

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

THAINÃ PEREIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE GEOLOGICO-GEOTÉCNICA E OTIMIZAÇÃO DE SUPORTE EM
MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA**

**Caçapava do Sul
2023**

THAINÃ PEREIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE GEOLOGICO-GEOTÉCNICA E OTIMIZAÇÃO DE SUPORTE EM
MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova

Caçapava do Sul

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

s237a santos, Thainã Pereira dos

ANÁLISE GEOLOGICO-GEOTÉCNICA E OTIMIZAÇÃO DE SUPORTE EM
MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA / Thainã Pereira dos santos.

76 p.

Tese(Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA,
2023.

"Orientação: Diogo Peixoto Cordova".

1. ANÁLISE GEOLOGICO-GEOTÉCNICA. 2. geotecnia. 3.
Otimização de suporte . 4. Galeria subterrânea . I. Título.

THAINA PEREIRA DOS SANTOS

ANÁLISE GEOLOGICO-GEOTÉCNICA E OTMIZAÇÃO DE SUPORTE EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 15 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Diogo Córdova

Orientador

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory

Universidade Federal do Pampa

https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=1461764&infra_sistema=100000100&infra_unidade_atual=4234&infra_hash=03c8f2... 1/2



21/12/23, 15:22 SEI/UNIPAMPA - 1336157 - SISBI/Folha de Aprovação

Assinado eletronicamente por **ITALO GOMES GONCALVES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2023, às 13:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIOGO PEIXOTO CORDOVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2023, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TIAGO RAFAEL GREGORY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/12/2023, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1336157** e o código CRC **43945F8D**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=1461764&infra_sistema=100000100&infra_unidade_atual=4234&infra_hash=03c8f2... 2/2

Dedico este trabalho a meus pais Sanda e Welligton aos meus avós e minhas queridas irmãs, Marina e Thaise.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus pelo dom da vida e por todas as graças alcançadas até este momento. Agradeço aos meus pais, Sandra e Wellington, e aos meus avós, por todos os sacrifícios e pela confiança depositada em mim. Também sou grata às minhas irmãs, Thaise e Marina, à minha sobrinha Helena, aos meus primos Léo, Nara, Luiza, Catarina e Pedro, e ao meu cunhado e um dos meus melhores amigos, Gabriel. Agradeço igualmente aos amigos que estão distantes, mas que se fizeram presentes e torceram por mim ao longo desses anos.

Expresso minha gratidão aos meus professores, em especial ao meu orientador Diogo Cordova, que com paciência e dedicação me guiou neste trabalho. Ao Tiago Gregory, pelos puxões de orelha cheios de amor e carinho, e a todos que contribuíram para minha formação acadêmica. Agradeço à professora Pilar pelo suporte e dedicação, bem como aos demais pelos ensinamentos transmitidos, incluindo um agradecimento póstumo à querida professora Daniela Tolfo. Sou grata à Unipampa Campus Caçapava, desde o pessoal da biblioteca, terceirizados, coordenação, até o pessoal do Nude e técnicos, por tornarem a universidade minha segunda casa ao longo desses anos. Agradeço também à empresa pelos dados cedidos para a realização deste trabalho.

A presença física foi fundamental, mesmo com todo o suporte remoto, e meus amigos desempenharam com maestria essa missão. A Poliana, Mayra, Natacha, Adriely e Bianca, meu sincero agradecimento; vocês são parte do que sou hoje. Ao Pablo, meu parceiro desde a primeira matéria até o final, e a tantos outros que me ajudaram a suportar o peso da graduação, como Eduarda, Juliana, Rhaisa, Gabriel, Baiano, Leonardo, Matheus Vítor, Vinícius, João Saldanha, Valquíia, Ariely, Augusta, Luiza, Tuane, Stefany, Murilo, Alberto, Larissinha, Layandra, Aline Senna, Bruna Barros, Jonas Henrique, Ayrton, e a todos os mencionados, amo vocês. Em memória ao meu grande amigo e parceiro de casa, Luquinhas.

Agradeço à Anna Luiza por todo o apoio e por sempre me incentivar quando eu duvidava de mim mesma, como ela costumava dizer: "Você consegue, vamos!". Sinto-me incrivelmente sortuda por cada pessoa que fez parte desta jornada ao meu lado. Vocês foram a força e o amor que eu precisava.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”.

Friedrich Nietzsche.

RESUMO

A necessidade de consumo de bens minerais vem tendo uma enorme crescente ao longo do tempo e cada vez mais os diversos tipos de minério podem ser aplicados a usualidades do dia a dia. Essa demanda faz com que as reservas que podem ser exploradas em superfície sejam exauridas, havendo a necessidade de adaptação de exploração em subsuperfície. As escavações subterrâneas em maciços rochosos necessitam de um sistema de suporte e contenção, com dimensionamento a partir de um sistema de classificação geomecânica. A caracterização do maciço utilizando-se somente as propriedades de resistência da rocha intacta não permite o dimensionamento adequado da contenção, pois feições estruturais e suas propriedades também devem ser levadas em conta. Sendo assim, uma análise cinemática das interações entre as famílias de descontinuidades interceptadas por cada escavação deve ser realizada. Nesse contexto, o presente trabalho irá apresentar um estudo de caso na Mina Subterrânea de Crixás-GO e têm como principal objetivo caracterizar o maciço e dimensionar o suporte das galerias de desenvolvimento, dependendo da geometria planejada, profundidade, orientação e mergulho do eixo de escavação. Esse estudo mais aprofundado é justificado pela necessidade de maximizar os resultados econômicos e na diminuição de riscos gerados pela exploração em subsuperfície, baseados em método de análise cinemática de blocos (cunhas) a partir da elaboração de modelos tridimensionais. Os resultados desta pesquisa refletem uma análise minuciosa com base nos dados fornecidos pela empresa, enfocando galerias temporárias e permanentes. O suporte adotado para as galerias temporárias já utilizado eram os split-sets, enquanto para as permanentes, foram utilizados tirantes resinados e MD *Bolts*, sendo este último examinado devido às suas características semelhantes aos tirantes resinados. O software *Unwedge* utilizado baseia-se nas informações de entrada para criar combinações, gerando blocos e avaliando sua interação com as galerias. Estes blocos representaram potenciais cunhas suscetíveis a deslizamentos, envolvendo uma análise comparativa das forças de cisalhamento e resistências disponíveis. Foram gerados modelos considerando galerias temporária com uma tendência de 325° e galerias permanentes em oito direções diferentes, com um *plunge* fixo de 7°. A consideração das direções críticas destaca a importância de avaliar a estabilidade em diversas orientações. O fator de segurança estabelecido foi de 1.2, indicando uma margem adequada de segurança para as galerias analisadas.

Palavras-chaves: Escavações subterrâneas; propriedades geomecânicas; caracterização de maciço; suporte e contenção.

ABSTRACT

The increasing demand for mineral resources over time has led to a need for adaptation in exploration methods, transitioning from surface to subsurface mining as surface reserves become depleted. Underground excavations in rock masses require a support and containment system, designed based on a geomechanical classification system. The geomechanical design of an underground mine is crucial, considering the unique characteristics of each mine. Characterizing the rock mass using only intact rock strength properties is insufficient for proper support design, as structural features and their properties must also be considered. Therefore, a kinematic analysis of interactions between discontinuity families intercepted by each excavation is essential. In this context, this study presents a case study at the Crixás-GO Underground Mine, aiming to characterize the rock mass and size the support for development galleries based on planned geometry, depth, orientation, and dip of the excavation axis. This in-depth study is justified by the need to maximize economic outcomes and reduce risks associated with subsurface exploration, using a kinematic block analysis method through the development of three-dimensional models. The results of this research reflect a thorough analysis based on data provided by the partnering company, focusing on both temporary and permanent galleries. The support adopted for temporary galleries was split-sets, while for permanent galleries, resin-grouted rock bolts and MD Bolts were used, with the latter examined due to its similarities to resin-grouted bolts. Detailed information on discontinuities proved crucial for understanding the rock mass behavior. The software employed utilizes this information to create joint combinations, generating blocks and assessing their interaction with galleries. Algorithms are applied to divide the rock mass into blocks, considering the provided characteristics. These blocks represented potential wedges susceptible to sliding, involving a comparative analysis of shear forces and available strengths. Pre-existing models were generated, considering a temporary gallery with a trend of 325° and permanent galleries in eight different directions, each adding 22.5° , with a fixed plunge of 7° . Considering critical directions emphasizes the importance of evaluating stability in various orientations. The established safety factor was 1.2, indicating an adequate safety margin for the analyzed galleries.

Keywords: Underground excavations; geomechanical properties; rock mass characterization; support and containment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.....	16
Figura 2: Mapa de situação da área de estudo	17
Figura 3: Esquema geológico Província Tocantins.....	19
Figura 4: Esquema geológico simplificado do greenstone belt de Crixás.....	23
Figura 5: Coluna estratigráfica de Crixás.	24
Figura 6: Mapa geológico da área de estudo.	29
Figura 7: Exemplo de cálculo RQD	32
Figura 8: Tempo de autossuporte em função do valor do RMR e do vão livre projetado.	35
Figura 9: Estimativa do valor do GSI com base na descrição geológica.....	21
Figura 10: Modelos de blocos instáveis: (a) um arco; (b) um túnel; (c) um talude; (d) e (e) fundação de barragem	24
Figura 11: Representação da projeção estereográfica no hemisfério superior.....	25
Figura 12: Representação da formação dos blocos em chave	26
Figura 13: Tipos de parafusos usados em suporte.	31
Figura 14: Parafuso MD Bolt.....	32
Figura 15: Fluxograma das etapas do presente trabalho.	33
Figura 16: Modelo de galeria de permanente (rampa). Sem a adição de suporte pontual.	36
Figura 17: Blocos galeria temporária Trend 325° sem a geração de nenhum bloco crítico	37
Figura 18: Blocos galeria Permanente 0°, com a geração de dois blocos críticos indicados.....	38
Figura 19: Blocos galeria permanente 22.5° com geração de um bloco crítico	39
Figura 20: Blocos galeria permanente 45° com geração de dois blocos críticos.....	40
Figura 21: Blocos galeria permanente 67.5° com geração de um bloco crítico.	41
Figura 22: Blocos galeria permanente 90° sem geração de blocos críticos.....	41
Figura 23: Blocos galeria permanente 112.5° com geração de um bloco crítico.....	42
Figura 24: Blocos galeria permanente 135° com geração de um bloco crítico	43
Figura 25: Blocos galeria permanente 157.5° sem geração de blocos críticos.....	44
Figura 26: Blocos galeria permanente 180° om geração de dois blocos críticos.....	45

Figura 27: Propriedades dos parafusos utilizados no estudo.	46
Figura 28: Adição de suportes pontuais galeria permanente 0°. Blocos 6 – 9.....	47
Figura 29: Adição de suportes pontuais galeria permanente 22.5°. Bloco 6.....	47
Figura 30: Adição de suportes pontuais galeria permanente 45°. Blocos 6 – 8.....	48
Figura 31: Adição de suportes pontuais galeria permanente 67.5°.Bloco 8.....	48
Figura 32: Adição de suportes pontuais galeria permanente 112.5° Bloco 7.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da qualidade do maciço a partir do RQD.....	32
Tabela 2: Sistema de classificação geomecânica RMR.....	34
Tabela 3: Parâmetros de compartimentação do maciço rochoso	18
Tabela 4: Parâmetros de Condição de rugosidade	18
Tabela 5: Parâmetros de alteração do maciço.....	19
Tabela 6: Parâmetros de afluência de água no maciço rochoso	19
Tabela 7: Parâmetros do estado de tensão do maciço (SRF)	20
Tabela 8: Tipos de mecanismo de suporte.....	30
Tabela 9: Propriedades utilizadas.....	35
Tabela 10: Informações das descontinuidades.....	36
Tabela 11: Blocos críticos gerados.....	45

LISTA DE SIGLAS

FS -	Fator de Segurança
GSI -	Índice de Resistência Geológica
IQD -	Inverso do Quadrado da Distância
ISRM -	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
JRC	<i>Joint Roughness Coefficient,</i>
JCS	<i>Joint Wall Compressive Strength</i>
N -	Norte
NE -	Nordeste
NW -	Noroeste
PHI R-	<i>Residual Friction Angle</i>
Q -	<i>Tunneling Quality Index</i>
RMR -	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD -	<i>Rock Quality Designation</i>
RSR -	<i>Rock Structural Rating</i>
S -	Sul
SE -	Sudeste
SW -	Sudoeste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	JUSTIFICATIVA	15
4	ÁREA DE ESTUDO	16
4.1	Localização da área	16
4.2	Geologia regional	17
4.2.1	Província de Tocantins.....	17
4.2.2	Maciço Goiás	19
4.2.3	Terrenos granito-gnáissicos	20
4.3	Geologia local.....	20
4.3.1	O <i>greenstone belt</i> de Crixás, seus depósitos auríferos e evolução deformacional	20
4.3.2	Evento deformacional - D1.....	24
4.3.3	Evento deformacional – D2.....	25
4.3.4	Evento deformacional – D3.....	25
4.3.5	Evento deformacional - D4.....	26
4.3.6	Metamorfismo do <i>greenstone belt</i> de Crixás.....	26
4.3.7	Depósitos auríferos do <i>greenstone belt</i> de Crixás e seu modelo metalogénico	27
4.3.8	Formação Córrego Alagadinho	27
4.3.9	Formação Rio Vermelho	28
4.3.10	Formação Ribeirão das Antas.....	28
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
5.1	Maciço Rochoso	30
5.2	Classificação geomecânica.....	30
5.2.1	RQD (<i>Rock Quality Designation</i>).....	31
5.2.2	RMR (<i>Rock Mass Rating</i>).....	33
5.2.3	Sistema – Q	18
5.2.4	Índice de resistência geológica (GSI).....	20
5.3	Fator de Segurança (FS).....	21
5.4	Crítério de Ruptura de Barton.....	22
5.5	Estabilidade de escavações subterrâneas	23
5.5.1	Teoria de blocos-chave.....	23

5.5.2	Análise cinemática em escavações subterrâneas	26
5.5.3	Dimensionamento de suportes e contenção	29
5.5.4	Tirantes.....	30
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
7.1	Geração de blocos e interação com os suportes	37
7.1.1	Suportes pontuais	46
8	CONCLUSÕES.....	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O patrimônio mineral constitui uns dos bens mais relevantes para o desenvolvimento econômico e social de qualquer país. Trata-se de bens de relevante importância estratégica para as atuais e futuras gerações de brasileiros (Martins,2017). Se tratando de uma atividade de grande importância para o avanço da sociedade, a produção de bens minerais projeta para o futuro a perspectiva de produzir cada vez em maior escala, através de lavra subterrânea. Isso se dá em razão da progressiva escassez das reservas facilmente acessíveis à extração a céu aberto e da necessidade da preservação do meio ambiente, impondo cada vez mais restrições a esta lavra, embora, sabidamente, não seja a indústria extrativa mineral a atividade econômica que mais agride o meio ambiente (Silva, 2015).

