tipo *Swellex*. O dimensionamento dos parafusos segue as diretrizes da ABNT NBR 5629/2018 e normas internacionais, que estabelecem procedimentos de ensaio para determinar a capacidade de tensão dos componentes do sistema de ancoragem, garantindo um dimensionamento seguro e eficaz.

Palavras-chave: dimensionamento de suportes; métodos de dimensionamento; aberturas subterrâneas.

ABSTRACT

When excavating a rock mass, the pre-existing stresses within the material undergo significant redistribution, resulting in a new state of stresses that may compromise the stability of the opening. To mitigate the risks of destabilization and ensure the safety of underground operations, various support techniques are employed, which involve the installation of containment structures either around the perimeter of the excavation or directly in the rock mass. Among the most commonly used support systems are shotcrete, wire mesh, steel ribs, and steel arches. In addition, reinforcement systems such as resin-anchored bolts, swellex, split-sets, and cable bolts have proven increasingly efficient and versatile. This study primarily aimed to conduct a bibliographic review of the methods for designing supports and reinforcements used in underground excavations, with a focus on the most widely applied techniques today. Through this systematic bibliographic review, it was possible to compile and organize the information available in the technical literature, bringing together data intended to assist decision-makers in the process of designing reinforcements in underground openings, especially resin-anchored bolts and swellex bolts. The design of the bolts follows the guidelines of ABNT NBR 5629/2018 and international standards, which establish testing procedures to evaluate the tensile capacity of the components of the anchoring system, ensuring safety and effectiveness in the design process.

Keywords: sizing of supports; sizing methods; underground openings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimento para cálculo do RQD.....	18
Figura 2 – Estado de tensão geral e estado de tensão principal em um ponto em um sólido... 33	33
Figura 3 – Suporte de concreto projetado.....	37
Figura 4 – Instalação de tela.....	38
Figura 5 – Cambota metálica instalada em abertura subterrânea	40
Figura 6 – Principais sistemas de ancoragem.....	42
Figura 7 – Representação gráfica de tirante ancorado com resina	43
Figura 8 – Sistema <i>Swellex</i> da Atlas Copco	44
Figura 9 – <i>Split-Set</i> : (a) parafuso instalado em rocha; (b) corte transversal do perfil longitudinal do furo com o parafuso instalado; e (c) corte transversal ao parafuso instalado.....	45
Figura 10 – Representação gráfica de Cabo <i>Bolt</i> instalado em rocha	47
Figura 11 – Fluxograma da sequência metodológica	49
Figura 12 – Formas de rosca-padrão ISO e Unified National	57
Figura 13 – Gráfico de carga x deslocamento total.....	58
Figura 14 – Sequência de instalação de tirante com ancoragem em coluna pontual.....	61
Figura 15 – Representação de tirante e cartuchos de resina em furo, ancoragem em coluna total	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Qualidade do maciço rochoso conforme classes de qualidade a partir do RQD.....	19
Tabela 2 - Parâmetros de classificação de um maciço rochoso pelo sistema RMR.....	22
Tabela 3 - Ajuste da orientação das descontinuidades em relação ao eixo principal da escavação.	24
Tabela 4 - Caracterização da condição das descontinuidades	25
Tabela 5 - Classificação do maciço rochoso	26
Tabela 6 - Índice do número de famílias de descontinuidades (J_n).....	28
Tabela 7 - Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r)	28
Tabela 8 - Índice do grau de alteração das descontinuidades (J_a).....	29
Tabela 9 - Fator de redução de água (J_w).....	30
Tabela 10 - Estado de tensão do maciço rochoso (SRF)	31
Tabela 11 - Classificação do maciço rochoso conforme o índice Q	32
Tabela 12 – Índice de Suporte da Escavação (ESR)	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1).....	18
Equação (2).....	19
Equação (3).....	19
Equação (4).....	20
Equação (5).....	27
Equação (6).....	59
Equação (7).....	60
Equação (8).....	60
Equação (9).....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Classificação de Maciços Rochosos.....	16
3.1.1	<i>Sistemas de Classificação Geomecânica</i>	17
3.1.1.1	Rock Quality Designation (RQD)	17
3.1.1.2	Sistema RMR (Rock Mass Rating)	19
3.1.1.3	Sistema Q (Tunneling Quality Index)	26
3.2	Tensões em Maciços Rochosos.....	33
3.3	Estabilização de Aberturas Subterrâneas	35
3.3.1	<i>Concreto Projetado.....</i>	37
3.3.2	<i>Telas (Malhas)</i>	38
3.3.3	<i>Arcos Metálicos ou Cambotas.....</i>	39
3.3.4	<i>Ancoragens</i>	40
3.3.4.1	Tirante Ancorado com Resina	43
3.3.4.2	Swellex (tirante expansivo)	44
3.3.4.3	Split-Set (cavilha).....	45
3.3.4.4	Cabo Bolt.....	46
3.4	Revisão Bibliográfica	47
4	METODOLOGIA.....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	Dimensionamento De Suportes	52
5.1.1	<i>Ancoragens</i>	52
5.1.1.1	Tirante Ancorado com Resina	53
5.1.1.2	Tirante Expansivo (Swellex)	63
6	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A mineração, seja a céu aberto ou subterrânea, representa uma atividade de suma importância, tanto do ponto de vista econômico quanto social. Este setor é vital para a extração de recursos minerais que são indispensáveis ao desenvolvimento industrial e tecnológico, além de desempenhar um papel crucial na geração de empregos e na promoção do crescimento econômico em diversas regiões (NAHAS *et al.*, 2019).

De acordo com Curi (2017), a mineração subterrânea envolve a criação e construção de poços e galerias que permitem o acesso a depósitos minerais situados em grandes profundidades na crosta terrestre. Este método de extração mineral é caracterizado por sua complexidade técnica e pela necessidade de um planejamento minucioso, que inclui a implementação de rigorosas medidas de segurança.

Essa atividade enfrenta desafios substanciais, particularmente no que se refere à proteção dos trabalhadores e à manutenção da estabilidade das aberturas subterrâneas. A segurança dos operários é uma preocupação primordial, exigindo a adoção de tecnologias avançadas de monitoramento e controle, bem como a aplicação de práticas de engenharia que garantam a integridade das escavações (RIZZO, 2021).

Conforme mencionado por Silva (2007), a criação de cavidades no subsolo altera o estado de tensões *in situ* do maciço rochoso, o que pode demandar a instalação de suportes e/ou reforços para estabilizar as escavações e prevenir seu colapso. De acordo com Barros (2023), os desmoronamentos ou colapsos de minas estão entre os acidentes de mineração mais frequentemente relatados globalmente. Portanto, garantir um ambiente seguro para a extração de recursos minerais é de suma importância.

Para tal, diversos sistemas de estabilização de aberturas subterrâneas foram desenvolvidos e aplicados ao longo do tempo. A literatura especializada discute extensivamente o dimensionamento de estruturas de suporte e reforço. No entanto, há uma notável escassez de materiais em português que abordem o dimensionamento de suportes de maneira abrangente e não restrita a casos específicos.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo compilar, com base em bibliografias, os métodos e técnicas de dimensionamento utilizados na estabilização e contenção de maciços rochosos. Foram abordados métodos e técnicas para o dimensionamento de tirantes de ancoragem química, como os tirantes ancorados com resina, e de ancoragem

mecânica, como o sistema *Swellex*, frequentemente empregados na estabilização de escavações subterrâneas.

Este estudo buscou compilar e sintetizar duas das principais técnicas e abordagens utilizadas na estabilização e no suporte de estruturas subterrâneas, proporcionando uma base teórica que pode servir como referência para futuros estudos e aplicações práticas na área.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica sistemática sobre os métodos de dimensionamento de suportes em aberturas subterrâneas, com foco em realces e galerias.

2.2 Objetivos Específicos

- Explicar os métodos de classificação de maciços rochosos e a análise de tensões, tanto in situ quanto induzidas;
- Apresentar as diferentes técnicas de estabilização de aberturas subterrâneas;
- Explicar sobre o dimensionamento de tirantes de ancoragem química e mecânica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico são apresentados os assuntos que fundamentam este trabalho, apreciando questões indispensáveis para o tema proposto. Para tal, primeiro será discorrido sobre os métodos empíricos mais utilizados para classificar e caracterizar os maciços rochosos a fim de determinar a estabilidade das escavações, em seguida, será dissertado sobre o conceito de tensão em maciços rochosos, e, por fim, as técnicas mais relevantes de estabilização de aberturas subterrâneas para garantir a segurança e estabilidade da escavação.

3.1 Classificação de Maciços Rochosos

Antes de iniciar qualquer projeto de engenharia que envolva escavações em rochas, é importante conhecer as características geomecânicas do maciço rochoso. Essas propriedades são cruciais para garantir a estabilidade do maciço e a segurança das operações, tanto em escavações a céu aberto quanto subterrâneas. Para obter informações sobre essas características, os engenheiros utilizam sistemas de classificação específicos. Esses sistemas reúnem dados relevantes e propõem índices para qualificar os maciços rochosos (ABICHEQUER, 2015; AQUINO, 2021).

De acordo com Price (2009, p.123)

Uma classificação busca estabelecer uma qualidade de maciço rochoso que determinará a provável reação do maciço a um processo de engenharia a ser realizado nele ou, por exemplo, a quantidade de suporte que uma escavação requer para manter a estabilidade.

Price (2009) menciona, que a descrição do maciço rochoso confere informações a respeito das descontinuidades, distribuição tridimensional e natureza dos elementos e materiais que o integram. A classificação geomecânica de um maciço rochoso é uma forma de organizar, em uma ordem hierárquica, as características e aspectos do material que o compõe, categorizando-o em classes ou grupos, em que os comportamentos distintos do meio rochoso sejam associados às condições de solicitações consideradas (MESQUITA, 2008).

Conforme Aquino (2021), a classificação de um maciço rochoso é realizada a partir da sua caracterização geomecânica, que tem como propósito analisar e classificar o maciço com o auxílio de um conjunto de propriedades. Os parâmetros geotécnicos que serão úteis na caracterização do maciço são obtidos por meio de ensaios *in situ* e laboratoriais e observações

de campo. Para obtenção dessas informações, são utilizados sistemas de classificação que são apresentados a seguir.

3.1.1 Sistemas de Classificação Geomecânica

Existem diversos sistemas de classificação geomecânica para maciços rochosos, no entanto, de acordo com Wolpp (2018), aqueles amplamente empregados em projetos de engenharia que envolvem escavações em rochas, atualmente são: sistema RMR (*Rock Mass Rating*) elaborado por Bieniawski (1973), sistema Q (*Tunneling Quality Index*) proposto por Barton *et al.* (1974) e o RQD (*Rock Quality Designation*) proposto por Deere (1963).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) desenvolve e publica normas técnicas com elevada aceitação mundial, a norma com designação D5878 é um guia elaborado para auxiliar na classificação de maciços rochosos. Dentre os sistemas de classificação considerados estão os citados anteriormente. A seguir, são apresentados os três sistemas e seus parâmetros de qualificação.

3.1.1.1 Rock Quality Designation (RQD)

Em 1964, Deere desenvolveu o *Rock Quality Designation* (RQD), o primeiro índice quantitativo, para realizar uma classificação quantitativa da qualidade do maciço rochoso a partir de testemunhos de sondagem (SINGH; GOEL, 2011).

Apesar de não ser suficiente para realizar uma descrição completa do maciço rochoso, o RQD apresenta melhor desempenho quando utilizado para seleção de suportes. Dessa forma, vem sendo aplicado como parâmetro geomecânico classificatório em sistemas de qualificação (DEERE *et al.*, 1967 apud BIENIAWSKI, 1989, p. 21-22).

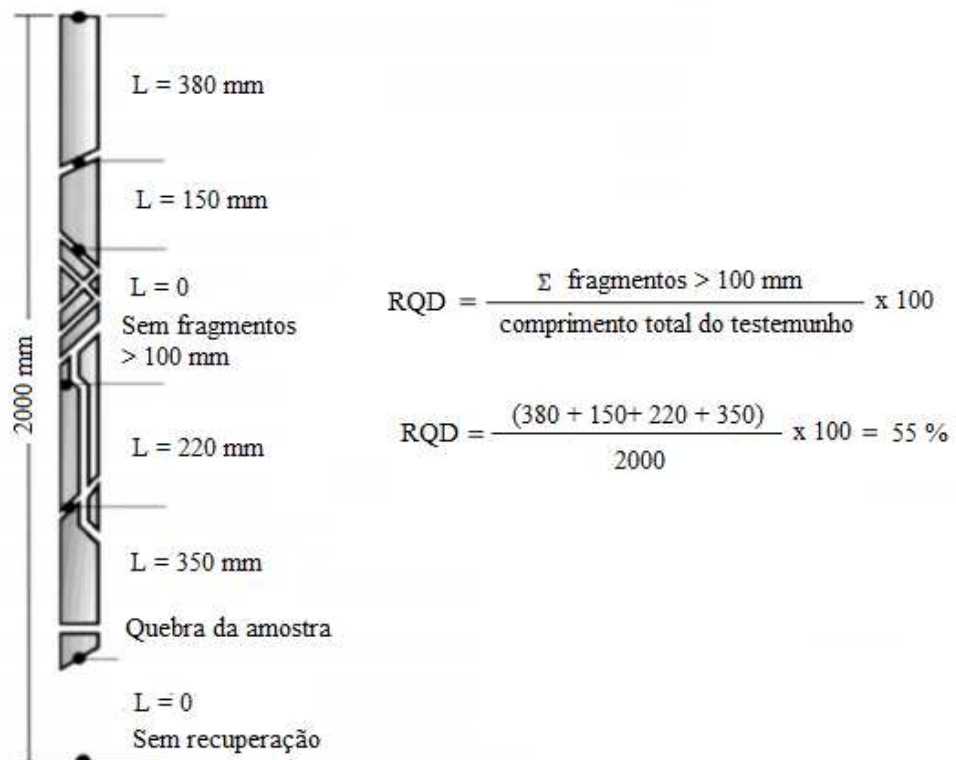
De acordo com Hoek (2007), para determinação do RQD são consideradas porcentagens de porções de rochas dos testemunhos de sondagem que apresentam comprimento maior que 100 mm do comprimento total da amostra, medidas ao longo do eixo central. As amostras devem ter diâmetro mínimo de 54,7 mm, e os furos precisam ser perfurados com barrilete duplo. São considerados apenas testemunhos de rocha sã e coesas, que não apresentem elevado grau de alteração (MESQUITA, 2008).