O método de lavra subterrânea consiste em um conjunto de operações que são coordenadas, e tem como objetivo a extração de minerais ou minérios no subsolo, dispondo de necessidade de estudos e investimentos em alta tecnologia a fim de contemplar corretamente às necessidades no processo extrativo. Uma vez que a avaliação do maciço indica teoricamente a sua estabilidade, estas aberturas fazem com que ocorra uma redistribuição das tensões, processo que ocorre devido às grandes concentrações de cargas que se encontram sobre elas, podendo assim, gerar instabilidades e riscos de acidentes, havendo uma necessidade de estruturas que irão fazer o suporte e contenção desses maciços.

As escavações, bem como os sistemas aplicados de reforço junto ao maciço rochoso, têm seu dimensionamento a partir de classificações geomecânicas levando em consideração parâmetros não só característicos da rocha e seus aspectos estruturais, mas de como as tensões ao redor das escavações se redistribuem. A área de estudo pertence ao distrito aurífero de Crixás-GO, de acordo com Jost *et al*(2010), constitui a sexta maior reserva de ouro do Brasil e o maior depósito exclusivo da região central do país, possuindo uma reserva estimada de 70t de ouro, distribuídas nas rochas mineralizadas com um teor médio de 12g/t. A região tem seu potencial aurífero explorada com garimpo desde o século XVIII pelos bandeirantes e foi consolidada por volta de 1980 com o estabelecimento da mineração subterrânea mecanizada, pela empresa Mineração Serra Grande (MSG).

Dada a importância deste depósito o trabalho traz a aplicação da análise da cinemática de blocos (cunhas), que conforme Menendez-Diaz *et al.* (2009), consiste em um método que faz a análise do tamanho dos blocos, que são definidos a partir da orientação das famílias de descontinuidades, da escavação e as propriedades mecânicas delas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como intuito, contribuir de maneira objetiva na otimização do dimensionamento preexistente de suportes das galerias subterrâneas, conforme suas geometrias e aspectos estruturais relevantes, de forma a conter possíveis colapsos, deslizamentos e rupturas do maciço rochoso, otimizando assim o custo relacionado a um fator de segurança satisfatório.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho, destacam-se:

- Discutir a relevância do estudo geológico-geotécnico aplicado à mineração subterrânea, bem como os processos de planejamento do suporte em galerias, visando mitigar possíveis problemas gerados quanto à segurança das operações lavra;
- Contribuir na avaliação de geometrias propostas para as galerias e na otimização do suporte, conforme o comportamento geomecânico do maciço rochoso;
- Realizar uma análise cinemática quanto a formação de blocos (cunhas) nas galerias;
- Considerar otimizações quanto aos tipos e quantidades de elementos de suporte necessários a fim de manter um bom fator de segurança e diminuir os custos da operação.

3 JUSTIFICATIVA

A relevância da realização deste trabalho está embasada na necessidade de conhecimento e análise do reforço e contenção do maciço rochoso, visando benefícios não somente econômicos, mas de segurança baseados no uso de métodos e um sistema de suporte que se melhor se adeque a realidade da área estudada. Conforme Hudson e Harrison (1997), os reforços são utilizados numa tentativa de diminuir os deslocamentos que ocorrem ao longo de descontinuidades já existentes. Portanto, o maciço rochoso passa a ser suportado por um elemento de carga externo. Windsor (1997) afirma que, apesar dos grandes avanços no conhecimento sobre sistemas de contenção, existe ainda uma grande discussão na consideração das vantagens e desvantagens da aplicação de diferentes dispositivos e em vários problemas geotécnicos.

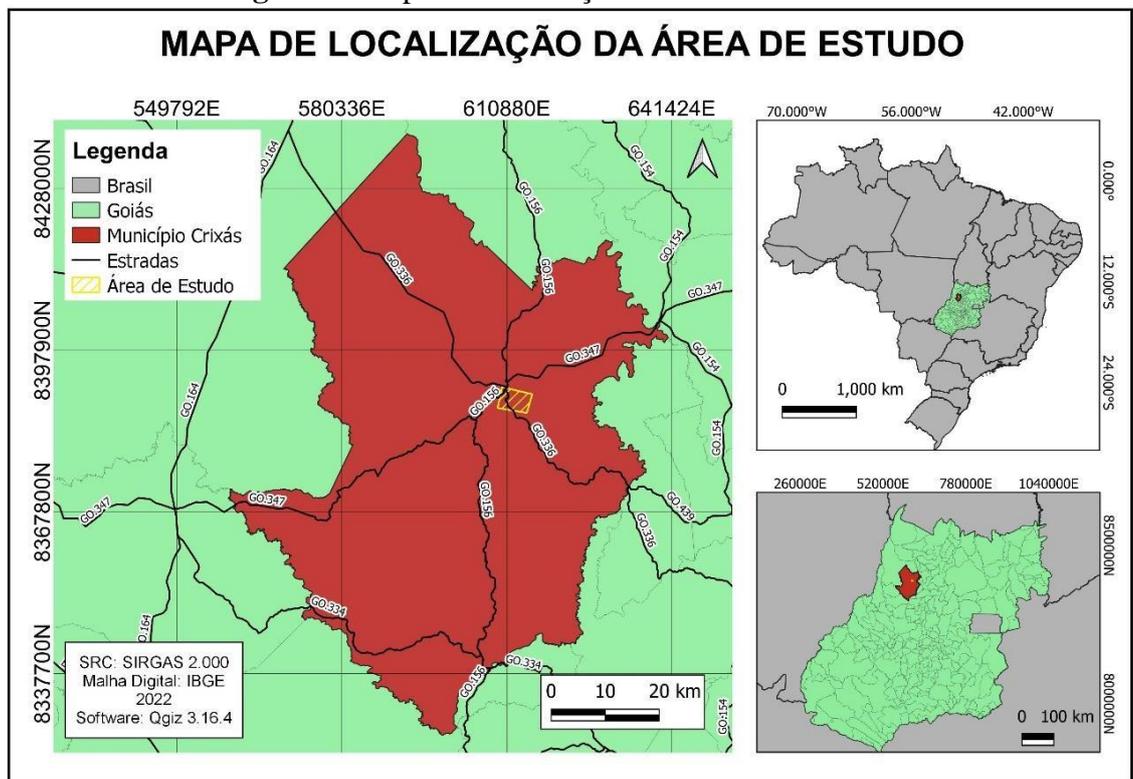
4 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo serão descritas características da área de estudo, envolvendo localização e acesso, e as questões do contexto geológico em que ela se encontra.

4.1 Localização da área

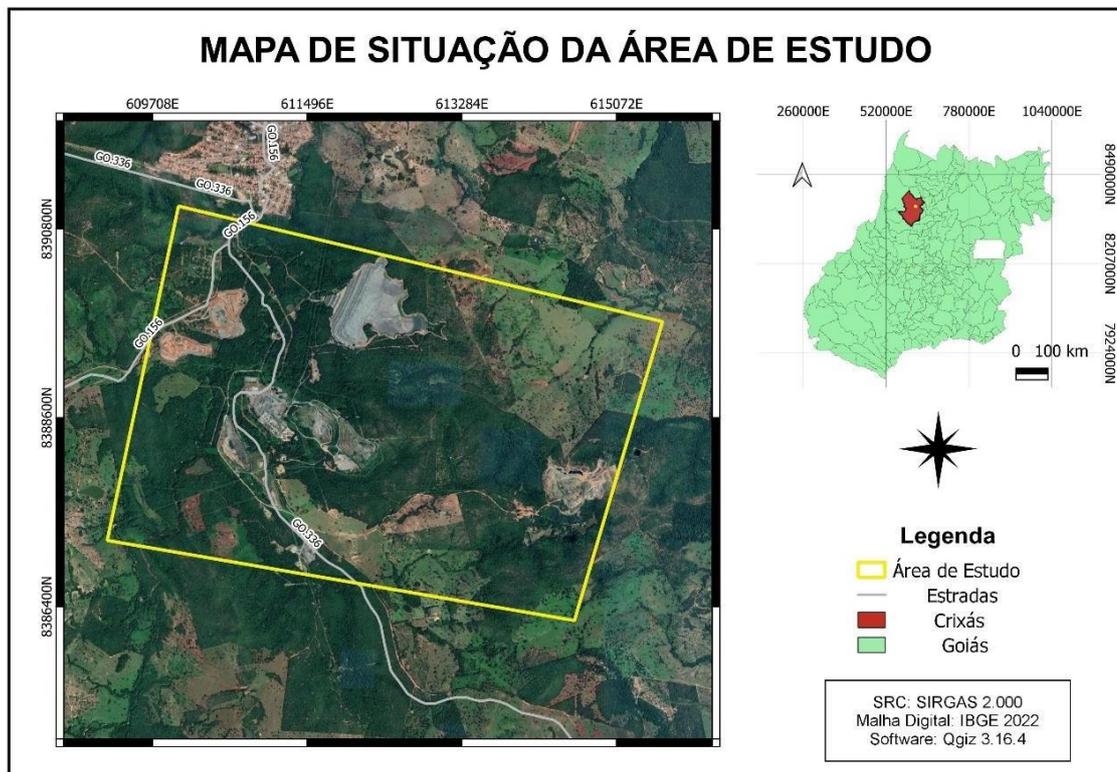
A área de estudo do presente trabalho, encontra-se no município de Crixás, noroeste do Estado de Goiás, 380 km da cidade de Brasília e cerca 338 km da cidade de Goiânia (figura 1), localizado na área rural do município de Crixás.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autor (2023)

Figura 2: Mapa de situação da área de estudo



Fonte: Autor (2023)

Já em aspectos mais locais a área da mineração alvo do presente estudo está inserida na parte rural do município, em um breve histórico, Serra Grande é a principal produtora e exportadora de ouro do Estado de Goiás. O acesso a mineração é saindo da cidade pela estrada Itapaci que fica na GO-347, sentido GO-156 aproximadamente 3 km até a bifurcação pegando a GO-356 até a mineração Serra Grande (figura 2).

4.2 Geologia regional

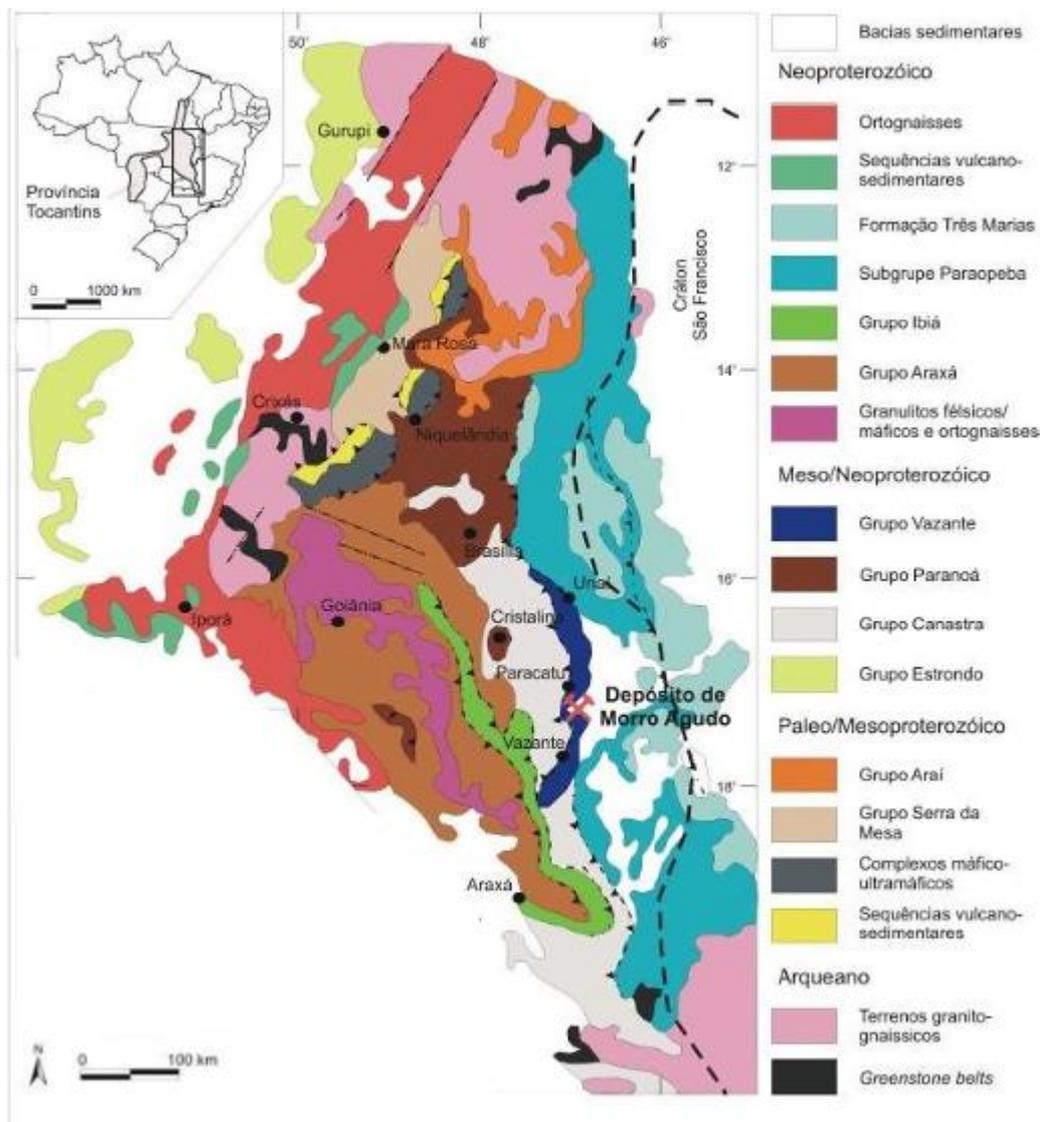
4.2.1 Província de Tocantins

Localizada a oeste do Cráton São Francisco, engloba as faixas Araguaia, Brasília, Paraguai e arco magmático de Goiás e maciço de Goiás (Almeida et al.,1997). A Província Tocantins foi constituída durante a orogenia brasileira Neoproterozóicas sendo resultado de uma convergência de três blocos continentais, Cráton Amazônico, Cráton São Francisco e por fim o Congo Parapanema, atualmente sob a bacia do Paraná. Onde os limites sul da província estão encobertos por depósitos fanerozóicos da bacia do Paraná, pertencendo ao Brasil central

e integrando o sistema Brasileiro/Pan-Africano. A Província Tocantins apresenta direção geral norte-sul com cerca de 2.000 km de comprimento e até 800 km de largura (figura 3). Compreende as faixas dobradas Araguaia e Paraguai a oeste, edificadas na margem do Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília estabelecida na margem do Cráton do São Francisco, onde se encontra o Arco Magmático de Goiás (Pimentel et al., 1991; Pimentel & Fuck, 1992).

Nessa proposta, individualizaram o Maciço de Goiás como um micro continente envolvido nos processos colisionais brasileiros e destacaram deste, uma faixa de acreção crustal neoproterozóicas, denominada de Arco Magmático de Goiás (Pimentel et al., 1991; Pimentel e Fuck, 1992). A faixa Brasília contém dois segmentos distintos (zonas externa e interna) que se diferenciam um do outro pela intensidade deformacional a que foram submetidos e por apresentarem polaridade metamórfica crescente em direção à zona interna da faixa (Pimentel et al., 1991; Pimentel e Fuck, 1992).

Figura 3: Esquema geológico Província Tocantins.



Fonte: Modificado de Oliveira et al. (2014).

4.2.2 Maciço Goiás

O Maciço de Goiás (Barbosa et al., 1969) é composto por terrenos granito-greenstone belts de idade arqueana, complexos máficos-ultramáficos e sequências vulcano-sedimentares de idade paleo-mesoproterozoicas. As rochas com idade paleo-mesoproterozoico consistem dos Complexos Máficos-Ultramáficos de Barro Alto, Niquelândia e Canabrava além das sequências vulcano-sedimentares de Jucelândia, Coitezeiro e Palmeirópolis (Sartori, 2015). Similaridades entre os complexos máficos-ultramáficos, indicando que, foram originalmente formados por um corpo estratiforme contínuo e único, com cerca de 350 km de comprimento, interpretado

como parte de um *rift* continental (Filho & Pimentel, 2000; Pimentel et al., 2000; Pimentel, Filho & Armstrong, 2004).

Os terrenos arqueanos no Maciço de Goiás consistem em associações de complexos granito-gnaissicos e *greenstone belt* orientados NE-SW com limites inteiramente tectônicos, possuindo limites ao norte e oeste com o Arco magmático de Goiás, composto por rochas metavulcânicas, metasedimentares de idade neoproterozóicas, e na porção nordeste, limitados com estreita faixa de rochas metassedimentares e metavulcânicas do Paeloproterozóico. Contém rochas metassedimentares do grupo Araxá a leste (Pimentel *et al.*, 2000). As faixas de *greenstone* de Crixás, Guarinos, Pilar de Goiás, Faina e Serra de Santa Rita, bem como os complexos gnaissicos associados de Uvá, Caiçara, Anta, Caiamar, Moquém e Hidrolina caracterizam o bloco Arqueano na parte sul do maciço (Joaquim, 2011) foram cobertos com rochas metasedimentares estando fortemente dobradas do grupo Serra da Mesa.

4.2.3 Terrenos granito-gnáissicos

Por compreender cerca de 80% do segmento crustal arqueano, os terrenos granito-gnaissicos são constituídos de gnaisses e intrusões de granitoides com composição tonalítica a granodiorítica, raramente granítica, reunidos em cinco terrenos complexos: Anta (Vargas, 1992), Caiamar (Jost *et al.*, 1994a; Jost, 2001), Caiçara (Oliveira, 1983), Hidrolina e Uvá (Resende, 1999; Resende *et al.*, 1998) e o bloco Moquém (Dani & Ribeiro, 1978; Vargas, 1992; Jost *et al.*, 1994b).

4.3 Geologia local

4.3.1 O *greenstone belt* de Crixás, seus depósitos auríferos e evolução deformacional

O *greenstone belt* de Crixás (Figura 3) caracteriza-se como uma sequência vulcano-sedimentar, denominada Grupo Crixás por Jost e Oliveira (1991), com estrutura alongada na direção N-NW e S-SE, ao sul, ao leste sendo limitado pelo complexo Caiamar, vulcânicas ultramáficas, vulcânicas máficas, vulcânicas félsicas sedimentar de Crixás. O Grupo Crixás foi caracterizado por Sabóia *et al.* (1981), da base para o topo, por rochas ultramáficas komatiíticas

(Formação Córrego Alagadinho), basaltos almofadados e vesiculados (Formação Rio Vermelho) e por uma sequência com sedimentos químicos e detríticos no topo (Formação Ribeirão das Antas) conforme a figura 5.

O *greenstone belt* de Crixás é caracterizado por uma grande complexidade estrutural sendo o resultado de vários ciclos tecto-orogênicos, havendo uma fase de distensão durante a formação do *greenstone belt* e quatro eventos deformacionais posteriores, compressivos. A sequência de eventos compressivos, descrita por Massucato (2004) e Carvalho (2005), possui forte ligação com a mineralização aurífera. Carvalho (2005) descreveu a existência de três eventos deformacionais no *greenstone belt* de Crixás (D1, D2, D3), assim como Massucato (2004), que levantou a hipótese de mais um evento (D4).

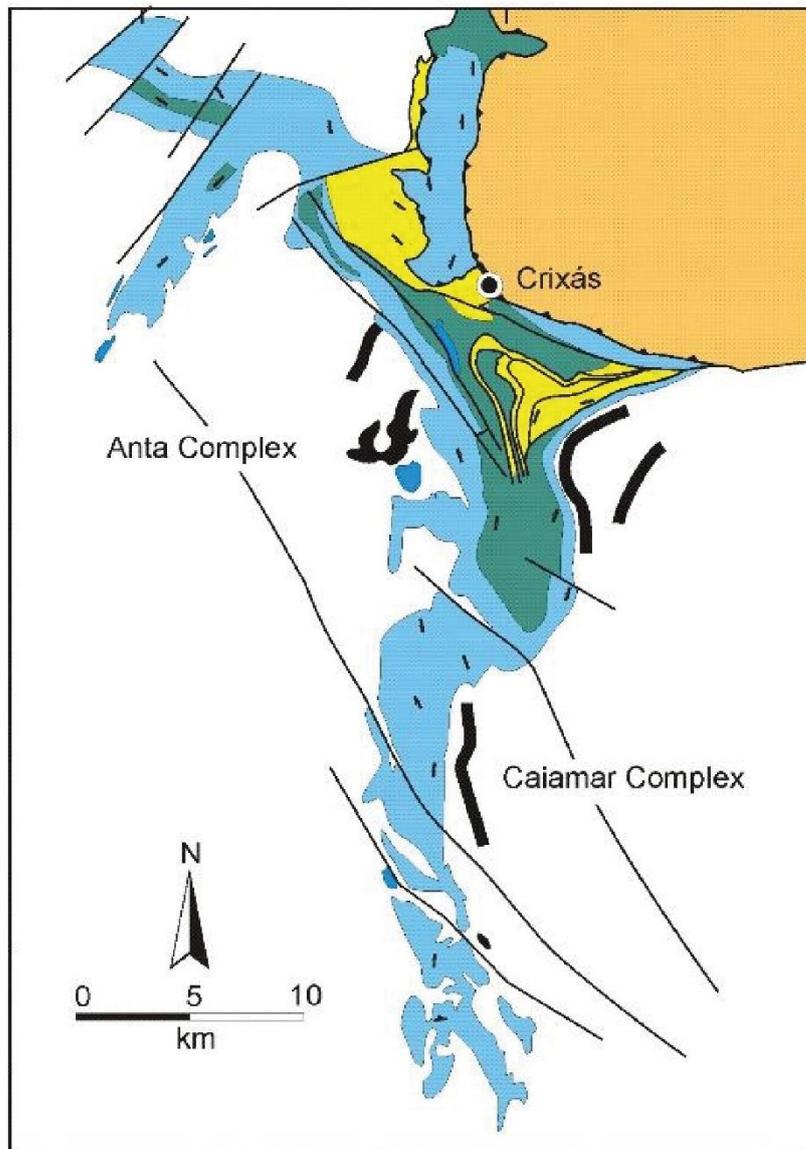
Houve uma inversão estratigráfica das sequências em uma porção do *greenstone belt* de Crixás (Yamaoka e Araújo 1988). Um metamorfismo e deformação heterogêneas (Massucato, 2004). O modelo epigenético, atribuído aos depósitos de ouro da região de Crixás, mostra-se consistente com as interpretações de depósitos de ouro de terrenos arqueanos (Jost, 2001), definidas por Phillips e Groves (1983) e aprimoradas por Foster *et al.* (1986), Groves *et al.* (1987), Colvine *et al.* (1988), Colvine (1989) e Groves e Foster (1991).

Em datação geocronológica Jost *et al.*, (2010) têm apontado que a mineralização aurífera é restrita ao Rhyaciano (Paeloproterozóico), através de datação de zircões magmáticos de diques máficos pós-mineralização que indicaram idade U-Pb de 2170 ± 17 Ma (Jost *et al.*, 2010). Jost *et al.* (2010), também sugere que o estágio basinal, deformação, metamorfismo e mineralização ocorreram cerca de 40 Ma restrito ao mesmo período (2,2 a 2,17 Ma, sugerindo ainda que a carga sedimentar da área fonte para as metagrauvas e filitos carbonosos da Formação Córrego Alagadinho possui idade (U-Pb de 3354 ± 40 Ma a 2209 ± 28 Ma) entre o arqueano e o paleoproterozoico com idade deposicional máxima de 2,2 Ga.

A idade dos metabasaltos da Fm. Rio Vermelho e metakomatiitos da Fm. Córrego Alagadinho são sugeridas como arqueanas por Arndt *et al.* (1989) e Fortes *et al.* (2003), mas Jost *et al.* (2010) indicou idade paleoproterozoica (idades modelos Nd 2,32 Ga e 2,24 Ga). No *greenstone belt* de Crixás encontram-se as principais mineralizações auríferas da região, controladas por falhas transcorrentes e de empurrão, de modo que três tipos diferentes de mineralização foram reconhecidos: sulfeto maciço, veio de quartzo e Sulfeto disseminado. Os corpos de minério podem ser divididos de acordo com a falha de empurrão principal que o controla, chamada de “estrutura” (Jost & Fortes, 2001).

Devido à sobrecarga exercida pelos derrames, esses provavelmente possibilitaram a formação de uma bacia flexural, o que gerou uma bacia rasa devido a flexão e com deposição de sedimentos pelíticos-psamíticos e químicos (pelitos carbonosos). Com contato gradacional dos pelitos carbonosos e por vezes formando interdigitações, depositam-se grauvacas líticas, indicando um aumento de carga sedimentar, cuja distribuição sedimentar espacialmente indica um eixo de deposição da bacia com direção próxima a NW-SE. Simultaneamente a deposição dos sedimentos, ocorre um evento distensivo (falhas normais sin-deposicionais), causando aumento da carga sedimentar através de sedimentos grosseiros, gerando seixos de pelitos carbonosos no interior de grauvacas líticas e a geração de conglomerados. Tal evolução sedimentar aplica-se a um ambiente plataformal de mar raso, com proximidade a costa continental.

Figura 4: Esquema geológico simplificado do greenstone belt de Crixás.