O cálculo do RQD é realizado conforme a eq. (1)

$$RQD = \frac{\sum \text{fragmentos} > 100\text{mm}}{\text{Comprimento total do testemunho}} \times 100 \quad (1)$$

Na Figura 1 é possível observar os procedimentos adotados para medição dos comprimentos para o cálculo do RQD. Comprimentos menores que 100 mm não são incluídos no cálculo. Portanto, estes comprimentos são considerados como nulos e não influenciam no valor final do RQD.

Figura 1 – Procedimento para cálculo do RQD



Fonte: Adaptado de Deere *et al.* (1989).

Com o valor obtido no cálculo do RQD, é realizada a classificação conforme Tabela 1, onde são apresentadas as cinco classes de qualidade do maciço rochoso estabelecidas por Deere. Dessa forma, o maciço rochoso é classificado de acordo com a sua qualidade, que varia de muito ruim a excelente.

Tabela 1 - Qualidade do maciço rochoso conforme classes de qualidade a partir do RQD

RQD (%)	Classe	Qualidade
< 25%	I	Muito Ruim
25 - 50	II	Ruim
50 - 75	II	Regular
75 - 90	IV	Boa
90 - 100	V	Excelente

Fonte: Adaptado de Deere *et. al.* (1989).

Conforme Renó (2014), quando aplicado para a classificação de escavações subterrâneas, o RQD é calculado segundo o método desenvolvido por Palmström (1982). O valor é determinado a partir do índice J_v , conforme a eq. (2). Esse método é amplamente utilizado e reconhecido na área de geologia.

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (2)$$

O parâmetro J_v é um índice volumétrico do número de juntas por unidade de comprimento em um volume de 1 m³, cujo valor é obtido através do somatório do número de descontinuidades por metro (frequência das juntas de cada família), conforme a eq. 3 (WOLLP, 2018).

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} \quad (3)$$

Onde S_i é o espaçamento em metros entre as juntas da mesma família.

3.1.1.2 Sistema RMR (Rock Mass Rating)

Também conhecido como Classificação Geomecânica, o sistema de classificação de maciços rochosos *Rock Mass Rating* (RMR) foi elaborado por Bieniawski (1973), sendo utilizado inicialmente na execução e dimensionamento de escavações subterrâneas (CASTRO, 2004 apud FABRICIO, 2015, p. 4).

Bieniawski (1989) menciona que o sistema RMR é um método de classificação quantitativa com base em fatores qualitativos e quantitativos, que vem sofrendo modificações

conforme a necessidade de se adequar às normas internacionais e novos casos e estudos de engenharia são disponibilizados.

De acordo com Hudson e Harrison (1997), assim como o sistema Q, o RMR utiliza parâmetros substanciais às condições geomecânicas do maciço rochoso e sua geometria. O sistema é baseado em seis fatores que são determinados para cada unidade estrutural (SINGH; GOEL, 2011). São eles:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (RMR1)
2. Grau de fraturamento do maciço - RQD (RMR2)
3. Persistência das descontinuidades (RMR3)
4. Condição das descontinuidades (RMR4)
5. Presença de água nas fraturas (RMR5)
6. Orientação das descontinuidades em relação à estrutura projetada (B)

Conforme Bieniawski (1989) o maciço rochoso deve ser dividido em regiões estruturais para que se possa ser aplicada a classificação, onde cada região é classificada separadamente. As divisões ocorrem geralmente nos limites das zonas estruturais em que são observados diques, falhas, zonas de cisalhamento e mudança no tipo de rocha. Em casos que, se tratando de um mesmo tipo de rocha, o maciço apresentar espaçamentos com mudanças expressivas ou mudanças nas características das descontinuidades, faz-se necessária sua divisão em regiões estruturais menores (HOEK, 2007).

São associados pesos a cada parâmetro classificatório, como é observado nas Tabelas 2, 3 e 4, sendo o fator B qualitativo, referente ao ajuste da orientação das descontinuidades, assumindo valor negativo. Ao final são somados os seis parâmetros, resultando em um valor adimensional. Com esse valor o maciço é classificado. A classificação é dividida em cinco classes que variam de 0-100 (Tabela 5), cada classe possui um conjunto de 20 valores (WOLPP, 2018).

O valor do RMR é determinado pela eq. (4).

$$\text{RMR} = \text{RMR1} + \text{RMR2} + \text{RMR3} + \text{RMR4} + \text{RMR5} + (-\text{B}) \quad (4)$$

O RMR possui aplicação simples, onde a obtenção dos parâmetros de análise utilizados consiste em mapeamento geológico e furos de sondagem. Sua utilização necessita de que todos os dados sejam constatados, não sendo recomendado utilizar essa classificação caso não tenha acesso a todos eles (BIENIAWSKI, 1989).

Na Tabela 2, é demonstrado como é realizada a atribuição de pesos a cinco dos seis parâmetros utilizados na classificação desenvolvida por Bieniawski. (1989).

Tabela 2 - Parâmetros de classificação de um maciço rochoso pelo sistema RMR

Parâmetros		Valores							
1	Resistência da Rocha Intacta	Resistência à compressão pontual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Compressão Uniaxial		
		Resistência à compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25			
	Pesos	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm			
	Pesos	20	15	10	8	5			
4	Condições das Descontinuidades	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes da rocha não alteradas	Superfícies pouco rugosas, separação < 1 mm, paredes pouco alteradas	Superfícies pouco rugosas, separação < 1 mm, paredes da rocha muito alterada	Superfícies polidas/lisas ou preenchimento com espessura < 5 mm ou separação de 1-5 mm (contínua)	Preenchimento mole com espessura > 5 mm ou separação > 5 mm (contínua)			
		Pesos	30	25	20	10	0		

	Vazão por 10 m de comprimento do túnel (l/m)	Nenhuma	< 10	10-25	25-125	> 125
5	Presença de água					
	Pressão da água na junta/ σ tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Condições Gerais	Seco	Água intersticial	Úmido	Infiltração moderada	Fluxo
	Pesos	15	10	7	4	0

Fonte: Adaptado de Bieniawski. (1989).

Na Tabela 3 são apresentados os valores que o parâmetro B assume conforme a orientação das descontinuidades em relação ao eixo principal da escavação.

Tabela 3 - Ajuste da orientação das descontinuidades em relação ao eixo principal da escavação.

Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 0-20°
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: Adaptado de Mesquita. (2008).

A Tabela 4 é complementar à Tabela 2 em relação aos pesos atribuídos ao RMR 4, que está relacionada com a condição das descontinuidades presentes no maciço.

Tabela 4 - Caracterização da condição das descontinuidades

Persistência da descontinuidade (comprimento)	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura (separação)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1-10 mm	1-5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Pouco rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Pouco alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Adaptado de Mesquita. (2008).

Na Tabela 5 estão dispostas as cinco classes do RMR com a indicação do tempo médio de autossustentação para aberturas em túneis sem sistema de suporte instalado, de acordo com a classe do maciço rochoso.

Tabela 5 - Classificação do maciço rochoso

RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Fraca	Muito fraca
Tempo médio de autossustentação	20 anos p/15 m de vão	1 ano p/10 m de vão	1 semana p/5 m de vão	10 horas p/2,5 m de vão	30 minutos p/1 m de vão
Coesão do maciço (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Ângulo de atrito do maciço	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	< 15°

Fonte: Adaptado de Mesquita, (2008).

Conforme o valor do RMR, o maciço pode ser classificado em classes de qualidade da rocha que variam de I a V, de muito boa a muito fraca, respectivamente. O tempo médio de autossustentação pode alcançar até 20 anos para escavações com 15 metros, como é o caso de um maciço rochoso de classe I.

3.1.1.3 Sistema Q (*Tunneling Quality Index*)

O sistema Q ou *Tunneling Quality Index* foi proposto por Barton, Lien e Lunde em 1974, a partir da análise de 212 casos históricos de túneis da Escandinávia, com a finalidade de auxiliar nos projetos de classificação e seleção de suportes em escavações subterrâneas. Esse sistema consiste em realizar uma qualificação quantitativa do maciço rochoso (BIENIAWSKI, 1989).

De acordo com Price (2009), na classificação obtida utilizando o sistema Q, a qualidade do maciço rochoso é expressa por um valor numérico assumido pelo índice Q. Esse valor é determinado com base em seis parâmetros, que são fundamentais para avaliar a qualidade do maciço rochoso. Eles incluem aspectos como a resistência do maciço, as condições das descontinuidades e a presença de água. São eles:

1. RQD;

2. Índice do número de famílias de descontinuidades (J_n);
3. Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r);
4. Índice do grau de alteração das descontinuidades (J_a);
5. Fator de redução de água (J_w);
6. Estado de tensão do maciço rochoso (SRF);

Os valores de cada parâmetro, com exceção do RQD (Tabela 1), são adotados conforme Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10. O valor do índice Q é determinado pela multiplicação do quociente destes parâmetros, conforme eq. (5).

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (5)$$

Conforme Hustrulid e Bullock (2001), o índice Q fornece informações sobre a estabilidade da escavação e auxilia na escolha do sistema de suporte adequado. Além disso, Bieniawski (1989) afirma que os valores de cada quociente, conforme a eq. (5), podem ser interpretados da seguinte forma:

- RQD/ J_n : simboliza o tamanho dos blocos do maciço;
- J_r/J_a : resistência ao cisalhamento das superfícies das fraturas;
- J_w/SRF : simboliza a tensão ativa/existente no maciço rochoso.

O valor de Q, varia em uma escala logarítmica que vai de 0,001 e 1000, distribuída em intervalos de valores absolutos que categorizam a qualidade do maciço rochoso. Barton *et al.* (1974) dividiram em nove categorias, com qualidade do maciço variando de Excepcionalmente Fraco à Excepcionalmente Bom.

Na Tabela 6, é apresentada a atribuição de pesos ao parâmetro J_n conforme a descrição das fraturas presentes no maciço.

Tabela 6 - Índice do número de famílias de descontinuidades (Jn)

Descrição	Valor
Fraturas esparsas ou ausentes	0,5 - 1,0
Uma família de fraturas	2
Uma família, mais fraturas esparsas	3
Dois famílias de fraturas	4
Dois famílias, mais fraturas esparsas	6
Três famílias de fraturas	9
Três famílias, mais fraturas esparsas	12
Quatro ou mais famílias de fraturas	15
Rocha completamente fraturada	20

Fonte: Adaptado de Bieniawski. (1989).

Na Tabela 7, é demonstrado como é realizada a atribuição de pesos ao índice Jr de acordo com a condição das descontinuidades do maciço rochoso.

Tabela 7 - Índice de rugosidade das descontinuidades (Jr)

Descrição	Valor	Notas
a) contato entre as paredes da rocha das descontinuidades		1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão, respectivamente
b) contato entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento		
A Juntas descontínuas	4	2. Adicionar 1 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3 m
B Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C Descontinuidades suaves e onduladas	2	3. Jr igual a 0,5 pode ser usado p/descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direção de menor resistência
D Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F Descontinuidades lisas, planas	1	
G Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) não há contato entre as paredes de rocha no escorregamento		

H	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contato entre as paredes	1
I	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contato entre as paredes	1

Fonte: Adaptado de Bieniawski. (1989).

Na Tabela 8, é exibido os valores a serem atribuídos ao índice Ja conforme o grau de alteração das descontinuidades.

Tabela 8 - Índice do grau de alteração das descontinuidades (Ja)

Descrição		Valor	
a) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades		Ja	ϕ
A	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epibolito)	0,75	
B	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1	25-35°
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2	25-30°
D	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3	20-25°
E	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinita, mica, gesso, talco, clorita, grafita, etc. e pequenas quantidades de argilas expansivas	4	8-16°
b) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc.	4	25-30°
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso subreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6	16-24°

H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8	12-16°
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonita (contínuo, mas com espessura < 5 mm); o valor de Ja depende da porcentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc.	(8-12)	6-12°
c) não há contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J, K, L	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6-8 ou 8-12	6-24°
M	Zonas ou bandas siltosas ou aero-argilosas, com pequena fração de argila	5	
N, O, P	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10-13 ou 13-20	6-24°

Fonte: Adaptado de Bieniawski. (1989).

Na Tabela 9, estão expostos os pesos que são atribuídos ao índice J_w a partir da pressão de água presente no maciço.

Tabela 9 - Fator de redução de água (J_w)

	Descrição	Valor		Notas
		J_w	Pressão d'água aprox. (MPa)	
A	Escavações secas ou pequena afluência de água (< 5 l/min)	1	< 0,1	1. Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais; o parâmetro J_w deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens
B	Afluência média ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1-0,25	
C	Afluência ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25-1	2. Os problemas

	Afluência ou pressão elevada, com considerável			especiais relacionados
D	arrastamento do preenchimento das	0,3	0,25-1	com a formação de
	descontinuidades			gelo não são
E	Afluência excepcionalmente elevada ou pressão	0,2-	> 1	considerados
	explosiva, decaindo com o tempo	0,1		
F	Afluência excepcionalmente elevada ou pressão	0,1-	> 1	
	contínua, sem decaimento	0,05		

Fonte: Adaptado de Bieniawski. (1989).

Na Tabela 10, são demonstrados os pesos a serem atribuídos ao parâmetro SRF, os quais são determinados de acordo com o estado de tensão ao qual o maciço está submetido.

Tabela 10 - Estado de tensão do maciço rochoso (SRF)

	Descrição	Valor	Notas
	a) zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas		
A	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvendo muito descomprimido (todas as profundidades)	10	1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem atravessarem
B	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação ≤ 50 m)	5	
C	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação > 50 m)	2,5	
D	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5	
E	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação ≤ 50 m)	5	
F	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidade da escavação > 50 m)	2,5	

G	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5		
b) rocha competente, problemas de tensões na rocha			σ_c/σ_1	σ_t/σ_1
H	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	> 200	> 13
I	Tensões médias	1	200-10	13-0,66
J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5-2,0	10-5	0,66-0,33
K	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	05-10	5-2,5	0,33-0,16
L	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10-20	< 2,5	< 0,16
c) rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M	Pressão moderada de rocha esmagada	5-10		
N	Pressão elevada da rocha esmagada	10-20		
d) rochas expansivas: atividade química expansiva devida à presença de água				
O	Pressão de expansão moderada	5-10		
P	Pressão de expansão elevada	10-15		

Fonte: Adaptado de Bieniawski. (1989).