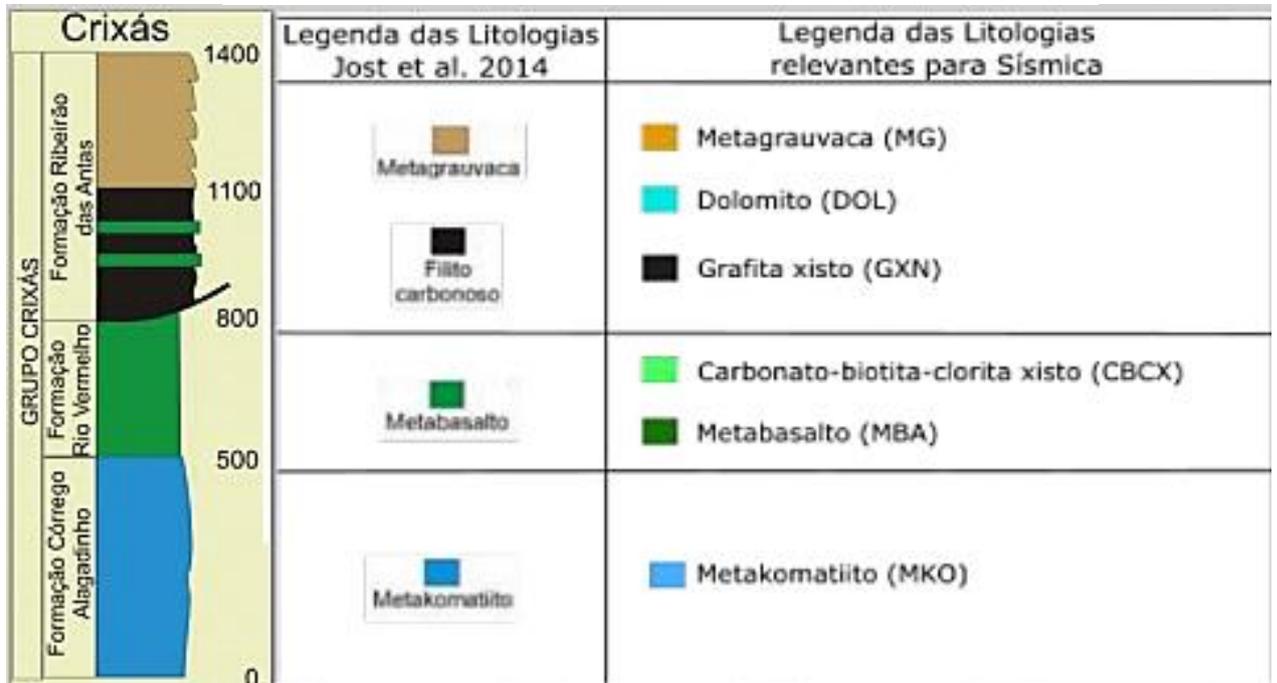


LEGEND

- | | | |
|--|---|--|
|  Neoproterozoic cover |  Serra do Cantagalo Sequence | |
|  Trondhjemite intrusions |  Morro Escuro Sequence | |
|  Granite-gneiss complexes |  Metasedimentary units | |
|  Metabasalts |  Metakomatiites | |
|  Main faults |  Thrust faults |  Foliation attitude |
|  Regional folds |  Towns | |

Fonte: Jost *et al.* (2014).

Figura 5: Coluna estratigráfica de Crixás.



Fonte: Jost *et al.* (2014).

4.3.2 Evento deformacional - D1

Evento com caráter compressivo, após a instalação do *greenstone belt* de Crixás com direção aproximada leste-oeste com vergência para leste, obteve-se uma formação de um sistema de falhas com empurrão com baixo ângulo de direção preferencial norte-sul e mergulho para oeste, e simetria similar a um duplex. As falhas de empurrão geradas foram responsáveis pela geração de zonas de cisalhamento rúptil-dúctil com espessura numa ordem métrica, indicando uma tectônica epidérmica (sem envolvimento do embasamento), responsáveis pela geração da foliação S1, reorientando e gerando novas micas (de caráter milonítico), mascarada por foliação mimética contemporânea através da hidrotermalização (Castoldi, 2018).

Quanto a tectônica epidérmica, essa sugere que as falhas de empurrão de baixo ângulo permitiram a formação de *horse* e a inversão tectônica da bacia. Durante o evento ocorreu a hidrotermalização principal da área, tendo as falhas de empurrão e zonas de cisalhamento associadas e servindo como condutos por onde os fluidos hidrotermais percolam, com caráter sin a pós-tectônico, com o encaixe do veio de quartzo da zona Inferior dos corpos de minério (Ingá, Mina Nova e Corpo IV), tendendo a destruir as feições que são típicas do plano de falha (Castoldi, 2018).

Este evento é considerado responsável pela deposição da maioria do ouro da região e sugere-se a hidrotermalização como contemporânea ao cavalgamento. O veio de quartzo massivo tende a acompanhar o empuxo do piso do duplex, por vezes aproveitando zonas de maior fraqueza (fraturamento hidráulico do Veio) e se distanciando um pouco do contato próximo do filito carbonoso com o quartzo-clorita-sericita-granada-xisto (Sartori, 2015).

4.3.3 Evento deformacional – D2

Evento de compressão norte-sul, com vergência para sul, através do cavalgamento das rochas da Sequência Santa Teresinha sobre as rochas do Grupo Crixás, o que gerou uma formação de dobras F2 e desenvolvimento de uma clivagem plano axial denominada de S2. As dobras F2, semi-recumbentes a recumbentes, cilíndricas e com vergência para Sudoeste, são responsáveis pelo controle estrutural da mineralização, devido a ação da compressão do evento D2 sobre a foliação S1 (D1), gerando eixo de dobramento com concordância com o caimento assumido para a mineralização no distrito (20-295°). A ação do dobramento do evento D2, assim como em outras zonas mineralizadas, permite uma reconcentração mecânica do ouro ao longo das zonas de charneira, permitindo o aumento dos teores. Essa concentração aurífera por meio das dobras F2 define a geometria dos corpos mineralizados da área. Falhas reversas associadas ao dobramento F2 podem ser geradas, reflexo de zonas de cisalhamento milimétricas a centimétricas que permitem pequena remobilização de ouro que se precipita em zonas próximas a essas falhas. Além disso, a compressão do evento D2 gera clivagem plano axial (S2) através de dissolução por pressão.

4.3.4 Evento deformacional – D3

Compressão E-W com formação de um grande dobramento com eixo aproximadamente N-S, gerando clivagem de crenulação S3 que possui direção que varia em torno de 86/086°. O evento D3 permite o arqueamento do *greenstone belt* de Crixás, originando a Antiforme do Rio Vermelho (Magalhães, 1991), dobrando o sistema duplex instalado durante o evento D1. Dobramentos gerados nesse evento interferem em dobramentos do evento D2, criando um padrão de interferência. Aparentemente, o evento D3 não afeta a mineralização aurífera no *greenstone belt* de Crixás, sendo assim, tardio (Castoldi, 2018).

4.3.5 Evento deformacional - D4

Segundo Castoldi (2018), o D4 foi um tardio evento deformacional, com as mineralizações auríferas do distrito, caracterizadas por compressão NNW-SSE para N-S, formações de *kind bands* e crenulações (S4) com um dobramento suave, aberto, normal e inclinado com foliação não penetrativa.

4.3.6 Metamorfismo do greenstone belt de Crixás

O metamorfismo ocorre de forma heterogênea, assim como a deformação, desde condições de baixo grau até anfíbolito inferior (Massucatto, 2004), através dos quatro tipos principais de metamorfismo: estático (Queiroz, 2000), regional (Kuyumjian, 1981; Magalhães, 1991; Fortes, 1996), termal e dinâmico (Fortes, 1996). O metamorfismo regional age sobre a sequência vulcano-sedimentar com gradiente crescente partindo do topo para a base. Os basaltos inferiores contêm ferro-tschermakita e andesina, indicando fácies anfíbolito e os basaltos superiores contêm ferro-actinolita, albita e clinozoisita, indicando fácies xisto verde. Já os metapelitos da Formação Ribeirão das Antas contêm clorita e biotita, sugerindo metamorfismo da fácies xisto verde, zona da biotita. Granada é comum em falhas que cortam metapelitos e indicam condições P-T levemente maiores (Sartori, 2015). De acordo com Queiroz (2000), o metamorfismo estático é atuante sobre os komatiitos da Formação Córrego Alagadinho e lavas almofadadas da Formação Rio Vermelho, devido a hidratação dos derrames durante os pulsos de alteração hidrotermal associados e as erupções aquosas. O metamorfismo termal ocorre em rochas supracrustais na proximidade de intrusões tonalítica, granodioríticas e graníticas, com fácies albita-epidoto hornfels. O metamorfismo dinâmico é atestado pela presença de milonitos recristalizados (blastomilonitos). Nos basaltos é indicado pela transformação de ferro-tschermakita para ferro-actinolita e de andesina para albita. Nos metassedimentos é indicado principalmente pela estabilização da granada na fácies xisto verde. Fortes (1996) descreve zonas de cisalhamento com paragênese ricas em sericita, cianita, cloritóide, pirofilita e sulfetos, com ou sem teor aurífero associado, evidenciando alteração hidrotermal coexistente com o metamorfismo.

4.3.7 Depósitos auríferos do greenstone belt de Crixás e seu modelo metalogénico

Jost *et al.* (2010) distribuem os principais depósitos auríferos da região em três tipos principais, sulfeto maciço, veios de quartzo e minério disseminado. Esses tipos foram inicialmente estudados por Yamaoka e Araújo (1988) e posteriormente detalhada por Fontes (1996) e Petersen, sendo tipologias controladas por falhas de empurrão e zonas de cisalhamento, eles diferem de tamanho, teor, reserva, rocha hospedeira mineralogia e alteração hidrotermal (Jost *et al.*, 2010; JOST & FORTES, 2001).

A geometria de todos os depósitos é linear, com direção aproximada de N60°W, com caimento de 15° para NW, tendo os processos de formação do minério totalmente estendidos, tendo em vista que, são originadas pelas inclusões fluídas, paragêneses dos halos e das zonas mineralizadas inferindo sucessivos estágios mineralizantes (Jost *et al.*, 2010). Em relação ao modelo metalogénico, Yamaoka e Araújo (1988) interpretaram as lentes de sulfeto maciço na porção mais central do depósito como depósitos vulcanogénicos de sulfeto maciço (VMS) e a mineralização em veios de quartzo como *metachert* aurífero. Thomson (1987) propôs que o minério foi formado através de um evento hidrotermal epigenético, relacionado as falhas de empurrão. Magalhães (1991), Fortes (1991 & 1996) e Portocarrero (1996) consideraram as ocorrências próximas ao depósito na região de Crixás, como epigenéticos. Ribeiro Filho (1984) interpretou as ocorrências de ouro nos garimpos de Maria Lázara como depósitos exalativos singenéticos, com remobilização posterior. Pulz (1995) considerou os garimpos de Maria Lázara e de Cachoeira do Ógo como epigenéticos, controlados por movimento strike-slip em zonas de cisalhamento. O modelo epigenético, atribuído aos depósitos de ouro da região de Crixás, mostra-se consistente com as interpretações de ocorrência dos depósitos de ouro de outros terrenos arqueanos (Jost, 2001), definidas por Phillips e Groves (1983) e aprimoradas por Foster *et al.* (1986). Groves *et al.* (1987), Colvine *et al.* (1988), Colvine (1989) e Groves e Foster (1991).

4.3.8 Formação Córrego Alagadinho

A Formação Córrego Alagadinho é caracterizada predominantemente por rochas ultramáficas (metakomatiitos), com suas feições primárias preservadas, tais como textura spinifex, cumulos de olivina, brechas de fluxo e disjunções poliedrais. Podem apresentar serpentinização total ou parcial e transformação total para xistos magnesianos. Os xistos magnesianos são compostos por peridotitos, piroxenitos e dunitos metamorfisados, possuindo proporção variada de talco, clorita, tremolita, antigorita, antofilita, serpentina e

anfíbólio. Os protólitos komatíticos eram peridotíticos ou piroxeníticos, com *sills* menores de olivina-gabro e piroxenito.

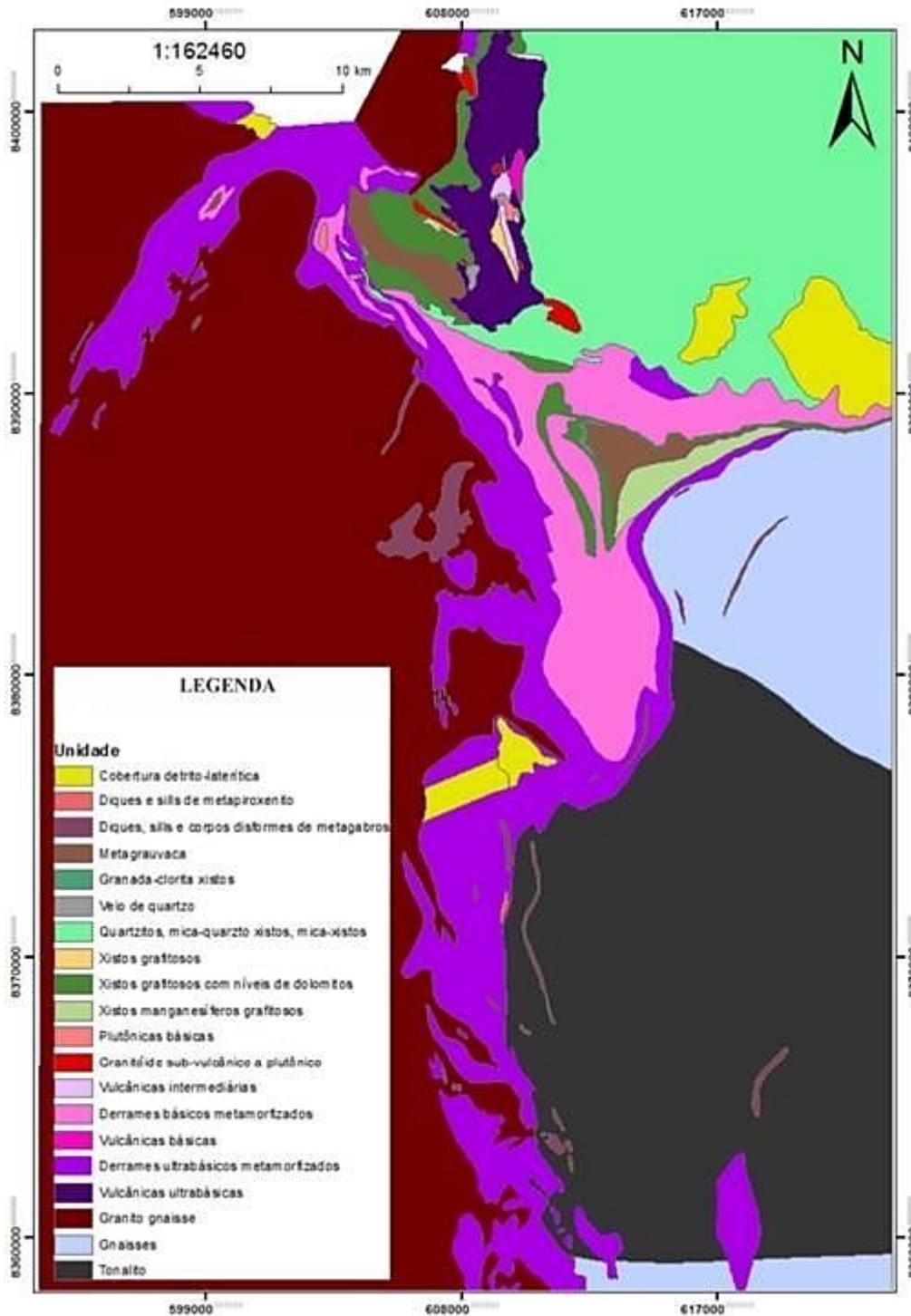
4.3.9 Formação Rio Vermelho

A Formação Rio Vermelho, em contato abrupto com a Formação Córrego Alagadinho, é caracterizada predominantemente por metabasaltos toleíticos, anfíbolitos e anfíbólio xistos e subordinadamente por metabasaltos komatíticos. Feições primárias como *pillows*, variólas, vesículas e orbículas são localmente preservadas (Sabóia, 1979). Formações ferríferas bandadas, formações manganésíferas e *metachert* ocorrem como intercalações metassedimentares (Jost & Fortes, 2001).