Na Tabela 11, após a atribuição de pesos aos seis parâmetros citados anteriormente, é feita a classificação do maciço conforme o valor do índice Q, com o padrão geomecânico variando de péssimo a excelente.

Tabela 11 - Classificação do maciço rochoso conforme o índice Q

Padrão geomecânico do maciço	índice Q
Péssimo	0,0001 - 0,01
Extremamente ruim	0,01 - 0,1
Muito ruim	0,1 - 1,0
Ruim	1,0 - 4,0
Regular	4,0 - 10,0
Bom	10,0 - 40,0
Muito bom	40,0 - 100,0

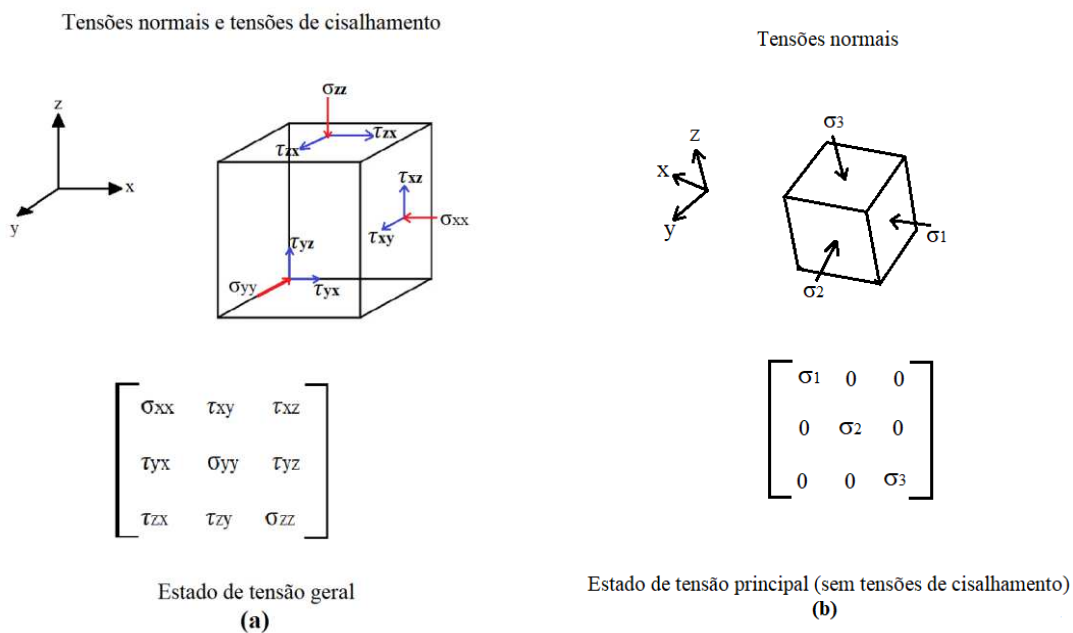
Ótimo	100,0 - 400,0
Excelente	> 400,0

Fonte: Adaptado de Barton, Lien e Lund (1974).

3.2 Tensões em Maciços Rochosos

Segundo Magalhães (1999), do ponto de vista teórico, a tensão é considerada um atributo de um ponto específico, sendo uma grandeza tensorial definida em relação a um sistema de três eixos de referência, conforme Figura 2A. Esse sistema é composto por três componentes de tensão normal e três componentes de tensão de cisalhamento. Em uma orientação específica dos planos triortogonais, as tensões de cisalhamento desaparecem, restando apenas as três componentes de tensão normal, conhecidas como tensões principais, que são perpendiculares aos planos principais (Figura 2B).

Figura 2 – Estado de tensão geral e estado de tensão principal em um ponto em um sólido



Fonte: Adaptado de Magalhães (1999).

A caracterização convencional do campo de tensão *in situ* em maciços rochosos é determinada pelas magnitudes e direções das três tensões principais (σ_1 , σ_2 , σ_3), que correspondem aos autovalores e autovetores do tensor de tensões. Essas tensões são essenciais para entender o comportamento do maciço sob diferentes condições de carga. (MAGALHÃES, 1999).

As tensões presentes em maciços rochosos são de fundamental importância para a segurança e estabilidade de estruturas subterrâneas, como túneis e minas. Essas tensões influenciam diretamente o comportamento das rochas durante as escavações, tornando-se essencial o conhecimento detalhado dessas tensões para projetar estruturas que possam suportar as forças atuantes. A criação de uma cavidade na crosta terrestre, seja a céu aberto ou subterrânea, perturba o equilíbrio do estado de tensão previamente existente no maciço rochoso (SILVA, 2008).

Conforme Kristjánsson (2014) problemas de estabilidade surgem quando as tensões ao redor da escavação excedem a resistência do maciço rochoso, resultando em seu colapso. Tensões mais elevadas, portanto, promovem a instabilidade. Além disso, tensões baixas também podem comprometer a estabilidade de um maciço rochoso articulado devido às tensões normais nas juntas, resultando no deslizamento dos blocos de rocha. Os maciços rochosos presentes na crosta terrestre estão sujeitos a tensões que podem ter origem natural ou ser induzidas por atividades humanas (FERREIRA, 2004).

- **Tensões Naturais (*In situ*)**

As tensões naturais, ou tensões *in situ*, em maciços rochosos referem-se às tensões pré-existentes que ocorrem naturalmente nas rochas antes de qualquer intervenção humana, como escavações ou construções. Neste caso, a tensão é resultante da interação entre o peso próprio do maciço, que gera tensões gravitacionais; o tectonismo, que gera tensões tectônicas; os efeitos térmicos; e os processos físico-químicos, como a precipitação mineral e a recristalização, que constantemente alteram a estrutura das rochas. Além disso, os movimentos tectônicos influenciam o campo de tensões por meio da criação de falhas, fraturas e dobramentos, que, quando sujeitos à erosão, podem gerar um padrão complexo na direção das tensões tectônicas (HAYETT *et al.*, 1986; e HERGET, 1988 apud SILVA, 2015, p. 43).

De acordo com Vallejo (2002), as condições geológicas e morfológicas de uma região podem alterar os campos tensionais gravitacionais, bem como a direção e magnitude das tensões, resultando em anisotropias tensionais. Esses estados de tensões anisotrópicas são principalmente influenciados por fatores como a presença de falhas, dobras, diques e outras anisotropias estruturais, além de processos de carregamento ou descarregamento de materiais, como erosão, sedimentação e processos glaciais. Adicionalmente, vales profundos, zonas de relevo acidentado e atividades vulcânicas também contribuem para essas alterações.

Magalhães (1999) cita alguns métodos e técnicas para determinar tensões *in situ* em maciços rochosos, são eles:

- Almofadas planas (flatjack – método de compensação)
- Sobrefuração (overcoring – método de alívio)
- Fraturamento hidráulico (método de indução de fratura)
- Eliptização da seção horizontal de poços de petróleo (breakouts)
- Solução de plano e mecanismo focais, utilizado em Sismologia
- Análise estrutural

- **Tensões Induzidas**

De acordo com Hoek e Brown apud Silva (2008, p. 3), a tensão induzida resulta da redistribuição das tensões pré-existentes, provocada pela perturbação do maciço devido à implantação de obras de engenharia, como escavações ou construções. Essas obras podem gerar tensões pela retirada ou acúmulo de material. No caso das escavações, as tensões pré-existentes são perturbadas de maneira que novas tensões são induzidas nas proximidades dessas obras.

O estado de tensão natural das rochas, também conhecido como tensões pré-existentes, é significativamente alterado quando são realizadas escavações. Essas atividades de escavação provocam uma redistribuição das tensões internas, o que pode levar a uma série de consequências geológicas. Entre essas consequências, destaca-se o rompimento gradual das rochas, que pode se manifestar através de convergências ou divergências na superfície escavada. Além disso, essa redistribuição de tensões pode resultar no desmoronamento das paredes de poços ou até mesmo na explosão das rochas em cavidades subterrâneas (MIOTO e COELHO, 1998 apud SILVA, 2008, p. 22).

3.3 Estabilização de Aberturas Subterrâneas

Com o avanço de tecnologias que auxiliam na lavra em subsuperfície e a crescente escassez de depósitos minerais próximos à superfície, a mineração subterrânea tem se tornado uma alternativa. Neste caso, os minérios são extraídos em depósitos que se encontram em maior profundidade na crosta terrestre. Para possibilitar sua exploração, é necessário construir estruturas de trabalhos e de acesso ao corpo geológico: realces e galerias. As galerias são cavidades escavadas no subsolo para acesso, transporte ou extração de minerais, já os realces

referem-se a áreas onde o minério é extraído.

Silva (2007) menciona que com a abertura de escavações subterrâneas são provocadas alterações no estado de tensões *in situ* do maciço rochoso, ocasionando no surgimento de tensões induzidas que se concentram nas fronteiras da abertura. Tal acontecimento, pode motivar a instalação de sistemas de suporte para garantir a estabilidade dessas estruturas, já que essa concentração de tensões tende a levar à ruptura do maciço.

Duas intervenções podem ser feitas para auxiliar na estabilidade da escavação, que é a aplicação de suportes e/ou a utilização de reforços. O primeiro gera uma força que irá reagir às deformações geradas na superfície escavada, já o segundo irá promover melhorias das propriedades internas do maciço rochoso (OLIVEIRA, 2019).

Segundo Rezende (2014), a escolha do tipo de contenção a ser empregada para estabilizar a abertura, depende das suas circunstâncias e da amplitude da região de alívio de tensões circundantes à escavação. Além disso, o suporte a ser adotado é definido com base em estudos de mecânica das rochas, como instrumentações de campo e aplicação dos sistemas de classificação geomecânica (HUSTRULID e BULLOCK, 2001).

Existem diversas classificações para os sistemas de suportes, eles podem ser classificados com relação ao tempo de aplicação (provisórios ou definitivos), quanto à sua deformabilidade (rígidos ou compressíveis) etc., no entanto, são usualmente classificados quanto à constituição do material. Neste caso, são eles: suportes contínuos, suportes descontínuos e os reforços ou tratamento do maciço, que adentram nas demais classificações citadas (SILVA, 2007, 2008).

De acordo com Silva (2018) os suportes descontínuos são aqueles utilizados para conter os esforços que atuam periféricamente, aplicados em determinados pontos da abertura, tendo assim, ação pontual. Quanto aos suportes contínuos, são aqueles destinados a controlar esforços ao longo da escavação, aplicando uma pressão em toda a extensão do maciço em que é instalado, assim, atuando apenas superficialmente. Em contrapartida, os reforços atuam internamente, sendo utilizados para auxiliarem na melhoria ou conservação das propriedades gerais do maciço rochoso. Dentre os tipos de sustentação, de acordo com essa classificação, estão: arcos ou cambotas (descontínua), concreto projetado e telas (contínuos), e as ancoragens (reforço ou tratamento) (BRADY e BROWN, 2006).

3.3.1 Concreto Projetado

De acordo com Brady e Brown (2006), o concreto projetado é utilizado como um suporte passivo em aberturas subterrâneas. Sua composição consiste em uma mistura de cimento, água, agregados (brita, areia, etc.), e diversos aditivos para melhorar suas características e desempenho, como por exemplo: plastificantes, fibras de reforço, microssílica, aceleradores, retardadores, dentre outros.

O concreto projetado vem sendo utilizado como reforço na estabilização de túneis, sendo uma alternativa econômica e de rápida instalação. Sua característica de maior destaque é sua imediata ação após aplicação, pela rápida variação de suas propriedades mecânicas, conseguindo suportar pequenos esforços até atingir sua resistência máxima, estágio em que consegue receber maiores carregamentos (GOMES, 2006).

Figura 3 – Suporte de concreto projetado



Fonte: belgo.com.br.

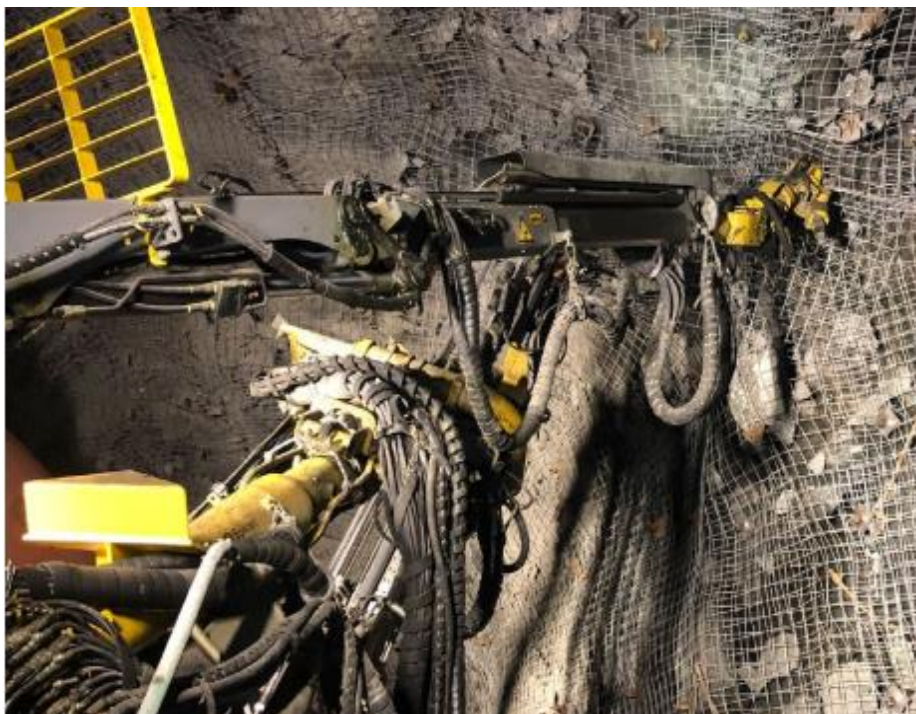
Conforme Ferreira (2003), após escavação, o maciço sofre deformações em volta da abertura gerada, os carregamentos aos quais o suporte é submetido são induzidos por essas solicitações. O sistema de funcionamento desse tipo de suporte se dá pela interação maciço-estrutura que ocorre por consequência das solicitações as quais o concreto projetado é submetido. Essa interação é fortemente dependente das características do suporte e do maciço. O concreto irá substituir o papel do material escavado, realizando o confinamento do maciço rochoso, promovendo, assim, a distribuição das tensões superficiais.