4.3.10 Formação Ribeirão das Antas

A Formação Ribeirão das Antas, em contato transicional com os metabasaltos da Fm. Rio Vermelho é constituída de filitos carbonosos com lentes e camadas de mármore sobrepostos por metarritimitos siliciclásticos, em contato abrupto, sugerindo discordância erosiva. Metavulcanoclásticas aluminosas e intermediárias ocorrem associadas e possui em média 700m. Nesta formação incluem-se os depósitos auríferos Mina III, Mina Nova e Ingá. Theodoro (1995), dividiu a Fm. Ribeirão das Antas em três membros: (1) Vulcanossedimentar, (2) Carbonático e (3) Siliciclástico (figura 6). O Membro Vulcanossedimentar consiste em filitos carbonosos com fragmentos de provável púmice. O Membro Carbonático é composto por mármores maciços a laminados, com indícios de prováveis estromatólitos e oncóides depositados em planícies de maré e intermaré e barreiras, respectivamente. Por vezes apresenta brechas carbonáticas. O Membro Siliciclástico é caracterizado por metarenitos, metasiltitos e metafolhelhos rítmicos com laminação plano-paralela e cruzada e granodecrescência ascendente. Os litotipos e estruturas sedimentares reliquias presentes sugerem deposição em ambiente lacustre ou plataformal restrito de águas rasas, com contribuição de turbiditos (Castoldi, 2018).

Figura 6: Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Modificado de Sartori (2015).

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão revisadas as referências bibliográficas existentes sobre os conceitos necessários para aplicação deste trabalho, tratando tanto das teorias envolvidas nas metodologias utilizadas, quanto a revisão de trabalhos anteriores na mesma área de estudo e com temáticas semelhantes.

5.1 Maciço Rochoso

Segundo Azevedo & Marques (2002), o maciço rochoso constitui-se como uma reunião de blocos rochosos negociados em sobreposição ou articulação, originados a partir de uma matriz rochosa ou rocha íntegra. Essa matriz é formada por blocos e suas superfícies limitantes, configurando descontinuidades que abrangem o estado de tensão presente no local, bem como outros aspectos estruturais. As características estruturais, como planos de foliação, dobras, falhas e sistemas de fraturas, exigem atenção especial, dado seu vínculo com zonas de fraqueza, além de todas as propriedades geomecânicas do maciço (Garroux, 2015).

A importância da caracterização geomecânica é justificada pela diversidade de comportamentos apresentados pelo bloco rochoso diante de modificações específicas. Isso ocorre em virtude da necessidade de se atingir um equilíbrio estático dos blocos, pois as características variam de diversas maneiras, de acordo com as particularidades geológicas de cada maciço rochoso (Vatanable, 2018).

Uma descontinuidade refere-se a qualquer quebra mecânica ou fratura encontrada nos planos de fragilidade de um maciço rochoso, sendo crucial identificar sua origem, que pode ser natural ou artificial (Fiori & Carmignani, 2011). De acordo com Fiori & Carmignani (2011), as características primordiais das descontinuidades, com implicações no comportamento geotécnico de maciços fissurados, incluem orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, percolação nas descontinuidades e o estado de meteorização das respectivas paredes.

São essas descontinuidades que, em geral, determinam o comportamento mecânico do maciço, sendo estruturas com menor resistência, especialmente em situações de rupturas associadas a influências ocorridas ao longo de superfícies de anisotropias bem definidas (Fontinhas, 2009).

5.2 Classificação geomecânica

Devido à elevada complexidade do maciço rochoso, torna-se imprescindível a aplicação de ferramentas teóricas que viabilizem a análise de seu comportamento e sua interação com

operações de mineração. Nesse contexto, as classificações geomecânicas dos maciços rochosos são empregadas, sendo modelos que englobam diversas características, não apenas geológicas, mas também de resistência, essenciais para compreender o comportamento do maciço rochoso. Com base nessas classificações, são dimensionadas e projetadas escavações com diferentes propósitos, assim como os padrões de elementos de suporte que serão utilizados para a contenção, quando necessário, visando garantir a estabilidade das escavações.

A classificação geomecânica de um maciço rochoso é derivada da observação das propriedades da rocha, que, de forma isolada ou associada, influenciam seu comportamento. As características específicas da rocha variam conforme o ambiente ao qual está submetida, em função da história geológica do local em estudo. Os sistemas de classificação mais prevalentes e reconhecidos atualmente incluem o RMR (Rock Mass Rating) desenvolvido por Bieniawski (1973) e o sistema Q (*Tunneling Quality Index*) proposto por Barton et al. (1974). Além desses, algumas outras metodologias também costumam ser utilizadas, como o RQD (Rock Quality Designation) proposto por Deere (1963).

Tanto o sistema de classificação de Bieniawski (1973) quanto o Sistema Q de Barton et al. (1974) consideram, entre seus parâmetros geotécnicos, o índice RQD. Outro sistema de classificação de maciços rochosos foi proposto por Wickham et al. (1972). Esses sistemas apresentaram métodos quantitativos para descrever a qualidade do maciço rochoso e determinar um sistema de suporte adequado com base no índice RSR (*Rock Structural Rating*).

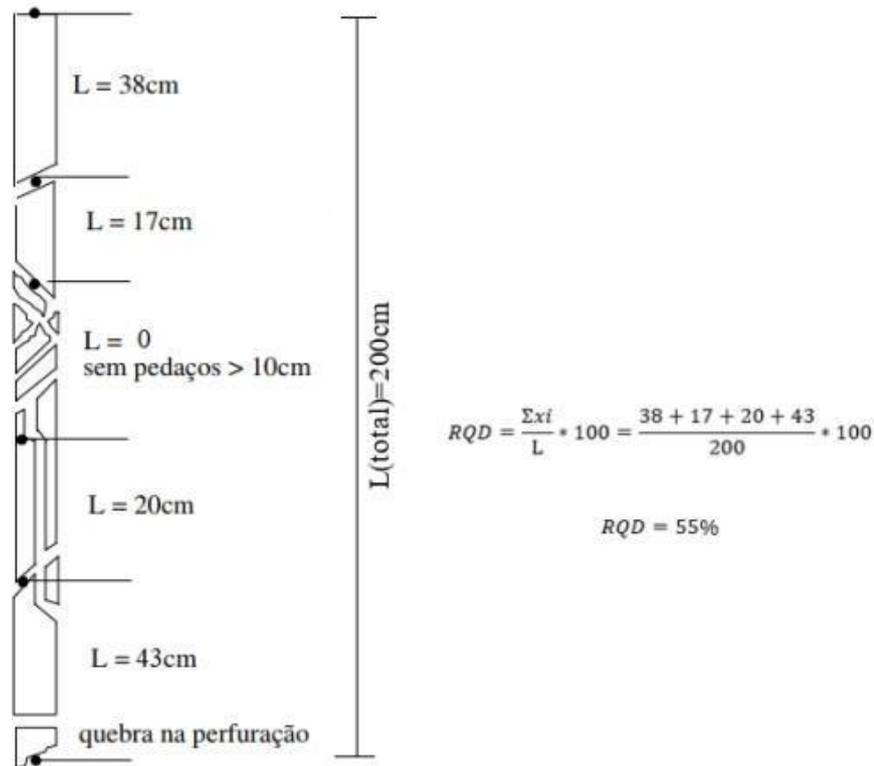
5.2.1 RQD (*Rock Quality Designation*)

O RQD (*Rock Quality Designation*) foi o primeiro índice quantitativo proposto por Deere (1963), e tem como objetivo definir a qualidade de um maciço rochoso através da descrição de testemunhos de sondagem, com base em uma medida indireta das descontinuidades apresentadas. Este método é fundamentado pois quantifica em porcentagem a recuperação de uma amostra de rocha, sendo necessário para aplicação do método apenas as partes do testemunho que apresentem comprimento maior que 10 cm, sendo feito então, o somatório dessas partes e por fim dividindo pelo tamanho total ,(figura7), assim, se obtém o RQD (Mesquita, 2008).

Bieniawski (1974) elaborou um novo sistema de classificação de maciços rochosos, que poderiam ser aplicados em túneis baseando-se em casos históricos de engenharia e sendo um dos parâmetros de entrada o RQD de Deere (1963). Seu cálculo é dado conforme a equação 1 abaixo.

$$RQD = \frac{\sum \text{Porções de rocha com comprimento maior que 10 cm}}{\text{Comprimento total do testemunho}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 7: Exemplo de cálculo RQD



Fonte: Adaptado Hoek *et al.* (1997).

O valor obtido pela equação acima depende da orientação e grau de fraturamento do testemunho de sondagem que pode ser obtido. A tabela 1 define a classificação conforme o intervalo de valores para o RQD.

Tabela 1: Classificação da qualidade do maciço a partir do RQD

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
RQD (%)	Muito ruim	0 - 25
	Ruim	25 - 50
	Regular	50 - 75
	Bom	75 - 90
	Excelente	90 - 100

Fonte: Deere (1989)

5.2.2 RMR (*Rock Mass Rating*)

Sendo um dos métodos mais empregados na classificação de maciços rochosos (Bieniawski, 1989), o sistema *Rock Mass Rating* (RMR) é um sistema fundamentado na utilização de seis parâmetros geológico-geotécnicos, aos quais se atribuem pesos, que posteriormente são somados aritmeticamente para obtenção do índice RMR, que tem variabilidade de 0 a 100. O valor desse índice faz a definição do maciço o dividindo em cinco classes: maciço rochoso muito bom; maciço rochoso bom, maciço rochoso razoável, maciço rochoso fraco e maciço rochoso muito fraco. (Bieniawski, 1989; Souza, 2019; Hoek *et al.* 1995; Vilca *et al.* 2016). Ao longo dos anos o método sofreu alterações visando o refinamento para quantificação do RMR, a partir do surgimento de parâmetros diferentes propostos. Os parâmetros constituintes do índice RMR, são: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, o RQD, espaçamento das descontinuidades, as características das descontinuidades, presença da água subterrânea e orientação das descontinuidades (tabela 2), para ajuste do RMR, resistência à compressão uniaxial da rocha.

Para a aplicação da classificação RMR é necessário que o maciço rochoso seja dividido por domínios em porções homogêneas que tenham características geológicas e estruturais semelhantes. O sistema RMR mais atualizado possui tabelas que atribuem notas aos parâmetros acima listados, assim como correções e guias auxiliares (quadro 1). Após determinação dos valores dos primeiros cinco parâmetros listados anteriormente, estes são somados para a obtenção de um RMR preliminar. Além desse procedimento descrito, há outros parâmetros que são considerados para melhor ajuste de RMR (Quadro 1).

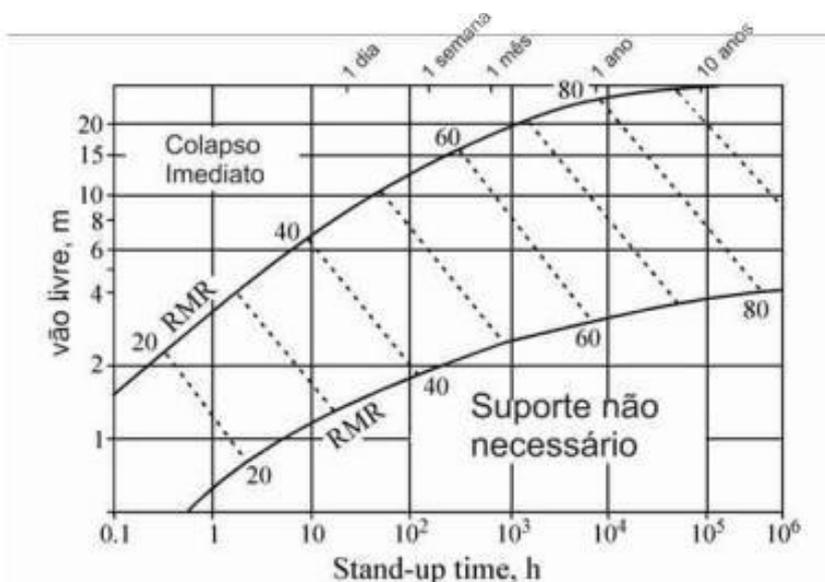
Tabela 2: Sistema de classificação geomecânica RMR

A - Parâmetros de Classificação							
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência a carga pontual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Somente para compressão simples
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25
Peso			15	12	7	4	2 1 0
2	Qualidade do testemunho - RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
		Peso	20	17	13	8	3
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm
		Peso	20	15	10	8	5
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, descontinuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura <1mm, paredes duras	Superfície pouco rugosa, abertura <1mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5mm ou abertura de 1 5mm, contínuas	Preenchimento mole >5mm ou abertura > 5mm, contínuas
		Peso	30	25	20	10	0
5	Água subterrânea:	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
		Pressão da água na fratura/tensão principal	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
		Condições gerais	seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante
Peso			15	10	7	4	0

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Esses parâmetros levam em consideração o objetivo da escavação, túnel, talude, mineração etc. Estes índices podem ser favoráveis ou não à estabilidade da escavação analisada. Além dessa informação é possível estimar alguns parâmetros geomecânicos, como por exemplo, coesão e ângulo de atrito interno. Bieniawski (1989) propôs ainda uma relação entre dimensões de escavações e sua capacidade de se autossustentar no tempo (Figura 8). É a relação entre o tempo de autossustentação e o tamanho do vão da escavação, de acordo com a classificação RMR.