3.3.2 Telas (Malhas)

As telas ou malhas são utilizadas como suporte ou revestimento, ou ainda, como reforço para concreto projetado, na estabilização de maciços rochosos. Não conseguem suportar altas solicitações, porém, quando implementadas a outros sistemas de suportes conseguem suportar maiores cargas dinâmicas ou estáticas. Geralmente de composição metálica, são instaladas nos tetos ou paredes da escavação para impedirem a queda de pequenos blocos de rocha que venham a se desprender do maciço. Podem ser instaladas manualmente ou com equipamentos de perfuração, como jumbos, e apresentam facilidade na manutenção e rápida adaptação ao reforço de teto (MOSHAB, 1999).

Segundo Boas (2020), existem diversos tipos e desenhos de telas/malhas, apresentando, geralmente, malha trançada ou quadrada, dentre os principais tipos estão: tela de arame (chainlink mesh), tela de arame soldado (welded wire mesh) e telas não metálicas (non-metallic mesh), cada uma delas apresenta desempenho diferente para situações diferentes.

Figura 4 – Instalação de tela



Fonte: epiroc.com.

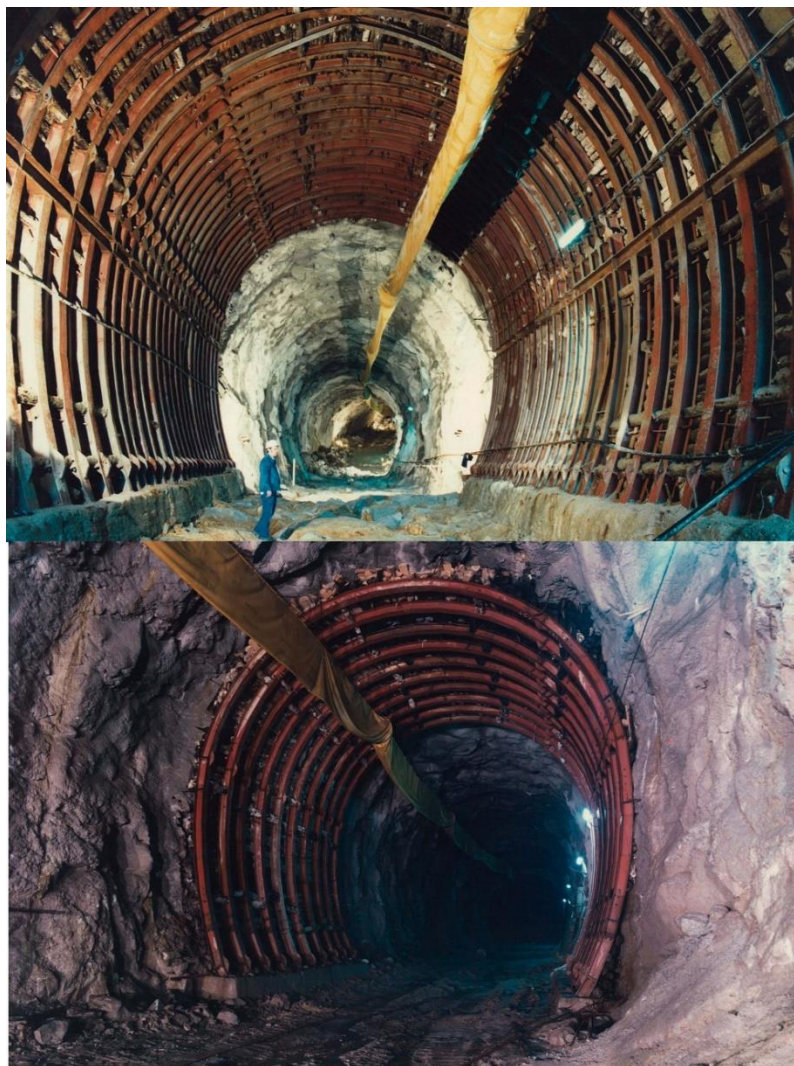
Conforme Silva (2007), as telas soldadas (*welded wire mesh*) são constituídas por uma malha quadrada de fios de aço, soldados em seus pontos de interseção. Estas telas

apresentam maior rigidez e facilidade de instalação. Em contrapartida, as telas de arame são formadas por um arranjo trançado de fios. Não são as mais recomendadas para o reforço na aplicação do concreto devido à dificuldade de penetração do cimento projetado na malha trançada, o que impede a eliminação dos bolsões de ar atrás dos elos da tela. Todavia, a tela de arame soldado é a mais adequada para ser utilizada com concreto projetado, já as telas não metálicas ou galvanizadas, são recomendadas quando existem condições corrosivas no ambiente em que serão aplicadas. (HOEK e BROWN, 1987 apud GOMES, 2019; MOSHAB, 1999).

3.3.3 Arcos Metálicos ou Cambotas

As cambotas (arcos) são elementos metálicos curvos aplicados à superfície da abertura com o objetivo de limitar a movimentação e deformação do maciço rochoso nas primeiras horas após a escavação. Por sua capacidade de suportar as tensões exercidas pelo maciço e a carga da rocha fraturada pelo o alívio de tensão, são utilizadas como contenções passivas. Além disso, para proporcionar maior segurança à estabilização da região de trabalho, podem ser aplicadas em conjunto com outros tipos de escoramentos, como telas e concreto projetado (FERRAZ, 1994 apud SILVA, 2018).

Figura 5 – Cambota metálica instalada em abertura subterrânea



Fonte: zihurate.eng.br.

Rezende (2014) cita que cambotas são utilizadas em zonas cisalhadas, travessias de falha, em regiões de alta alteração da rocha e quando o tempo de sustentação é curto. Sua montagem, a depender da seção de abertura da escavação, pode ser realizada no local de sua aplicação, sendo fixadas por parafusos ou soldadas de maneira a se moldarem às paredes da abertura. Neste caso, são aquelas fabricadas em segmentos, pois permitem fácil manuseio. Nas escavações em rocha, são instaladas com base de apoio no piso, transferindo parte das cargas que escoram neste.

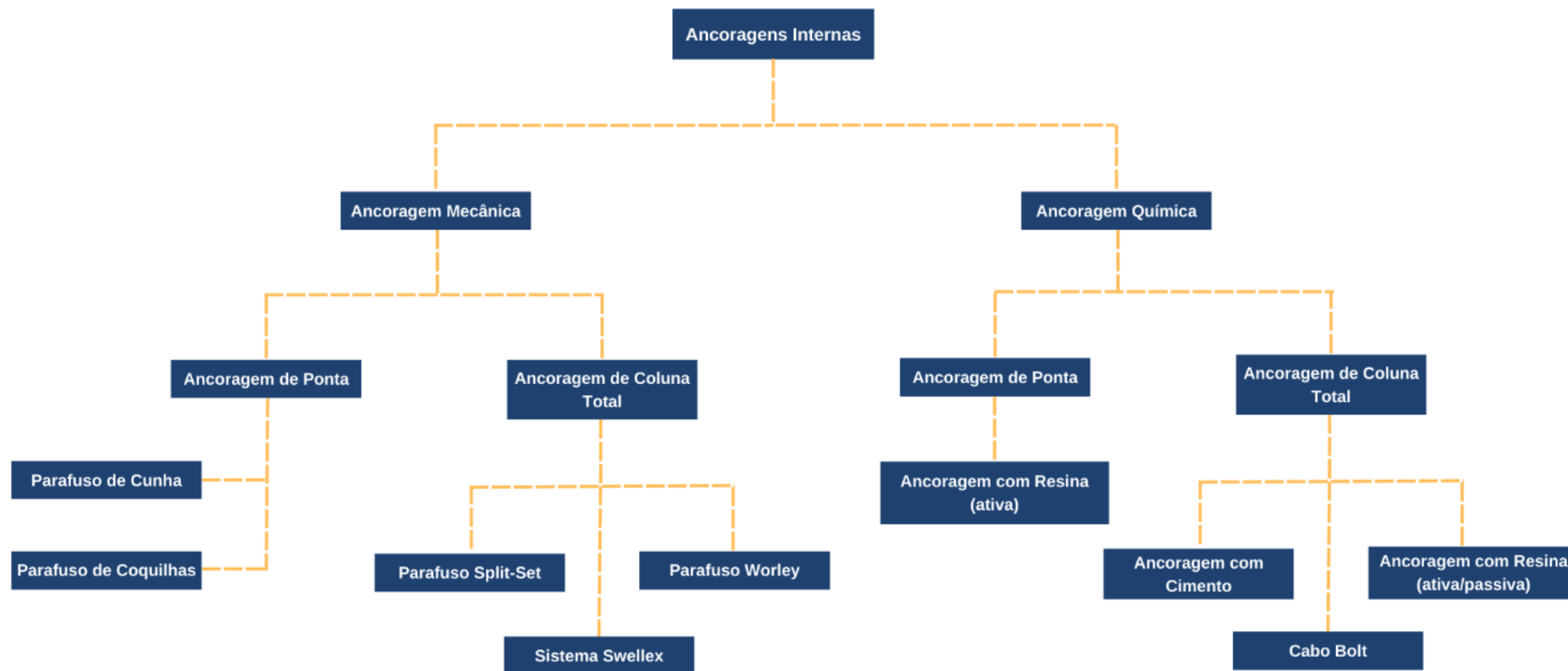
3.3.4 Ancoragens

O sistema de ancoragem é muito utilizado para reforço ou tratamento do maciço

por apresentar boas características para tais fins, possuindo fácil instalação, boa resistência, baixo custo associado e propiciam uma relevante redução da seção escavada. Desta forma, promovendo maior facilidade no tráfego de máquinas e homens e menos obstruções na ventilação. “Além destas características, são ainda as ancoragens internas as estruturas que melhor mobilizam as forças no interior do maciço rochoso para realizar sua auto-sustentação” (SILVA, 2007, p. 57).

De acordo com Silva (2018), a instalação de ancoragens inicia-se pela execução dos furos onde serão introduzidas barras rígidas ou flexíveis e realizado ou não o preenchimento do espaço anular, entre a parede do furo e a barra, com argamassa de cimento ou sem retração, ou ainda, com resina. As barras rígidas são compostas comumente por aço, neste caso, os tirantes ou parafusos, já as barras flexíveis que compreendem os cabos bolt, que podem ser de teto, parede ou soleira e são constituídos de cabos de aço. Os principais sistemas de ancoragem são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Principais sistemas de ancoragem



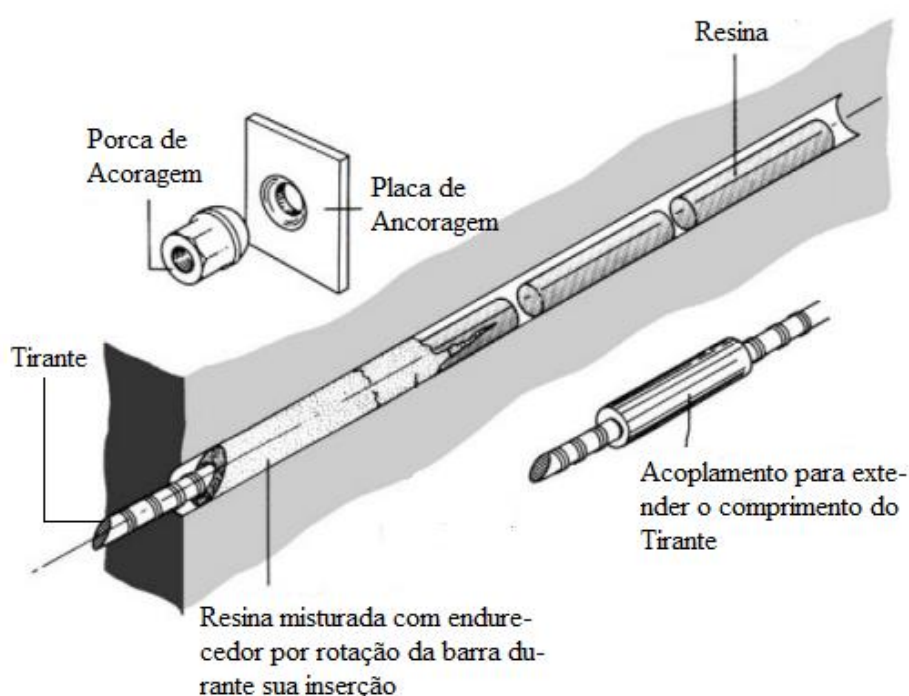
Fonte: Adaptado de Silva (2007).

3.3.4.1 Tirante Ancorado com Resina

Um dos dispositivos utilizados para ancorar os maciços são os tirantes, com sua aplicação é formado um bulbo de ancoragem que confere estabilidade ao material. Boas (2020) comenta que a função do tirante é sustentar a periferia da rocha, sendo capaz de transmitir esforços que atuam deformando demasiadamente esse local para regiões estáveis do maciço rochoso, podendo ser fixado no maciço de forma isolada ou associado (tela metálica, etc.) com auxílio de uma porca ou anilha.

Similar às ancoragens mecânicas, é um conjunto composto por uma barra de aço e placa de apoio. No entanto, é utilizada uma resina, bombeável ou encartuchada, como material de ligação. Para melhorar a aderência por fricção entre o tirante e a resina e promover uma boa mistura do catalisador e resina, são utilizadas barras nervuradas (KRISTJÁNSSON, 2014; ALVES, 2018 apud GOMES, 2019, p. 36).

Figura 7 – Representação gráfica de tirante ancorado com resina



Fonte: Adaptado de Brady e Brown (2006).