Figura 8: Tempo de autossuporte em função do valor do RMR e do vão livre projetado.



Fonte: Modificado de Bieniawski (1989).

Quadro 1- Correções e guias auxiliares para o sistema de classificação RMR.

B CORREÇÃO POR DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES (ver Tabela F)						
Direção e orientação do mergulho		Muito Favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito Desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
C DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DO MACIÇO ROCHOSO EM FUNÇÃO DO PESO TOTAL						
Peso	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	<21	
Número da classe	I	II	III	IV	V	
Descrição	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo	
D COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO POR CLASSE						
Número da classe	I	II	III	IV	V	
Tempo médio de auto-sustentação / tamanho do vão	20 anos / 15 m	1 ano / 10 m	1 semana / 5 m	10 h / 2,5 m	30 min / 1 m	
Coesão do maciço rochoso (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100	
Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15	
E GUIA PARA A CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES						
Persistência / Comprimento (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20	
Peso	6	4	2	1	0	
Abertura / Espessura (mm)	Nula	<0,1	0,1-1,0	1-5	>5	
Peso	6	5	4	1	0	
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Superfície estriada	
Peso	6	5	3	1	0	
Preenchimento (característica) / Espessura (mm)	Nulo	duro / <5	duro / >5	mole / <5	mole / >5	
Peso	6	4	2	2	0	
Grau de Alteração (Intemperismo)	Inalterada	Levemente alterada	Moderada, alterada	Fortemente alterada	Decomposta	
Peso	6	5	3	1	0	
F EFEITOS DA DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, EM TÚNEIS*						
Direção Perpendicular ao eixo do Túnel			Direção Paralela ao eixo do Túnel			
Ângulo de mergulho 45-90°		Ângulo de mergulho 20-45°		Mergulho 45-90°		
Muito Favorável		Favorável		Mergulho 20-45°		
				Muito Favorável		
Ângulo de mergulho contrário 45-90°		Ângulo de mergulho contrário 20-45°		Mergulho de 0-20° sem relação a direção		
Desfavorável		Muito Desfavorável		Desfavorável		

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

5.2.3 Sistema – Q

Foi desenvolvido por Barton *et al.* (1974) após a observação em diversos túneis, sendo uma forma de classificação através de seis fatores relevantes levando em consideração o índice de qualidade da rocha (RQD), número de famílias de descontinuidades (J_n), mostrado na tabela 3, a rugosidade das descontinuidades (J_r), mostrado na tabela 4, o grau de alteração das descontinuidades (J_a), mostrado na tabela 5, o fator de redução de água (J_w), mostrado na tabela 6 e o estado de tensão no maciço (SRF), mostrado na tabela 7.

O sistema Q de Barton difere do RMR na consideração sobre a influência das orientações das descontinuidades, o fator de resistência da rocha intacta e a inclusão de um parâmetro de tensões (SRF). Em contrapartida os parâmetros J_n , J_r e J_a são parâmetros que determinam o grau de autonomia dos blocos quanto a sua movimentação (Hoek *et al.*, 1995) sendo estes, altamente relevantes para orientação.

Tabela 3: Parâmetros de compartimentação do maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
Condições de compartimentação do maciço (J_n)	Descontinuidades esparsas ou ausentes	0,5 - 1
	Uma família de descontinuidades	2
	Uma família e algumas aleatórias	3
	Duas famílias de descontinuidades	4
	Duas famílias e algumas aleatórias	6
	Três famílias de descontinuidades	9
	Três famílias e algumas aleatórias	12
	Quatro ou mais famílias de descontinuidades	15
	Rocha totalmente diaclasada	20

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 4: Parâmetros de condição de rugosidade

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
Condições de compartimentação do maciço (J_r)	Descontinuidades esparsas ou ausentes	0,5 - 1
	Uma família de descontinuidades	2
	Uma família e algumas aleatórias	3
	Duas famílias de descontinuidades	4
	Duas famílias e algumas aleatórias	6
	Três famílias de descontinuidades	9
	Três famílias e algumas aleatórias	12
	Quatro ou mais famílias de descontinuidades	15
	Rocha totalmente diaclasada	20

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 5: Parâmetros de alteração do maciço.

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
Condições de alteração do maciço	a) Contato entre as paredes de rocha das discontinuidades	
	Paredes duras, compactas com preenchimentos impermeáveis	0,75
	Paredes não alteradas, apenas com leve descoloração	1
	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e	2
	Paredes com partículas siltosas ou arenoargilosas	3
	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de	4
maciço	b) Contato entre as paredes de rocha das discontinuidades antes de 10cm de escorregamento	
(J_a)	Paredes com partículas de areia e de rocha desintegrada, etc.	4
	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado	6
	Descontinuidades com preenchimento argiloso subreconsolidado	8
	Descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo como	8 - 12

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 6: Parâmetros de afluência de água no maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor	
		Valores de (J_w)	Pressão da água (Kg/cm ²)
Condições de afluência de água no maciço (J_w)	A - Escavação a seco ou com pequena afluência de água (<5 litros/m)	1	<1
	B - Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1 - 2,5
	C - Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das juntas	0,5	2,5 - 10
	D - Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das juntas	0,33	2,5 - 10
	E - Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo	0,2 - 0,1	>10
	F - Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,1 - 0,05	>10

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 7: Parâmetros do estado de tensão do maciço (SRF)

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
SRF	a) Zonas alteradas	
	A - Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha	10
	B - Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada	5
	C - Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada	2,5
	D - Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila em	7,5
	E - Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade de	5
	F - Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade de	2,5
	G - Fraturas abertas, fraturamento muito intenso em qualquer profundidade	5
	b) Rocha competente, problemas de tensões de rochas H	
	- Tensões baixas, próximo a superfície ($\sigma_c/\sigma_1 > 200$)	2,5
	Tensões médias ($\sigma_c/\sigma_1 = 200 \alpha 10$)	1
	J - Tensões altas ($\sigma_c/\sigma_1 = 10 \alpha 5$)	0,5 - 2
	K - Explosões moderadas de rocha ($\sigma_c/\sigma_1 = 5 \alpha 2,5$)	5 - 10
	L - Explosões intensas de rochas ($\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$)	10 - 20
	c) Rochas incompetentes (comportamento plástico devido ao tipo das deformações)	
	M - Tensões moderadas	5 - 10
	N - Tensões elevadas	10 - 20
	d) Rochas expansivas (expansão com a presença de água)	
O - Pressão de expansão moderada	5 - 10	
P - Pressão de expansão elevada	10 - 15	

Fonte: Barton *et al.* (1974)

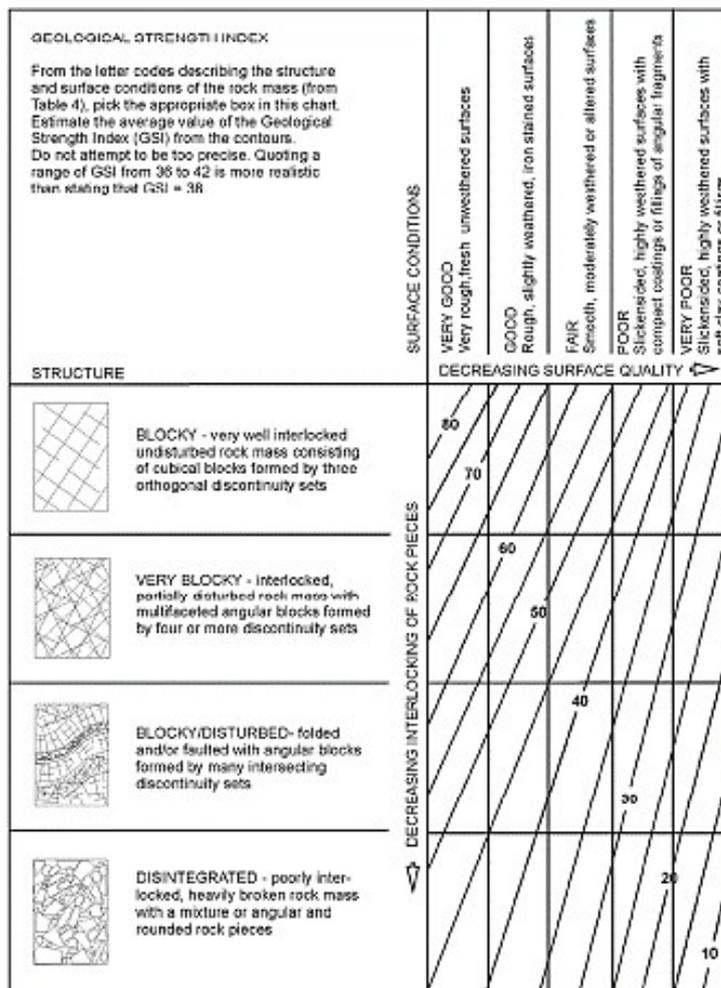
5.2.4 Índice de resistência geológica (GSI)

Segundo Hoek (1998), o Índice de Resistência Geológica (GSI – *Geological Strength Index*), introduzido por Hoek (1994) e Hoek *et al.* (1995), é um sistema que permite uma estimativa de redução da resistência do maciço rochoso para diferentes condições geológicas. Ele leva em consideração basicamente a qualidade da superfície da rocha, em conjunto com a avaliação visual do maciço, sendo usado como entrada direta para a seleção de parâmetros relevantes para a estimativa da resistência dos maciços rochosos (Barbosa, 2008). O GSI foi desenvolvido especificamente para atender a necessidade de confiabilidade para dados de entrada, principalmente aqueles relacionados às propriedades de caracterização dos maciços, para análise numérica, no dimensionamento de projetos para túneis, taludes ou fundações em rochas.

De acordo com Marinos *et al.* (2005), na aquisição dos dados para determinação do GSI varia conforme a fonte de informações (figura 9). Em grandes profundidades (>1.000 m), as discontinuidades se encontram seladas ocasionando pouco significado prático devido aos valores de GSI sempre elevados (Pereira, 2015). Uma exceção é dada quando existe uma perturbação tectônica importante e persistente em grandes profundidades, onde o GSI poderá

ser utilizado com cautela. A classificação não é aplicável quando o maciço possui baixa resistência, sendo dessa forma necessária a obtenção dos parâmetros diretamente do laboratório. O critério de Hoek-Brown trata de maciços isotrópicos, em que a ruptura não segue direções preferenciais impostas pelas descontinuidades.

Figura 9: Estimativa do valor do GSI com base na descrição geológica.



Fonte: Santos (2011)

5.3 Fator de Segurança (FS)

A segurança de um projeto de engenharia é usualmente avaliada através de um fator de segurança (FS), definido como a razão entre a resistência disponível e o carregamento atuante. Segundo Fiori & Carmignani (2009), para um FS igual 1 a resistência ao cisalhamento mobilizada deverá ser igual à tensão cisalhante aplicada, desta forma o fator de segurança poderá ser expresso de acordo com a equação 3:

$$F_s = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento disponível}}{\text{Forças causadoras de falha ou colapso}} \quad (3)$$

A adoção de um valor de FS mínimo admissível para uma determinada obra implica na adoção de um risco calculado ou aceitável, valores de FS maiores que 1 indicam estabilidade, valores de FS menores do que 1 indicam instabilidade, e valores de FS igual a 1 indicam condições limites de estabilidade metaestabilidade (Paz., 2016).

No entanto, deve-se observar que a probabilidade de ocorrência de um deslizamento não é função linear do fator de segurança (Paz, 2016). Segundo Cordova (2016) um fator de segurança com valor >1 , indica que a resistência do material é maior do que as tensões induzidas e um fator <1 , indica que as tensões no material excedem a resistência dele, indicando que o material falharia havendo grandes deformações. O fator de segurança pode ser plotado em curvas de isovalores, onde é possível visualizar facilmente a zona de ruptura ao redor das escavações.

5.4 Critério de Ruptura de Barton

Em tensões normais mais altas, a resistência do material intacto é excedida, resultando em um comportamento de resistência ao cisalhamento que está mais intimamente relacionado com a resistência intacta do material do que com a características de atrito das superfícies (Hoek, Kaiser and Bawden, 1995). O Critério de ruptura de Barton, leva em consideração a interação entre as descontinuidades presentes em um maciço rochoso e os seguintes aspectos:

Resistência à Compressão Normal (C_n): Representa a resistência da descontinuidade à compressão normal. É uma medida da resistência da superfície de falha ao fechamento sob a ação de forças normais.

- Resistência ao Cisalhamento (C_i): Indica a resistência da descontinuidade ao cisalhamento. Reflete a capacidade da superfície de falha de suportar forças tangenciais sem deslizar.
- Condições de Confinamento (s): Representa o estado de confinamento das descontinuidades. Isso inclui fatores como a tensão confinante no maciço rochoso.

O critério de Barton é utilizado para calcular o fator de segurança, considerando a influência de descontinuidades e as condições específicas do maciço rochoso.

- *JRC (Joint Roughness Coefficient)*: Coeficiente de Rugosidade das Descontinuidades, é um parâmetro utilizado para quantificar a rugosidade de uma descontinuidade em um maciço rochoso. O valor do JRC varia de 0 a 20, onde valores mais altos indicam descontinuidades mais rugosas.

- *JCS (Joint Wall Compressive Strength)*: Resistência à compressão das paredes da descontinuidade, representa a resistência da rocha à compressão nas paredes da descontinuidade. Esse parâmetro é importante ao considerar a estabilidade de uma superfície de falha.

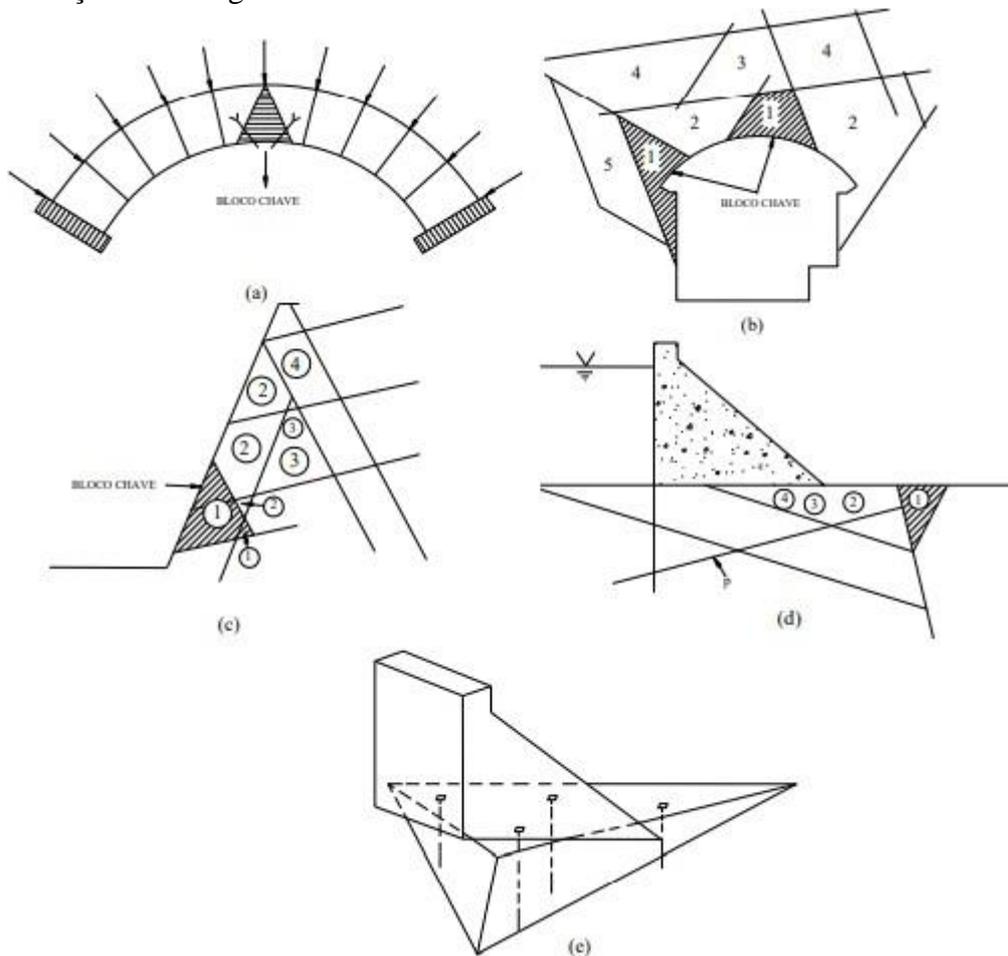
- *Phi b (Effective Angle of Friction)*: Phi b, ou Ângulo efetivo de atrito, é um parâmetro que representa o ângulo de atrito efetivo em uma descontinuidade rochosa. Esse valor é usado para calcular a resistência ao cisalhamento ao longo da descontinuidade. Pode ser utilizado em análises de estabilidade para determinar o potencial de deslizamento ao longo dessas superfícies de falha.

5.5 Estabilidade de escavações subterrâneas

5.5.1 Teoria de blocos-chave

A teoria dos blocos-chave foi desenvolvida por Goodman e Shi (1985) e consiste em determinar blocos que são potencialmente instáveis formados entre os planos das escavações em rochas e as descontinuidades presentes no maciço rochoso (figura 12). A grande vantagem desta teoria é que não é limitada somente às escavações subterrâneas, ou seja, pode ser aplicada a inúmeras obras realizadas em maciços rochosos (figura 10).

Figura 10: Modelos de blocos instáveis: (a) um arco; (b) um túnel; (c) um talude; (d) e (e) fundação de barragem

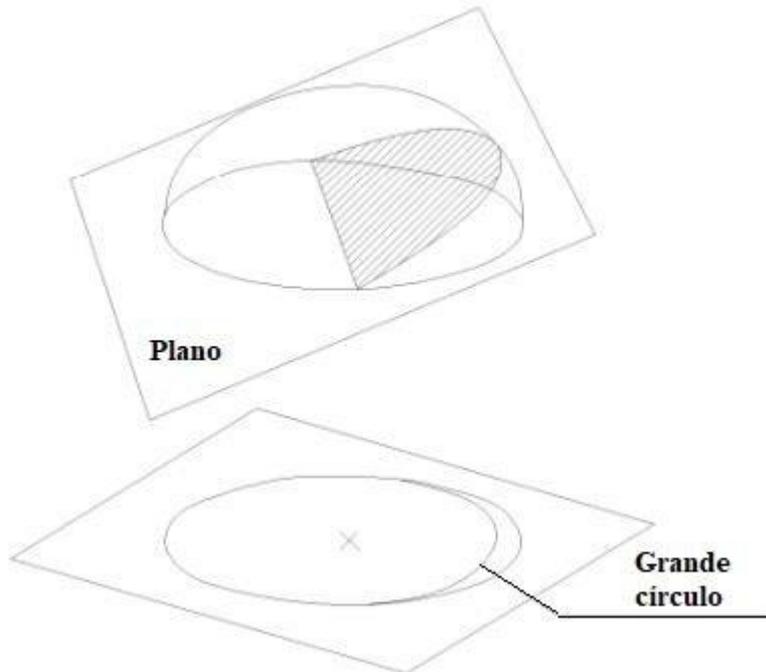


Fonte: (GOODMAN e SHI, 1985)

Para apresentação do modelo gráfico, Goodman e Shi (1985) valeram-se da utilização de projeção estereográfica. Esta ferramenta simplifica as análises espaciais de planos geológicos representando-as no plano bidimensional através de dois parâmetros característicos estruturais geológicos, sendo eles o ângulo de mergulho ou *dip* e a direção do ângulo de mergulho ou *dip direction*. A projeção ciclográfica do modelo dos blocos-chave, diferente do padrão utilizado na geologia estrutural, utiliza o hemisfério superior (figura 11). Logo, a região

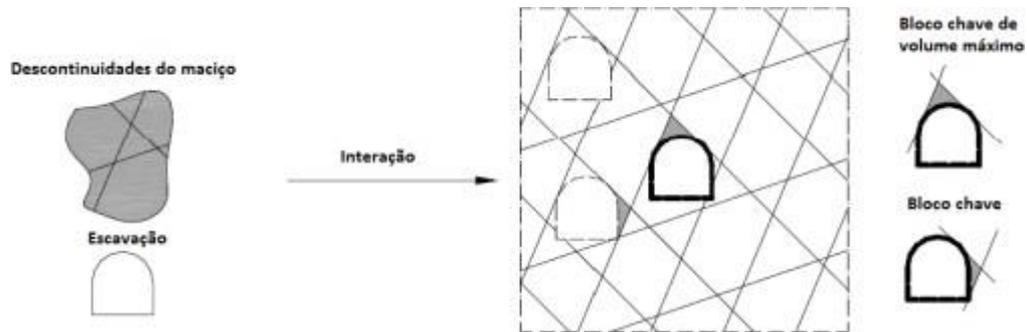
interna ao grande círculo compreende o semiespaço localizado acima do plano representado, e a externa, o semi-espaço.

Figura 11: Representação da projeção estereográfica no hemisfério superior.



Fonte: Hideki (2016).

Figura 12: Representação da formação dos blocos em chave .



Fonte: Lima (2016). Adaptado Gonza'le-Palacio et al. (2005).

5.5.2 Análise cinemática em escavações subterrâneas

Segundo Fiori (2011), a cinemática estuda a movimentação dos corpos, sem fazer, entretanto, referências às forças que causam o movimento permitindo avaliar o potencial de ruptura no maciço rochoso. Para tal, requer-se um conhecimento detalhado da estrutura do maciço e suas discontinuidades, sendo elas, disjunções, falhas, zonas de cisalhamento, foliações, dentre outras. Estas discontinuidades estruturais são, em sua essência, complexas e tridimensionais.

Assim, a representação simplificada destas feições em um plano bidimensional (estereograma) torna-se bastante conveniente e prática na análise cinemática. Uma vez identificado o tipo de ruptura através da projeção hemisférica, a mesma representação pode também ser utilizada para examinar a direção segundo a qual o bloco irá deslizar e dar uma indicação das possíveis condições de estabilidade. Este procedimento é conhecido como análise cinemática (Hoek e Bray, 1981).

O procedimento usual em projetos consiste na utilização da análise cinemática para identificar blocos potencialmente instáveis, seguido de análises numéricas para verificação da estabilidade desses blocos, com obtenção de fatores de segurança.

A análise cinemática para ruptura de cunhas pode ser efetuada de maneira similar ao das rupturas planares. Sendo o polo da linha de intersecção de duas discontinuidades, representado na área de projeção hemisférica e considera-se que o escorregamento é possível se o polo emergir na face do maciço. A análise da direção do escorregamento no caso de cunhas com

possibilidade cinemática de deslizar é mais complexa que a das rupturas planares uma vez que existem dois planos que delimitam a superfície de escorregamento, podendo o deslizamento processar-se simultaneamente sobre os dois planos ou sobre um deles (Hoek e Bray, 1981).

O risco de acidentes gerados por queda de blocos desprendidos dentro de escavações subterrâneas é um dos maiores problemas enfrentados por engenheiros geotécnicos em todo o mundo. Esses blocos são resultado das interseções entre os planos das discontinuidades presentes em um maciço rochoso e com a própria superfície criada pela escavação realizada, sendo de fundamental importância realizar estudos de estabilidade de blocos para que seja possível dimensionar corretamente sistemas de contenção de escavações subterrâneas.

Entre os processos necessários para qualquer avaliação de estabilidade de blocos, está a análise aprofundada do maciço rochoso tendo em vista as estruturas presentes e as escavações feitas. O conhecimento da quantidade e os tipos de discontinuidades presentes, no que se referem suas características como frequência, orientação, persistência é de suma importância. A geometria da escavação realizada e, também, sua orientação são importantes.

O software *Unwedge* da Rocscience é bastante utilizado em estudos e análises de estabilidade de cunhas formadas em escavações subterrâneas em rochas competentes. Esse programa é conveniente pois identifica os blocos críticos formados por interseções entre as discontinuidades e superfície de uma escavação. A base de sua análise e cálculo parte da teoria do equilíbrio limite, onde as forças atuantes, a favor ou não da estabilidade de cunhas, são observadas. O programa ainda fornece uma interface na qual é permitido o estabelecimento dos padrões de contenções. Os blocos passíveis de instabilidade são permitidos a falhar por três modos, são eles: queda, deslizamento por um plano e por dois planos através da linha de interseção de ambos.

O método utilizado pelo *Unwedge* para análise de estabilidade de blocos chave é baseado na teoria que as cunhas se encontram em equilíbrio e se comportam como um corpo rígido prestes a deslizar (Lima, 2016), desta forma, basta analisar as equações para situação limite, partindo da análise do sistema de forças resultantes. As forças ativas, ou seja, aquelas que favorecem a desarticulação do bloco e as forças passivas, aquelas que contribuem para a manutenção da estabilidade do bloco. O método de cálculo presente no *Unwedge*, do fator de segurança dos blocos-chave formados ao redor de uma escavação subterrânea, é definido por vários passos como:

- Determinação da geometria dos blocos através da teoria dos blocos chave;

- Determinação de todas as forças atuantes no bloco, caracterizando as forças ativas e passivas;
- Determinação da direção de deslizamento do bloco;
- Cálculo das forças resistivas devido à resistência ao cisalhamento das juntas e à resistência de tração;
- Cálculo do fator de segurança.

Feita a determinação da geometria dos blocos-chave, o programa determina algumas propriedades do bloco como: volume, áreas das faces e os vetores normais para cada plano da cunha. Com a determinação dos vetores de forças ativas e passivas, o programa promove a somatória de tais forças para obtenção das forças resultantes, sendo o vetor força resultante ativa calculado através da equação 4.

$$A_t = W + D + X + U + E$$

(4)

- A_t = Vetor força resultante ativa
- W = Vetor peso do bloco
- D = Vetor peso do concreto projetado sobre o bloco
- X = Vetor pressão ativa
- U = Vetor força da água
- \bar{E} = Vetor força sísmica

Já o vetor força resultante passiva é determinado através da força resultante passiva que é dada pela soma das forças proveniente dos sistemas de contenção aplicada e pressão passiva, equação 5.

$$P = H + Y + T \tag{5}$$

- P = Vetor força resultante passiva
- H = Vetor resistência cisalhante do concreto projetado
- Y = Vetor pressão passiva
- T = Vetor força proveniente da aplicação de tirante, Swellex etc.

5.5.3 Dimensionamento de suportes e contenção

De acordo com Moebes e Stateham (1986), as irregularidades no campo de tensões têm o potencial de desencadear instabilidade no teto imediato, devido à presença de forças horizontais excessivas no maciço, que se manifestam mesmo antes do início da escavação. Essas anomalias podem originar-se de várias fontes, incluindo fatores tectônicos, conhecidos como tensões regionais, ou serem influenciadas pela topografia da superfície.

Molinda (1993), definiu que as variações na espessura das camadas de rochas podem impedir que os suportes alcancem a camada alvo de ancoragem. Isso, por sua vez, pode resultar na redução da qualidade do pacote do teto imediato, causando potenciais problemas de instabilidade. As fraturas denominadas genericamente são descontinuidades que estão presentes no maciço rochoso e que podem ter gêneses diversas. Estruturas responsáveis pela formação de planos de quebra no maciço rochoso, gerando assim, uma nova distribuição das tensões, o dimensionamento correto de suporte e sustentação visa garantir um equilíbrio entre as tensões (Unal, 1983), a fim de torná-lo competente e estável.