De acordo com Hoek *et al.* (1995), os cartuchos de resina utilizados nas ancoragens para promover a ligação entre o tirante e o maciço, são constituídos por duas partes, uma destas contendo a resina e a outra o catalisador. Apresenta rápida velocidade de instalação, o que pode

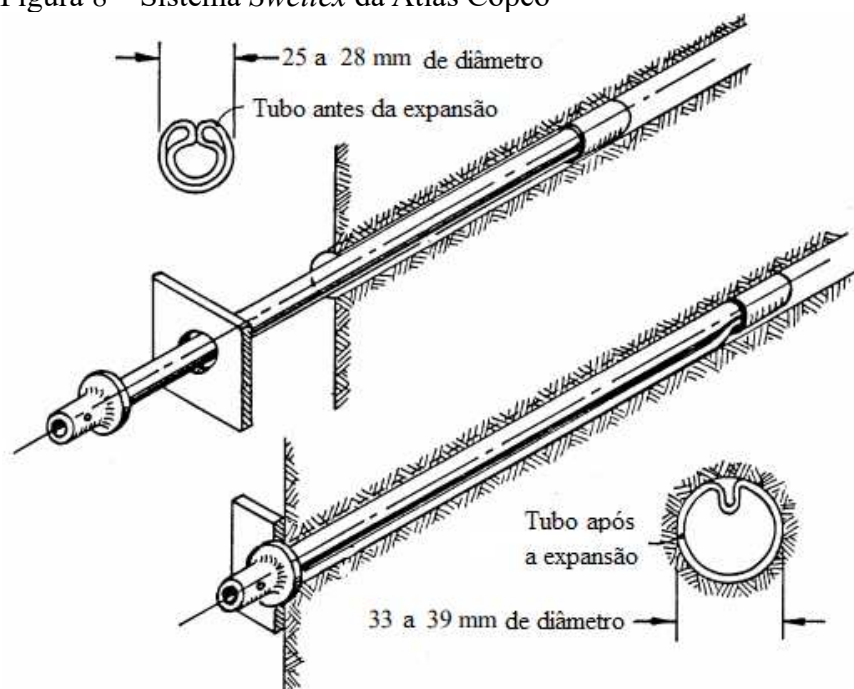
compensar seu alto custo. Contudo, seu armazenamento demanda condições favoráveis para que sua vida útil seja prolongada.

São dispositivos versáteis utilizados tanto em rochas quanto em solos, conferindo à estrutura uma melhor resistência a choques e vibrações de detonações, podendo ser instalados com carga pontual ou ser integrais, abrangendo toda a extensão. Quando comparado com outros tipos de ancoragens, conseguem suportar maiores cargas (CPB, 2019).

3.3.4.2 Swellex (tirante expansivo)

O sistema *Swellex* (Figura 8), desenvolvido e comercializado pela Atlas Copco, é um método inovador de ancoragem utilizado em escavações subterrâneas. Este sistema consiste em um tubo de aço que é dobrado sobre si mesmo durante o processo de fabricação e, na instalação, é expandido com alta pressão de água, atingindo assim um diâmetro maior do que o de fabricação. Durante a instalação, o tubo é inserido no furo previamente perfurado na rocha. A ativação do sistema ocorre por meio da injeção de água em alta pressão, o que provoca a dilatação do tubo. Esse processo de expansão permite que o tubo entre em contato direto e firme com o material das paredes do furo, garantindo uma ancoragem segura e eficiente (HOEK *et al.* 1995).

Figura 8 – Sistema *Swellex* da Atlas Copco



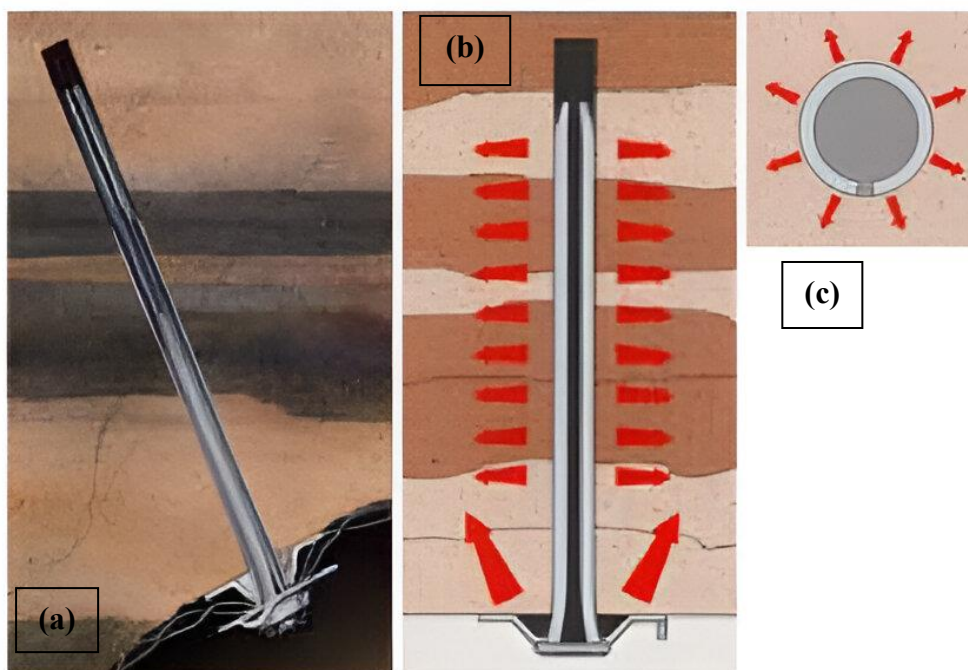
Fonte: Hoek *et al.* (1995).

Hoek *et al.* (1995) menciona que, devido a superfície externa do tubo manter contato direto com a rocha, o *Swellex* se torna propício à corrosão, sendo assim, um problema em instalações de longo prazo. Todavia, sua velocidade de instalação apresenta bastante destaque, superando a dos parafusos convencionais e cavilhas, e seu custo de instalação, principalmente se comparado com o tempo de instalação dos sistemas de ancoragem que utilizam argamassa.

3.3.4.3 *Split-Set* (cavilha)

O *Split-Set* é uma ancoragem de fricção que promove pressão radial contra a rocha em toda sua extensão de contato, com ação imediata após a instalação. Foi desenvolvido entre 1976 e 1983 por Scott; composto por um tubo de aço com “efeito mola”, galvanizado ou inoxidável, oco e ranhurado com elevada resistência e uma placa de apoio, como pode ser observado na Figura 9 (HOEK *et al.* 1995).

Figura 9 – *Split-Set*: (a) parafuso instalado em rocha; (b) corte transversal do perfil longitudinal do furo com o parafuso instalado; e (c) corte transversal ao parafuso instalado



Fonte: splitset.com.

Nas Figura 9(b) e 9(c), é ilustrado o sistema de funcionamento do *Split-Set* no furo, em que é exercida uma pressão no sentido radial em todo o comprimento de contato do parafuso

com a rocha. Esse sistema é essencial para garantir a estabilidade da estrutura, pois a pressão radial aplicada proporciona um melhor encaixe e aderência do parafuso na rocha.

Hustrulid e Bullock (2001) afirmam que, por sua facilidade de instalação e ação de suporte imediata, o *Split-Set* se tornou popular entre os mineradores. Além disso, salientam que o parâmetro mais relevante durante a instalação do parafuso, é o diâmetro do furo. Isso uma vez que, um furo com diâmetro muito grande irá resultar em uma baixa força de retenção, em contrapartida, um que é muito pequeno irá danificar o parafuso enquanto é instalado no furo.

3.3.4.4 Cabo Bolt

Segundo Brady e Brown (2006) o Cabo *Bolt* é uma técnica de reforço ou suporte de maciço que consiste em uma barra ou cabo de aço longo e de alta resistência à tração inserido em um furo previamente realizado no maciço rochoso. Apresentam a possibilidade de ser, ou não, utilizados pré-tensionados e ainda, como pré-reforço ou pós-reforço.

Windsor (2001), classificou os tipos de cabos conforme sua composição:

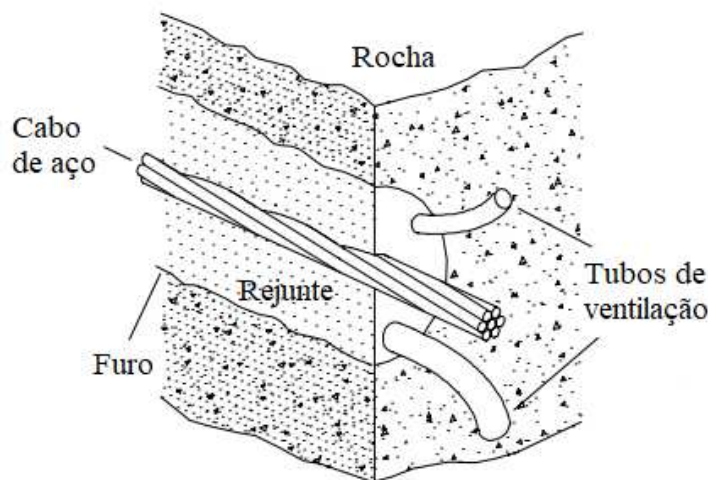
- Fio – um único elemento de seção sólida;
- Cordame – conjunto de fios arrançados de forma helicoidal;
- Cabo – arranjo de fios ou cordões;
- Tendão – fios ou cordões pré-tensionados;
- Cavilha – fios ou cordões não-tensionados.

Silva (2007) menciona que o sistema cabo *bolt* apresenta melhor desempenho como técnica de suporte frente a métodos mais tradicionais, sendo, em muitas ocasiões, o elemento principal de controle do maciço para escavações. Ele destaca que são combinados dois fatores relevantes por essa técnica, sendo:

- a necessidade prática de comprimentos maiores de suporte; e
- a necessidade de se instalar um suporte, tão longo quanto possível, após a lavra ou abertura das escavações.

Na Figura 10 é possível visualizar uma representação gráfica de um cabo *bolt* instalado em uma rocha.

Figura 10 – Representação gráfica de Cabo *Bolt* instalado em rocha



Fonte: Adaptado de Hutchinson e Diederichs (1996).

Conforme Hutchinson e Diederichs (1996), o cabo *bolt* é um sistema de reforço versátil. Os fios de cabos podem dobrar em raios apertados, permitindo a instalação de parafusos longos em espaços confinados. Além disso, os cabos podem ser fabricados com várias configurações de fios de aço, oferecendo diferentes características de desempenho.

3.4 Revisão Bibliográfica

De acordo com Cavalcante (2020), a revisão bibliográfica distingue-se pelo uso e análise de documentos de caráter científico, como livros, teses, dissertações e artigos, sem a necessidade de recorrer diretamente aos fatos empíricos. Este processo envolve a elaboração de uma síntese baseada em diversos tópicos, com o objetivo de proporcionar uma compreensão abrangente do conhecimento (BOTELHO, 2011).

Conforme Botelho (2011), a revisão da literatura é um passo inicial na construção do conhecimento científico. Através desse processo, novas teorias emergem, e lacunas e oportunidades para pesquisas em um tema específico são identificadas. A pesquisa bibliográfica, desenvolvida com base em materiais já existentes como livros, artigos e teses, é de caráter exploratório. Este tipo de pesquisa facilita uma maior familiaridade com o problema, o aprimoramento de ideias e a descoberta de novas intuições (GIL, 2001 apud CONFORTO, 2011, p. 1).

Entre os tipos de revisão bibliográfica existentes, destacam-se a integrativa, a narrativa e a sistemática. A revisão integrativa, em particular, resume pesquisas anteriores e

extrai conclusões gerais de um conjunto de estudos sobre um tópico específico, englobando todos os estudos que tratam de hipóteses semelhantes (BEYEA e NICOLL, 1998 apud FERNANDES, 2000, p. 29).

Segundo Bernardo (2004), a revisão narrativa é utilizada para descrever o estado da arte de um tema específico, seja do ponto de vista teórico ou contextual. Esse tipo de revisão não apresenta a metodologia para a busca de referências, nem as fontes de informação utilizadas ou os critérios de avaliação e seleção dos trabalhos, baseando-se principalmente na análise da literatura e na interpretação e análise crítica pessoal do pesquisador.

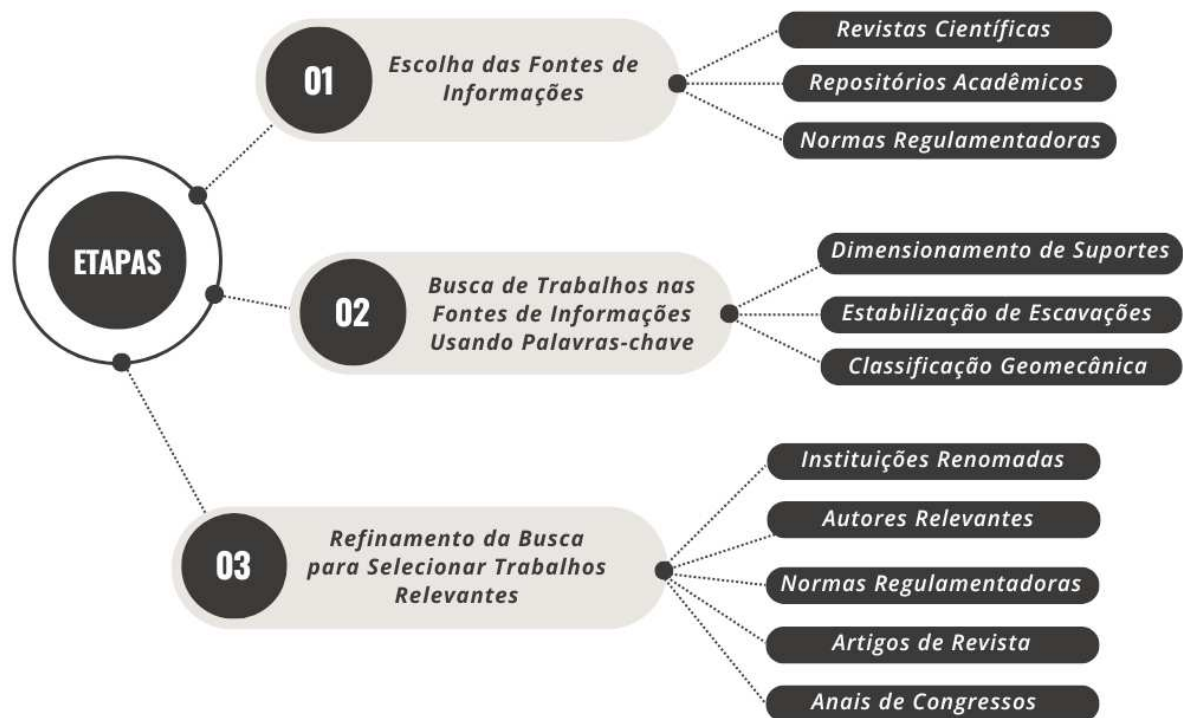
Castro (2006) menciona que a revisão sistemática é planejada para responder a uma pergunta específica e utiliza métodos explícitos e sistemáticos para identificar, selecionar e avaliar criticamente os estudos, além de coletar e analisar os dados dos estudos incluídos na revisão. A aplicação de métodos com maior rigor científico permite alcançar melhores resultados e reduzir erros e vieses do pesquisador responsável pela investigação. Trabalhos de revisão sistemática são considerados originais, pois utilizam dados da literatura sobre um determinado tema e são elaborados com rigor metodológico (CONFORTO, 2011; ROTHER, 2007).

4 METODOLOGIA

A metodologia para a elaboração deste trabalho consistiu em realizar uma revisão sistemática. Esta consiste em um procedimento de pesquisa que analisa a literatura existente sobre um determinado tema. Esse tipo de estudo resume as evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, utilizando métodos explícitos e sistematizados para buscar, avaliar criticamente e sintetizar as informações selecionadas (SAMPAIO, 2007).

Segundo Conforto (2011), a revisão bibliográfica sistemática busca atingir maior qualidade nas buscas e resultados, objetivando compreender o "estado da arte" do tema pesquisado. Para isso, é necessário seguir um procedimento que abrange um conjunto específico de etapas, técnicas e ferramentas. Dessa forma, a seleção dos trabalhos citados nesta pesquisa foi desenvolvida em três etapas, buscando identificar aqueles que abordam métodos de dimensionamento de suportes em aberturas subterrâneas, além de temas diretamente relacionados (Figura 11).

Figura 11 – Fluxograma da sequência metodológica



1. Escolha das Fontes de Informações

A primeira etapa da pesquisa envolveu a seleção criteriosa das fontes de informações. Para garantir a qualidade e a relevância dos dados, as seguintes fontes foram escolhidas:

- **Revistas Científicas:** Focadas em publicações revisadas por pares na área de geotecnia e mineração.
- **Repositórios Acadêmicos:** Teses, dissertações e TCCs disponíveis em universidades e outras instituições acadêmicas reconhecidas, que oferecem pesquisas sobre o tema.
- **Normas Regulamentadoras:** Documentos técnicos e regulamentares que estabelecem padrões e diretrizes na área de geotecnia e mineração.

2. Busca de Trabalhos nas Fontes de Informações Usando Palavras-chave

Com as fontes definidas, a busca foi conduzida utilizando palavras-chave relacionadas ao tema da pesquisa:

- **Dimensionamento de suportes:** Focando em métodos e técnicas para o dimensionamento adequado de suportes em escavações.
- **Estabilização de escavações:** Explorando as técnicas/métodos que garantem a estabilidade das escavações.
- **Classificação geomecânica:** Investigando sistemas de classificação geomecânica frequentemente utilizados na classificação de maciços rochosos em escavações subterrâneas.

3. Refinamento da Busca para Selecionar Trabalhos Relevantes

Após a busca inicial, os resultados foram refinados para selecionar apenas os trabalhos mais relevantes. Para tal, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão. Os critérios de inclusão foram:

- **Instituições renomadas:** Trabalhos provenientes de instituições reconhecidas pela excelência em geotecnia e mineração.
- **Autores relevantes:** Selecionando publicações de autores com autoridade no assunto e que são frequentemente citados na literatura.
- **Normas Regulamentadoras:** Incorporando documentos técnicos que são amplamente utilizados e aceitos na indústria.
- **Artigos de Revistas:** Priorizando publicações em periódicos de alto impacto na área.

- **Anais de congressos:** Incluindo trabalhos apresentados em conferências importantes, que trazem os últimos avanços e novidades no campo de estudo.

Os critérios de exclusão aplicados foram:

- Trabalhos que tratam sobre outro tema;
- Trabalhos duplicados ou com mesmos resultados; e
- Trabalhos com técnicas/metodologias ultrapassadas.

Durante a elaboração desta pesquisa, um dos desafios enfrentados foi a disponibilidade de materiais que abordassem diretamente o tema proposto em fontes relevantes para a área de mecânica das rochas e geotecnia. Inicialmente, foi realizada uma busca no portal de periódicos da CAPES, através do acesso CAFe, que disponibiliza diversos trabalhos e pesquisas publicadas em revistas, editoras e sociedades de pesquisa, como Scopus, Springer, SciELO, The Geological Society e GeoScienceWorld, entre outras.

O objetivo dessa busca era formar um banco de dados para, posteriormente, realizar uma bibliometria. No entanto, as buscas no acesso CAFe não retornaram um número suficiente de trabalhos relacionados ao tema deste TCC para formar um banco de dados robusto e permitir uma análise estatística e quantitativa, a fim de mensurar a qualidade científica e verificar a regularidade dos estudos. Por isso, a busca foi adaptada e a seleção dos trabalhos foi realizada nas três etapas descritas anteriormente.

Ao adotar essa abordagem meticulosa, buscou-se garantir que a pesquisa fosse embasada em fontes confiáveis e relevantes, estabelecendo, assim, uma base sólida para o desenvolvimento do trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Baseando-se em uma análise detalhada de bibliografias especializadas e documentos normativos e regulamentares pertinentes ao tema, serão apresentados os métodos e técnicas de dimensionamento de Tirante Ancorado com Resina (ancoragem química) e Tirante Expansivo (ancoragem mecânica). Esses suportes são amplamente utilizados na estabilização de escavações subterrâneas.

5.1 Dimensionamento De Suportes

O dimensionamento de suportes em aberturas subterrâneas é fundamental para garantir a estabilidade das escavações e a segurança dos trabalhadores durante as operações. Conforme a Norma Reguladora de Mineração – NRM-05, que regulamenta os sistemas de suporte e tratamento, publicada pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) atual Agência Nacional de Mineração (ANM), as aberturas subterrâneas devem ser tratadas ou suportadas de acordo com suas propriedades hidro-geo-mecânicas e finalidades a que se destinam.

De acordo com Boas (2020) a aplicação adequada das metodologias não apenas aumenta a confiabilidade, mas também permite dimensionar corretamente os recursos do projeto, sejam eles humanos ou materiais. A seguir, serão apresentadas recomendações de projeto e instalação, além dos métodos de dimensionamento de ancoragens para estabilização de aberturas subterrâneas.

5.1.1 Ancoragens

Diversos autores abordam, em seus trabalhos, projetos geotécnicos, bem como a instalação, cálculo e análise dos sistemas de tratamento, reforço e suporte de maciços rochosos. Além disso, a ABNT NBR-5629/2018 estabelece os requisitos para o projeto e execução de tirantes ancorados no terreno, definindo os critérios para dimensionamento dos tirantes, incluindo a escolha dos materiais e os métodos de cálculo; estabelece as diretrizes para a instalação dos tirantes, abrangendo perfuração, injeção de calda de cimento e proteção contra corrosão etc.

De acordo com Silva (2007, 2018), as ancoragens mecânicas compreendem os parafusos de barra rígida, como o *split-set* e o *swellex*, enquanto as ancoragens químicas

incluem parafusos de barra rígida, como os tirantes ancorados com resina, e parafusos flexíveis, como o cabo *bolt*. Portanto, o dimensionamento desses tirantes deve estar em conformidade com as normas estabelecidas pela ABNT NBR-5629/2018, conforme apresentado a seguir.

5.1.1.1 Tirante Ancorado com Resina

De acordo com a NBR-5629/2018, o dimensionamento do tirante envolve a determinação de seus elementos básicos, são eles: cabeça (dispositivo de transferência de carga do tirante), trecho livre e trecho ancorado ou bulbo. Além disso, para elaboração do projeto que envolve o dimensionamento de um tirante, seja ele uma ancoragem mecânica ou química, é essencial o projetista dispor dos seguintes dados:

- relatório de investigação geológico-geotécnica;
- levantamento planialtimétrico cadastral;
- informações relativas aos elementos interferentes (tubulações subterrâneas, fundações etc.);
- interações entre as construções próximas (considerar se existe sobrecargas na área de influência, escavações nas proximidades, se os tirantes são provisórios ou permanentes e a sequência de execução); e
- condições na época do projeto em relação à legislação vigente relativa à implementação e execução.

Em conformidade com a NBR-5629/2018, o dimensionamento de tirantes como elementos individuais envolve a definição de seus componentes principais: a cabeça, o trecho livre e o trecho ancorado, para garantir que resistam aos esforços especificados no projeto. Além disso, é essencial calcular a seção de aço do tirante com base nos esforços a que será submetido. Tomando-se conforme o caso as seguintes tensões admissíveis:

- a) no caso de tirantes permanentes (duração superior a 2 anos):

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,75} \times 0,9$$

- b) no caso de tirantes provisórios (duração de até 2 anos):

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,50} \times 0,9$$

- c) no caso de prova de carga ou cargas de curta duração:

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,20} \times 0,9$$

σ_{adm} é igual à tensão admissível máxima no aço (MPa);

f_{yk} é igual à resistência característica do aço ao escoamento (MPa);

1. Cálculo da seção de aço do tirante

No dimensionamento da seção de aço do tirante deve ser levado em consideração o esforço máximo a que o parafuso estará submetido. Dessa forma, é importante que o cálculo seja feito com base na tensão admissível.

- Para Esforços Normais:

De acordo com Hibbeler (2010), se um elemento estiver sujeito a uma força normal em uma seção, a área mínima da seção necessária para que o aço suporte as solicitações impostas, sem que haja seu rompimento, é determinada pela seguinte fórmula:

$$A = \frac{F}{\sigma_{adm}}$$

Onde:

A é a área da seção de aço (mm²);

F é a força normal (N);

σ_{adm} é a tensão normal admissível máxima no aço (MPa).

- Para Esforços Cisalhantes:

Hibbeler (2010) afirma que no caso de uma seção submetida à uma força de cisalhamento, a área mínima exigida será determinada pela seguinte fórmula:

$$A = \frac{V}{\tau_{adm}}$$

Onde:

A é a área da seção de aço (mm²);

V é a força cortante (N);

τ_{adm} é a tensão de cisalhamento admissível máxima no aço (MPa).

A partir da área é possível encontrar o diâmetro do tirante, pela seguinte fórmula temos que:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \therefore d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Onde:

A é a área da seção de aço (mm²);

r é o raio (mm);

d é o diâmetro do tirante (mm).

2. Cálculo da cabeça do tirante

- Placa/Chapa de Apoio

Oliveira (2019) menciona que, as chapas/placas de reforço ativo (tirantes com ancoragem química) proporcionam um efeito de confinamento em uma área entre as malhas/barras dos tirantes, cuja extensão varia conforme suas dimensões. A parte externa do conjunto de ancoragem (porca e placa) pode sofrer com esforços (tensões) causados por movimentos internos (GONTIJO *et al.*, 2018).

De acordo com Russell C. Hibbeler (2010) em seu livro "Mecânica dos Materiais", a tensão é definida como a força por unidade de área exercida internamente a um material em resposta a uma carga aplicada. A tensão (σ) pode ser calculada usando a fórmula:

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

Onde:

σ é a tensão (MPa);

F é a força aplicada (N);

A é a área da seção transversal onde a força é aplicada (mm²).

A partir dessa fórmula temos que:

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

Para uma chapa retangular/quadrada, a área (A) é o produto da largura (b) e da espessura (t):

$$A = b \cdot t \text{ (mm}^2\text{)}$$

- Porca

A escolha da porca é baseada no diâmetro e no tipo de rosca do parafuso, bem como na sua composição e resistência, uma vez que tanto a porca quanto a placa são responsáveis por distribuir a carga do parafuso na superfície do maciço rochoso. A porca é instalada na parte roscada do parafuso, que é tensionado, com uma das extremidades fixada à rocha. Esse processo causa compressão e induz o efeito autossuportante (LUCIO, 1962 apud GOMES, 2019).

Para a determinação das características mecânicas das porcas são realizados ensaios os quais seguem as recomendações da ISO 898-2 e ISO 898-6, ambas, normas internacionais que definem os ensaios em porcas com rosca de passo normal e em porcas com rosca de passo fino, respectivamente. A ISO 898-2 se aplica a porcas com rosca métrica ISO, diâmetro e passo de acordo com ISO 261 e ISO 262.

Os elementos que fazem parte do sistema de ancoragem estarão sujeitos às tensões impostas pelo maciço ao tirante, dessa forma, é essencial saber a tensão que a porca suporta, podendo ser calculada pela seguinte fórmula:

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

Onde:

σ é a tensão normal (MPa);

F é a força aplicada (N);

A é a área média (mm²).

Para obter a área média, pode-se usar o diâmetro médio entre o diâmetro de raiz e o diâmetro base. De acordo com Norton (2013), o diâmetro de raiz, que é o menor diâmetro, e o diâmetro base, que é o maior diâmetro (Figura 12), para roscas ISO são definidos em função do passo de rosca, conforme as fórmulas a seguir:

$$d_r = d - 1,226869 p$$

Onde:

d_r é o diâmetro de raiz (mm);

d é o diâmetro externo (mm);

p é o passo da rosca (mm).

$$D = d - 2 \cdot f$$

Onde:

D é o diâmetro máximo (mm);

d é o diâmetro externo (mm);

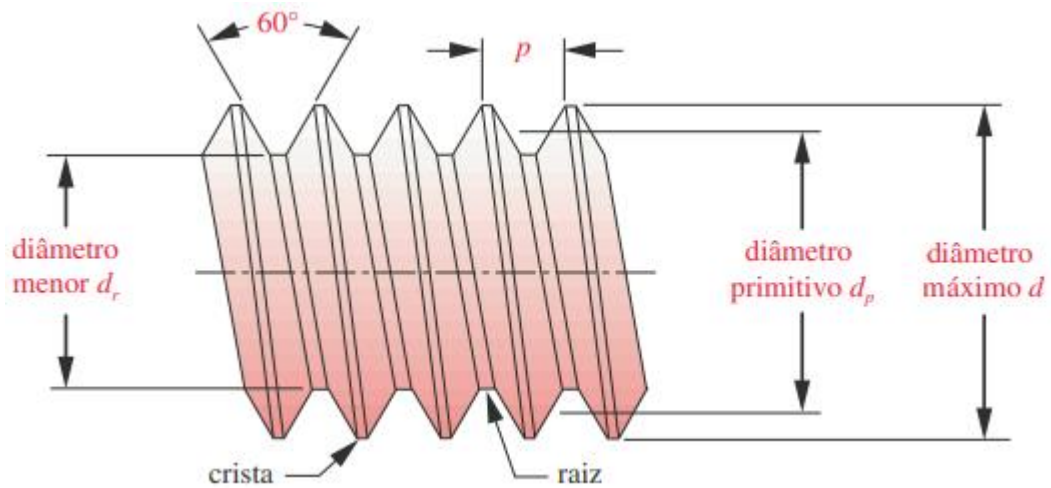
f é a folga entre a raiz do filete da porca e a crista do filete do parafuso (mm).

$$f = 0,045 \cdot p$$

Onde:

p é o passo da rosca (mm)

Figura 12 – Formas de rosca-padrão ISO e Unified National



Fonte: Norton (2013).

A área é calculada da seguinte forma:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d + d_r}{2} \right)^2$$

Onde:

A é a área média (mm²);

d é o diâmetro máximo (mm);

d_r é o diâmetro de raiz (mm).

3. Cálculo do trecho livre do tirante

De acordo com o Anexo D, anexo normativo que trata sobre os métodos de ensaio de qualificação e recebimento, da ABNT NBR 5629/2018, item D.5.2.3 (representação do comportamento do tirante), O comprimento livre efetivo do tirante (L_{le}) é determinado pela

inclinação do segmento quase reto da curva dos deslocamentos elásticos no gráfico ($F \times d_e$), cuja equação pode ser expressa como:

$$L_{le} = \frac{\Delta d_e}{\Delta F} E \cdot S$$

Onde:

L_{le} é o comprimento livre efetivo do tirante;

Δd_e é igual à variação de deslocamento entre dois pontos quaisquer do trecho reto;

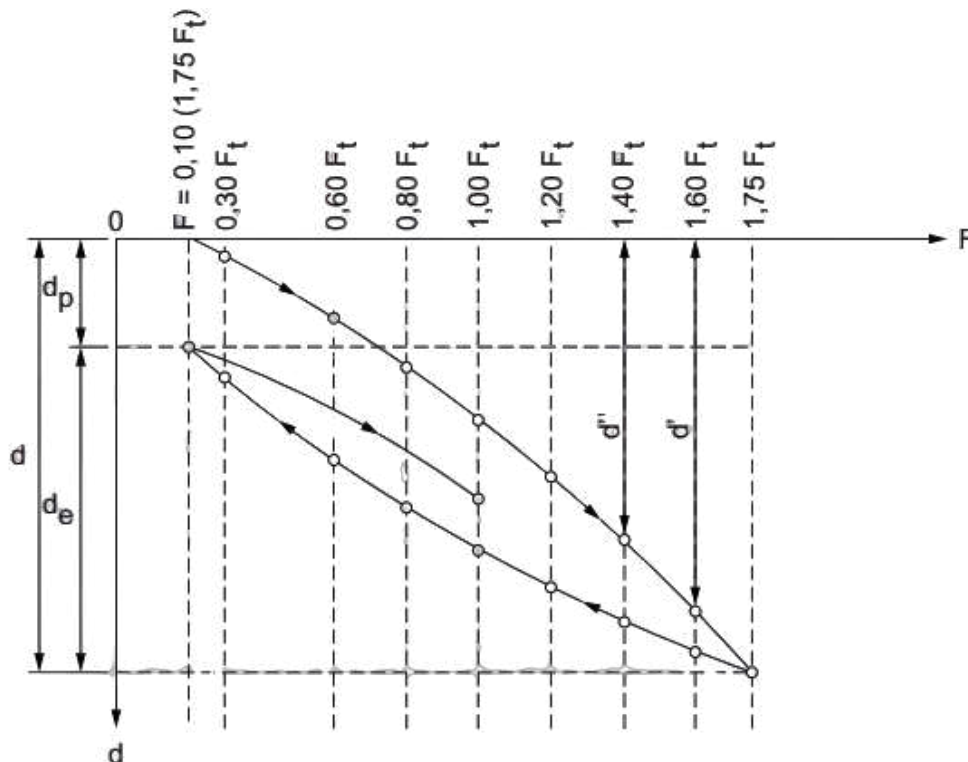
ΔF é igual à variação de força correspondente a Δd_e ;

E é igual ao módulo de elasticidade do material do elemento resistente à tração; e

S é igual à seção do elemento resistente à tração.

Na Figura 13, é apresentado o gráfico de carga x deslocamento total para o ensaio de recebimento do tipo A, onde F representa a carga, d_e representa o deslocamento elástico e d_p representa o deslocamento permanente (deformação plástica).

Figura 13 – Gráfico de carga x deslocamento total



Fonte: ABNT NBR 5629/2018.

Conforme mencionado no Anexo D da NBR 5629/2018, a carga máxima aplicada em qualquer ensaio não deve exceder 90% da resistência ao escoamento do elemento resistente à tração (tirante). Assim, o propósito do ensaio é analisar o comportamento e o desempenho do tirante com base nos deslocamentos observados na cabeça do parafuso.

No Anexo E da ABNT NBR 5629/2018, estão dispostos os gráficos dos ensaios de qualificação (comportamento) e de recebimento (desempenho), onde estão os gráficos de carga x deslocamento total para os ensaios de recebimento dos tipos B, C e D, e ensaio de qualificação.

4. Cálculo do trecho ancorado do tirante

De acordo com o item 4.5.3.1 da ABNT NBR 5629/2018, Tirantes ancorados no terreno – Projeto e execução, o comprimento de ancoragem deve ser estabelecido de forma experimental, contemplando ensaios básicos e de qualificação. Dessa forma, a utilização de formulações teóricas ou semi empíricas deve servir única e exclusivamente para estimativas preliminares (PORTO, 2015).

Segundo Gontijo *et al.* (2016), devido à falta de uma norma ABNT específica para estabilização de escavações subterrâneas, os procedimentos para testes de arrancamento e instalação são guiados pelas diretrizes da norma D4435 (ASTM, 2004) e da publicação "*Suggested Methods for Rockbolt Testing*" (ISRM, 1981). A resistência à tração é avaliada por meio do teste mencionado, que mede o deslocamento do dispositivo de ancoragem quando uma carga é aplicada ao tirante.

A resistência de aderência está correlacionada a metodologia de teste de tração conhecida como *Short Encapsulated Pull Test* (SEPT). Seguindo o procedimento do SEPT, o comprimento da resina é determinado a partir da eq. (6). A eficiência da aderência, *Grip Factor* (GF), é determinada pela resistência de ancoragem do tirante por polegada (*inch*). O GF é calculado com base na carga máxima aplicada no conjunto de força, até 24 horas após a instalação, utilizando um comprimento de ancoragem pré-definido (SEPT mm), até a ruptura na interface entre rocha, resina e tirante, eq. (7) (MATOS *et al.*, 2019; GONTIJO *et al.*, 2018).

$$SEPT = \frac{Df^2 - Dt^2}{Dc^2} \times 300 \text{ mm} \quad (6)$$

Onde:

Df é o diâmetro da perfuração;

Dt é o diâmetro da barra do tirante;

Dc é o diâmetro do cartucho de resina.

Cálculo do GF:

$$GF = \frac{\text{Carga máxima SEPT (t)}}{30 \text{ cm (12 inch)}} \quad (7)$$

A partir dos valores obtidos nos testes do *Grip Factor* é possível calcular o comprimento mínimo para de ancoragem do tirante, conforme a eq. (8).

$$La = \frac{RTt (t)}{GF \left(\frac{t}{cm} \right)} \quad (8)$$

Onde:

La é o comprimento mínimo de ancoragem (cm);

RTt é a resistência à tração do tirante (t);

GF é o *Grip Factor* (t/cm).

O comprimento da seção de resina deve garantir uma aderência adequada do parafuso ao furo. Isso deve assegurar que, durante a aplicação de carga no parafuso, não ocorra uma ruptura ao longo da interface rocha/resina ou tirante/resina. A metodologia SEPT é bastante conservadora, sendo eficaz para verificar a ancoragem mínima necessária e como uma referência para comparar forças de ancoragem relativas em diferentes litologias na mesma mina subterrânea (HUDSON, 2013 apud OLIVEIRA, 2019, p. 9-10).

5. Resina

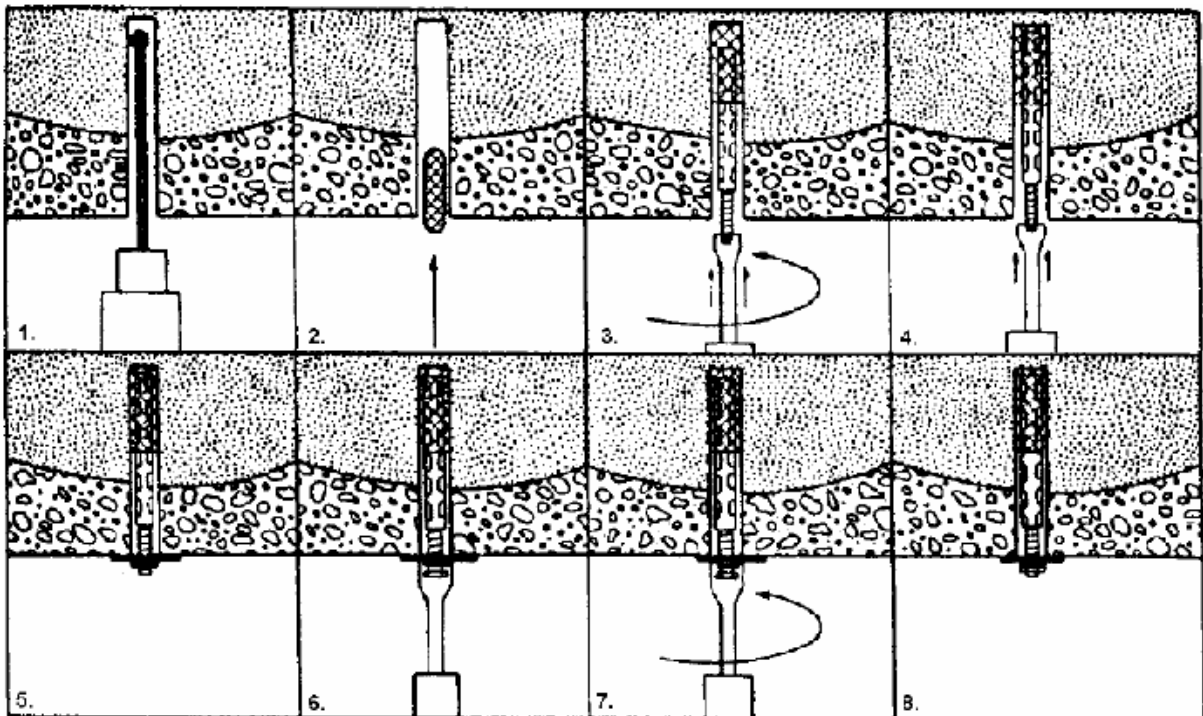
Segundo Gontijo *et al.* (2016), a resina atua no atirantamento como o elemento de ligação entre a parede do furo e o tirante, preenchendo o espaço anular e moldando-se nas irregularidades da parede do furo e nas nervuras do tirante. Eles apontam que a capacidade de carga do sistema é determinada pela resistência ao rompimento do tirante e pela resistência ao cisalhamento da resina e da rocha, e não funciona como cola.

A resistência da ancoragem pode ser reduzida se a resina for excessivamente misturada. Além disso, a resistência final da resina não será alcançada caso a cura seja

interrompida antes da sua conclusão. Para garantir uma mistura adequada e uma maior capacidade de ancoragem, é fundamental que o espaço entre o furo e o parafuso não seja excessivamente grande (KRISTJASSON, 2014; OLIVEIRA, 2019).

Conforme Karabin & Hoch (1979) apud Pinto (2018), em ancoragem de coluna pontual, a resina é acondicionada em cartuchos plásticos com dois compartimentos separados: um para a resina e outro para o catalisador. O procedimento de ancoragem consiste em inserir o cartucho até o fundo do furo e, em seguida, rompê-lo e rotacioná-lo utilizando o próprio tirante. Esse processo quebra os compartimentos e permite a mistura dos componentes. Em questão de minutos após a mistura, ocorre a cura da resina, conforme a especificação de cada fabricante.

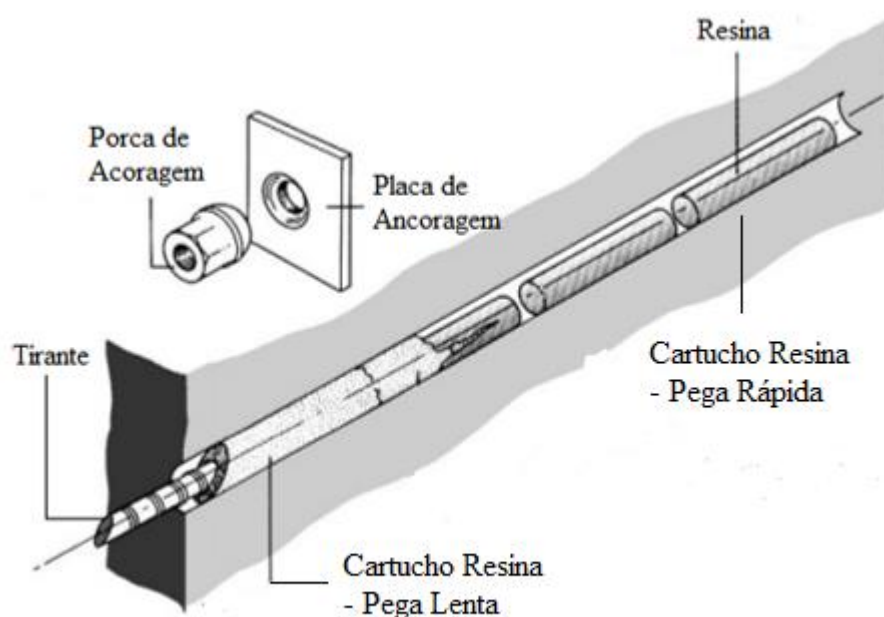
Figura 14 – Sequência de instalação de tirante com ancoragem em coluna pontual



Fonte: Karabin & Hoch (1979).

De acordo com Hoek *et al.* (2000), em situações onde é necessário aplicar tensão e preencher todo o espaço entre o furo e o tirante (ancoragem em coluna total), é possível utilizar cartuchos de resina com diferentes tempos de cura. Nessa abordagem, o primeiro cartucho inserido, que possui o menor tempo de cura, é responsável pela ancoragem e fixação do parafuso, enquanto os cartuchos subsequentes, com tempos de cura mais longos, preenchem o espaço vazio. Para que o tensionamento do suporte seja efetivo, é necessário apertar o parafuso antes que ocorra a cura dos cartuchos de preenchimento (PINTO, 2018).

Figura 15 – Representação de tirante e cartuchos de resina em furo, ancoragem em coluna total



Fonte: Adaptado de Brady e Brown (2006).

Matos *et al.* (2018) afirmam que a resistência mecânica da resina de poliéster varia de acordo com os agregados e a base de poliéster que compõe os cartuchos. Existem diversos tipos de resinas disponíveis no mercado para ancoragem química em rochas, com propriedades e desempenho variados, que dependem das características demandadas pelo ambiente de instalação e das especificações dos fabricantes. Por exemplo, as ancoragens fabricadas pela HILTI, que são de base epóxi e possuem cura lenta, têm um tempo de cura entre 6 e 24 horas. Já as ancoragens de base cimentícia, de cura rápida, apresentam um tempo de cura entre 30 e 90 minutos.

É importante salientar que a quantidade de rotações e outras recomendações de instalação são indicadas pelo fabricante. Para garantir a máxima eficiência do sistema, é essencial seguir rigorosamente as instruções dos fabricantes, bem como as normas vigentes, e realizar os testes solicitados para verificar a qualidade e a segurança do reforço.

5.1.1.2 Tirante Expansivo (*Swellex*)

Assim como para o Tirante Ancorado com Resina, o dimensionamento do *Swellex* deve seguir a NBR-5629/2018, levando em consideração, para o cálculo da seção de aço do tirante as tensões admissíveis descritas no tópico 5.1.1.1.

1. Cálculo da seção de aço do tirante

Para dimensionar a seção de aço do tirante, é fundamental considerar o esforço máximo que o parafuso suportará. O cálculo deve ser detalhado e baseado na tensão admissível, garantindo a segurança e eficiência do sistema.

- Para Esforços Normais:

De acordo com Hibbeler (2010), quando um elemento está sujeito a uma força normal em uma seção, a área mínima dessa seção é determinada por

$$A = \frac{F}{\sigma_{adm}}$$

Onde:

A é a área da seção de aço (mm²);

F é a força normal (N);

σ_{adm} é a tensão normal admissível máxima no aço (MPa).

- Para Esforços Cisalhantes:

De acordo com Hibbeler (2010), quando uma seção é submetida a uma força de cisalhamento, a área mínima exigida dessa seção será determinada por

$$A = \frac{V}{\tau_{adm}}$$

Onde:

A é a área da seção de aço (mm²);

V é a força cortante (N);

τ_{adm} é a tensão de cisalhamento admissível máxima no aço (MPa).

A partir da área é possível encontrar o diâmetro do tirante, pela seguinte fórmula temos que:

$$A = \pi \cdot (R^2 - r^2)$$

Onde:

A é a área da seção de aço (mm²);

R é o raio externo (mm);

r é o raio interno (mm);

d é o diâmetro do tirante (mm).

2. Comprimento do tirante

Além do método apresentado no tópico 5.1.1.1 deste trabalho, o comprimento do tirante pode ser calculado conforme a eq. (9) (BARTON *et al.*, 1974 apud CASTRO, 2023).

$$L = \frac{(2 + 0,15 \cdot B)}{ESR} \quad (9)$$

Onde:

L é o comprimento do tirante (m);

B é a largura/vão da escavação em metros (m);

ESR é a razão de contenção da escavação.

De acordo com Fiori (2015), o valor do índice de suporte da escavação (ESR) tem relação direta com a aplicação de escavações e o nível de segurança necessário no sistema de suporte para garantir a estabilidade da estrutura (Tabela 12).

Tabela 12 – Índice de Suporte da Escavação (ESR)

TIPO DE ESCAVAÇÃO	ESR
A – Escavações temporárias em minas	3-5
B– Poços verticais (shafts): Seção circular	2,5
Seção retangular ou quadrada	2
C – Escavações permanentes em minas, túneis com fluxo d'água para hidrelétricas (excluindo túneis de adução de alta pressão), túneis de desvio, túneis pilotos e frentes de avanço de grande porte.	1,6
D – Cavernas de estocagem, túneis de acesso em geral, câmaras de equilíbrio, pequenas rodovias e linhas ferroviárias subterrâneas e acesso a cavernas subterrâneas.	1,3
E – Usinas hidrelétricas, grandes auto-pistas e linhas ferroviárias subterrâneas, cavernas para fins militares, portais, interseções.	1,0
F – Escavações para fins nucleares, estações ferroviárias subterrâneas e fábricas.	0,8

Fonte: (BARTON *et al.* 1974).

Nesse contexto, o comprimento do tirante depende do tipo de escavação e do nível de segurança requerido. Em escavações subterrâneas com elevado fluxo e uso prolongado, o comprimento do parafuso tende a ser maior, pois os valores atribuídos ao ESR são menores em comparação com escavações temporárias e de menor fluxo.

6 CONCLUSÃO

Tendo em vista o exposto, este trabalho apresentou os métodos empíricos de classificação de maciços rochosos frequentemente utilizados em escavações, análise de tensões naturais e induzidas, além de discutir as principais técnicas de estabilização de aberturas subterrâneas. Ressalta-se a importância de que o dimensionamento de suportes seja realizado de forma adequada, com base em documentos normativos e regulamentares pertinentes ao sistema de estabilização adotado.

Inicialmente, o objetivo era abordar o dimensionamento de métodos de suporte em aberturas subterrâneas com base em uma revisão bibliográfica sistemática, com o intuito de disponibilizar material em língua portuguesa fundamentado nas práticas recomendadas e nas normas vigentes. Esse esforço visava garantir a aplicação correta e eficiente dos procedimentos descritos.

Assim, o estudo concentrou-se no detalhamento de dois métodos específicos de estabilização: a ancoragem química e a ancoragem mecânica. Para a ancoragem química, foi apresentado o dimensionamento do Tirante Ancorado com Resina; enquanto para a ancoragem mecânica, abordou-se o *Swellex*, também conhecido como tirante expansivo. Ambos os métodos são amplamente utilizados na estabilização de escavações subterrâneas.

O dimensionamento de ambos os tipos de parafusos está em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR 5629/2018 e com recomendações de normas internacionais, que indicam procedimentos de ensaio para determinar a capacidade de tensão dos elementos constituintes do sistema de ancoragem. Essas informações são cruciais para assegurar um dimensionamento seguro e eficaz de cada componente.

Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas incluam a análise do dimensionamento de outros métodos de estabilização de aberturas subterrâneas mencionados neste trabalho, ampliando assim a compreensão e aplicação das técnicas disponíveis.

REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, L. A.; SOUZA, L. E. de; NETO, R. O.; FABRÍCIO, J. F. Análise e interpretação de parâmetros de qualidade de maciço para proposição de modelo geomecânico. **Revista Monografias Ambientais**, p. 62–79, 2015.
- AQUINO, I. B. de M. et al. Classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas usando modelos de blocos estimados por krigagem dos indicadores. Estudo de caso: mineração fazenda brasileiro – Bahia/Brasil. **HOLOS**, v. 4, 2021. Disponível em: <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10233>>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BARROS, Pedro dos Santos Grandinetti. Proposição de modelo para gerenciamento de riscos em minas subterrâneas por meio de ferramentas de melhoria contínua. 2023. 85 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock mechanics**, Springer, v. 6, p. 189–236, 1974.
- BERNARDO, W. M.; NOBRE, M. R. C.; JATENE, F. B. A prática clínica baseada em evidências: parte II - buscando as Evidências em Fontes de Informação. **Revista Brasileira de Reumatologia**, v. 44, n. 6, p. 403–409, nov. 2004.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1989.
- Bieniawski, Z.T. 1979. Tunnel Design by Rock Mass Classification. Technical Report GL-79-19, Pennsylvania State University, 158 pp.
- BOTELHO, Louise Lira Roedel; DE ALMEIDA CUNHA, Cristiano Castro; MACEDO, Marcelo. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e sociedade*, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining**. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.
- CASTRO, S. A. et. al. **Estudo do dimensionamento dos suportes atirantados**. *Revista Científica Online*, v. 15, n. 1, 2023. ISSN 1980-6957.
- CAVALCANTE, Livia Teixeira Canuto; OLIVEIRA, Adélia Augusta Souto de. Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. **Psicol. rev. (Belo Horizonte)**, Belo Horizonte, v. 26, n. 1, p. 83-102, abr. 2020. Disponível em <http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-11682020000100006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 09 fev. 2025. <https://doi.org/10.5752/P.1678-9563.2020v26n1p82-100>.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, SL da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. Trabalho apresentado, v. 8, p. 1-12, 2011.

CURI, Adilson. **Lavra de minas**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2017

DEERE, D. U.; DEERE, D. W. et al. **Rock quality designation (RQD) after twenty years**. [S. l.]: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1989.

FERNANDES, Luciana Magnani. Úlcera de pressão em pacientes críticos hospitalizados. Uma revisão integrativa da literatura. 2000.

FERREIRA, D. A. **Interação com o maciço de modelos estruturais de concreto projetado submetidos a gradientes elétricos para fins de suporte de túneis**. 2003. Tese (Doutorado). EESC/USP, São Carlos, 2003.

FERREIRA, G. S. Estudo de estabilidade e tensões in situ na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua–RJ. 2004. Tese de Doutorado. Dissertação (mestrado), Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

FIORI, A. P. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes. Oficina de Texto, São Paulo. 2015.

GOMES, B. O. **Análise comparativa dos resultados de monitoramento em ancoragens de escavações subterrâneas em mineração**. 2019. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

GOMES, R. A. M. P. **Análise tridimensional de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GONTIJO, Alexandre Assunção et al. **Avaliação de Transferência de Carga em Tirantes ancorados com Resinas de Poliéster**. In: *COBRAMSEG/SBMR 2018 Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR 2018*. Salvador, Bahia, Brasil, 28 Agosto-01 Setembro, 2018.

GONTIJO, Alexandre et al. **Parâmetros Relevantes e Críticos que Influenciam na Performance do Atirantamento com Cartucho de Resina de Poliéster**. In: *COBRAMSEG/SBMR 2016 Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR 2016*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 19-22 Outubro, 2016.

Hibbeler, R. C. Resistência dos materiais. 7. ed. - São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010

HOEK, E. Practical rock engineering. 2007. **Online. ed. Rocscience**, 2007.

HOEK, E. et al. Rock Slopes in Civil and Mining Engineering. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. 2000. p. 1-16.

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

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles**. [S. l.]: Elsevier Science, 1997.

HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. **Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies**. [S. l.]: SME, 2001.

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

KRISTJÁNSSON, Gunnar. Rock Bolting and Pull Out Test on Rebar Bolts. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2014. Disponível em: <<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/236282?show=full>>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MAGALHÃES, Fábio S.. Desenvolvimento de um modelo de previsão de demanda de energia elétrica utilizando redes neurais artificiais. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-15062018-181113/publico/Tese_Magalhaes_FabioS.pdf>. Acesso em: 03 set. 2024.

MATOS, Arthur Resende et al. **Diagnóstico e Análise Técnica da Operação de Atirantamento Mecanizado Utilizando Jumbo e Cartuchos de Resina Longa**. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas–SBMR, 28th August–1st September 2018, 2018.

MESQUITA, J. B. d. **Maçios rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica**. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2008.

Ministério do Trabalho e Emprego. (2003). Norma Reguladora de Mineração NRM-05: Sistemas de Suporte e Tratamento. Brasília: MTE.

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

NAHAS, M. M. *et al.*. Especialização e diversificação produtiva: um modelo de painel espacial para a indústria extrativa mineral em Minas Gerais, 2000-2010. **Nova Economia**, v. 29, n. 1, p. 7–40, jan. 2019.

NORTON, Robert L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada, 4. Ed. Porto Alegre, Bookman 2013.

OLIVEIRA, M. F. **Análise de ancoragens com resina em mina subterrânea pelo processo mecanizado**. 38 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

PINTO, Gabriel Augusto Tôrres. Análise de rupturas do teto imediato em mina de carvão, camada barro branco. 2018.

PORTO, Thiago Bomjardim. Ancoragem em solos: comportamento geotécnico e metodologia via web para previsão e controle. 2015.

PRICE, D. G. **Engineering geology: principles and practice**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2009.

RENÓ, R., GONTIJO, A. A., HERRERA, J. A. C. Procedimento Operacional de Mapeamento Geomecânico em Escavações Subterrâneas. In: Mecânica das rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura. SBMR 2014-Conferência Especializada ISRM. 2014. p. 09-13.

REZENDE, M. F. A. **Classificação geomecânicas e descrição de métodos de estabilidade em escavação subterrânea**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Goiás (UFG), 2014.

RIZZO, E. A. Segurança e saúde em condicionamento de mina subterrânea. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Catalão (UFCAT), 2021.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 20, n. 2, p. v–vi, abr. 2007.

SAMPAIO, Rosana Ferreira; MANCINI, Marisa Cotta. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, v. 11, p. 83-89, 2007.

SILVA, C. R. **Análises computacionais dos comportamentos do revestimento em concreto projetado na mina Cuiabá – Sabará/MG**. 2019. 152 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SILVA, C. T. **Análise das tensões em maciços rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5030/1/arquivo3327_1.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2024.

SILVA, J. M. (2018) - **Sustentação de Escavações Subterrâneas Civas e de Mineração**. In *The Mine*, n.73, p. 31-33. Disponível em: <<https://www.inthemine.com.br/site/sustentacao-de-escavacoes-subterraneas-civas-e-de-mineracao/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SILVA, J. M. **Estabilidade de escavações subterrâneas**, Universidade Federal de Ouro Preto, DEMIN, Notas de aula, 2007.

SILVA, J. M. **Estabilidade de escavações subterrâneas: suportes descontínuos**. Universidade Federal de Ouro Preto, DEMIN, Notas de aula, 2008.

SILVA, Liliane Ferreira da. **Modelo conceitual do aquífero fraturado da área da jazida de urânio de Caetité, Bahia: implicações para o fluxo subterrâneo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 2015.

SINGH, B.; GOEL, R. **Engineering rock mass classification**. [S. l.]: Elsevier, 2011.

Tirantes de Resina - CPB CONCRETO PROJETADO DO BRASIL. Disponível em: <<https://www.concretoprojetado.com.br/tirantes-rocsolo/tirantes-resina/>>. Acesso em: 28 jun. 2024.

VALLEJO, Luis E. Geologia de Engenharia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf> Acesso em: 03 set. 2024.

VILAS BOAS, Felipe Augusto. Avaliação da aplicação de suportes na estabilização e sustentação de escavações subterrâneas. 2020. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

WOLPP, L. F. d. L. Caracterização e classificação geomecânica de um talude da santa helena mineração ltda. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), 2018.