Há vários tipos de suporte e contenção determinados a partir das características do maciço sejam elas não só composicionais, mas estruturais (tabela 9). Como exemplo, os parafusos de teto segundo Robert & Duvall (1967) tem como principal função o reforço e suporte de blocos de rochas parcialmente soltos (figura 13), estratos finamente laminados ou rochas incompetentes sujeitas à queda sob a ação da gravidade, mantendo dessa forma a estabilidade da abertura escavada.

Tabela 8: Tipos de mecanismo de suporte.

Mecanismos de Suporte	
Autosuporte	Quando o teto imediato é composto por rochas maciças e os níveis baixos de tensões, o maciço pode ser considerado competente e tem a capacidade de autosuporte
Efeito suspensão	O mecanismo de suporte por efeito suspensão é aplicado onde a camada inferior, mais fraca, é suspensa em uma camada rígida, formando uma única camada de maior competência.
Efeito viga	O efeito viga é utilizado quando o teto imediato é formado por sequência litológica onde não há presença de camadas competentes, o suporte tem a função de “grampear” os blocos ou estratos, criando uma viga.
Suporte adicional	Em casos em que o maciço é composto por rochas extremamente fracas ou possui elevado estado de tensões, somente os parafusos podem ser insuficientes para estabilizar o teto, sendo necessário o uso de cabos ou suportes passivos.

Fonte: Autor (2022).

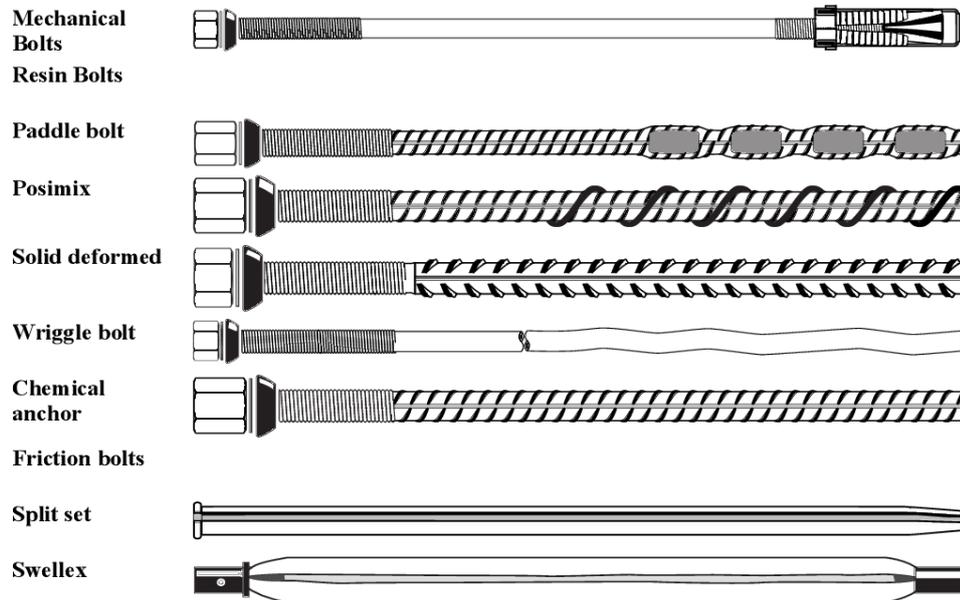
5.5.4 Tirantes

Vários tipos de tirantes utilizados para o suporte em galerias, e a escolha depende das condições geotécnicas específicas do local, têm sido usados há muitos anos para suporte para escavações subterrâneas e uma ampla de tipos foram desenvolvidos para atender às diferentes necessidades que surgem na mineração e na engenharia civil. (Hoek, *et al*, 1995) sendo eles :

- Tirantes com Injeção de *Grout*: Envolvem a injeção de uma mistura de cimento (*grout*) no solo ao redor da galeria para consolidar o maciço.
- Tirantes Autoperfurantes (Sistema SMI): Tirantes que podem ser instalados de forma autoperfurante, sem a necessidade de pré-furação.
- Tirantes de Fibra de Vidro ou Carbono: Utilizam materiais compostos, como fibra de vidro ou carbono, para proporcionar resistência ao tirante.
- Tirantes de Alta Resistência (Barra de Alta Resistência): Barras de aço de alta resistência que fornecem maior capacidade de carga.
- Tirantes Gravitacionais: Utilizam o peso do solo ou rocha como ancoragem, sendo ancorados em camadas mais profundas.

- Tirantes com Ancoragem em Ressalto (*Rock Bolts*): Tirantes ancorados na rocha por meio de ressaltos ou chumbadores.

Figura 13: Tipos de parafusos usados em suporte.

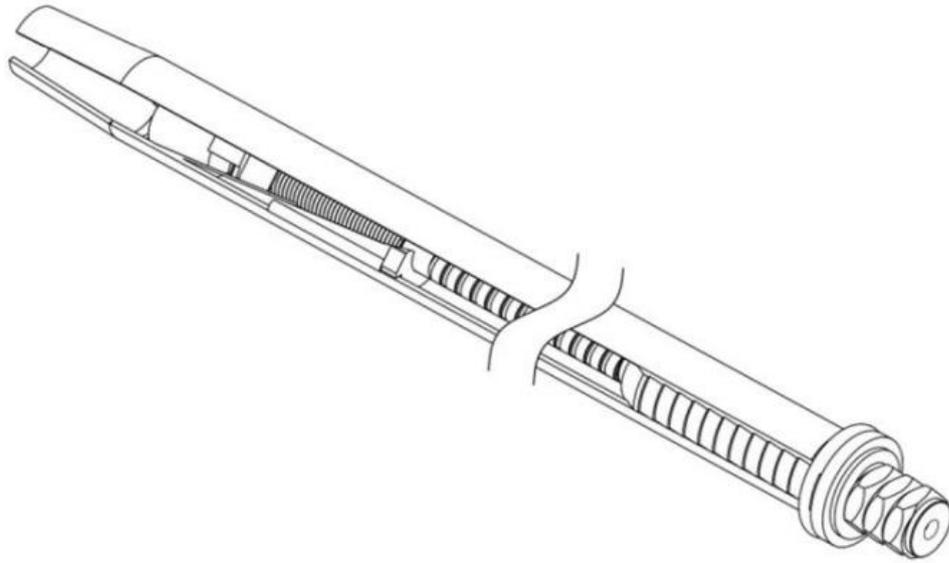


Fonte: Nicholson (2016).

O Parafuso Mechanical Dynamic (MD), criado em 2009, revelou-se altamente eficaz no suporte a inovações e detalhes de terrenos (Darlington et al., 2018). Conforme destacado por Darlington et al. (2018), o parafuso MD é constituído por um tubo de parafuso de fricção convencional que abriga uma âncora mecânica, formando assim um parafuso de alta capacidade de passagem única (figura 14). Atualmente, esse parafuso é explorado com sucesso em diversas minas subterrâneas, especialmente em situações em que a instalação de parafusos de resina ou grauteados é dificultada devido a um solo altamente pobre ou fraturado.

O MD é um parafuso simples, de passagem única e de alta capacidade, destinado a estratos de baixa qualidade ou altamente fraturados, nos quais parafusos de resina ou grauteados enfrentam desafios durante a instalação, sendo vantajosa a sua utilização devido a rapidez em sua instalação. O parafuso MD é composto por um tubo de parafuso de fricção com 47 mm de diâmetro, contendo uma barra de reforço interna e um conjunto de cunha na extremidade do parafuso (figura 14). Durante a instalação, o conjunto de cunha é acionado para fornecer um ponto de ancoragem, elevando significativamente a capacidade de carregamento do parafuso.

Figura 14: Parafuso MD Bolt.

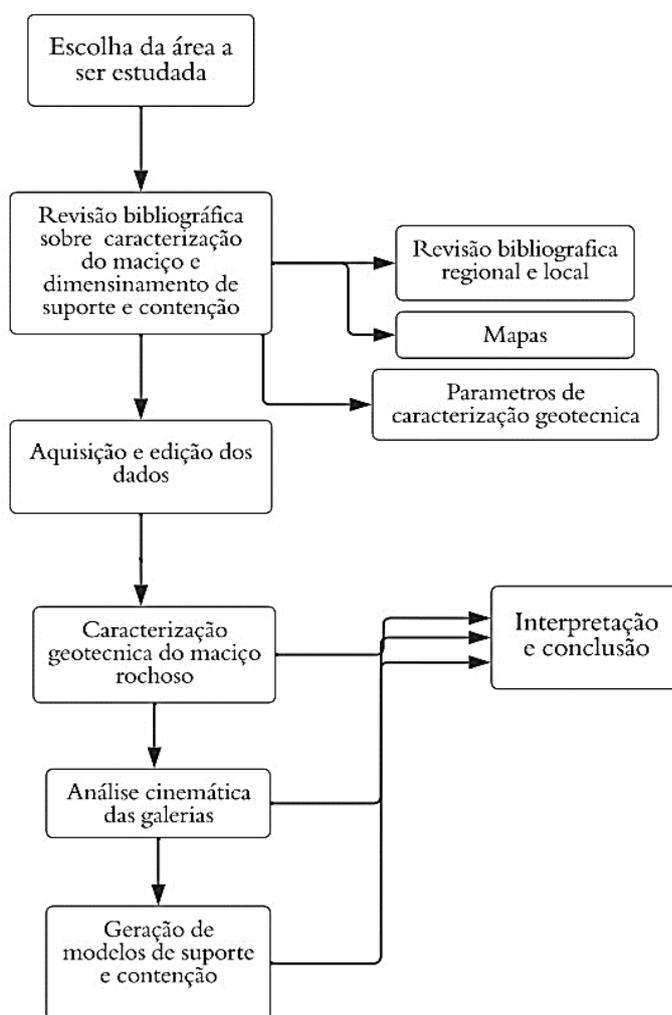


Fonte: Darlington et al. (2018).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve e detalha as etapas necessárias para atingir os objetivos propostos neste estudo. Durante esta etapa, foi realizado um apanhado de bibliografias que incluíssem estudos realizados com o escopo semelhante ao deste trabalho, como a caracterização e classificação de maciços rochosos, elaboração de modelos geológicos e geotécnicos tridimensionais, mecanismos de ruptura em cunha, além da revisão do contexto geológico regional e local da área de estudo.

Figura 15: Fluxograma das etapas do presente trabalho.



Fonte: Autor (2023).

O estudo contou com a escolha e delimitação da área de estudo via *GoogleEarth Pro*. O local foi analisado, através da disponibilidade de dados preexistentes, como mapas

temáticos, e ensaios laboratoriais. O sensoriamento remoto, através do software de SIG gratuito escolhido, para a geração dos mapas foi o *QGIS 3.16*, para elaboração dos mapas de localização, situação e ajustes de mapas geológicos da área, tendo uma interface gráfica intuitiva, extensões de arquivos compatíveis com outras plataformas, contando com ferramentas de edição e análise, entre outras funcionalidades.

A revisão bibliográfica sobre a temática da importância bem como metodologias de classificação geotécnica e dimensionamento de suporte e contenção. Exemplos de metodologia para a caracterização do maciço foi baseada no trabalho de Hoek (1977) e na busca de uma complementação e aprimoramento do estudo, alguns autores foram essenciais na pesquisa como, Sartori (2015), Pinotti (2013), Christofolletti (2014), Cordova (2016), entre outros.

Após isso, a etapa seguinte se caracterizou pela aquisição dos dados cedidos pela mineradora, dando início as classificações da área de estudo, contendo a descrição de qualidade das descontinuidades e suas orientações, para a análise cinemática processada pelo *Unwedge*. Após, ocorre a etapa da integração desses dados com a utilização do software *Unwedge* que é bastante utilizado em estudos e análises de estabilidade de cunhas formadas em escavações subterrâneas em rochas competentes. Esse programa é conveniente para identificar blocos críticos formados por intercessões entre as descontinuidades e superfície de uma escavação, podendo identificar blocos com máximo potencial de queda permitindo ainda informações para melhor interpretação do nível de estabilidade do bloco potencialmente instável, baseado em um fator de segurança no valor de 1,2 estabelecido de acordo com as características e necessidades da área.

Por fim, a última etapa de dimensionamento dos suportes na mineração, consiste na análise dos blocos gerados visando otimizações quanto aos tipos e quantidades de elementos de suporte necessários. Assim, os objetivos da presente pesquisa foram cumpridos, utilizando os dados cedidos, somado à análise que integrou parâmetros de classificação geomecânicas.

Logo os materiais utilizados neste trabalho foram, tabelas de parâmetros para classificação geomecânica, dados da área, os softwares de sensoriamento remoto, como o *Google Earth* e *Qgis 3.16* para a construção dos mapas de localização e situação e o software *Unwedge-Rocscience®* para gerar modelos em 3D dos blocos e modelos de suporte, feitos no Laboratório de Mecânica das Rochas (UFRGS) .

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte, será mostrada a análise que foi realizada e suas interpretações, bem como os modelos gerados, que por fim as considerações desses dados, em conjunto para estabelecer uma melhor interpretação sobre a otimização sugerida para os suportes preexistentes e futuramente aplicados.

Os resultados refletem a análise abrangente realizada com base nos dados fornecidos pela empresa parceira. A investigação concentrou-se em duas dimensões principais de galerias: as temporárias (*oredrives*) com seções de 4,5m (largura) x 4,8m (altura) e as permanentes (rampas de acesso e travessa de ventilação) com dimensões de 5m (largura) x 6m (altura). Para as galerias temporárias, o suporte adotado foi composto por *split-sets* de 2,40m (comprimento) x 47mm (diâmetro), com um espaçamento de 1,5m x 1,5m (malha quadrada) e um total de 9 *split-sets* por linha. Em contraste, para as galerias permanentes, foram utilizados tirantes resinados e MD Bolts, ambos com a mesma quantidade de 9 tirantes por linha, conforme ilustrado na figura 15. Devido as características semelhantes MD Bolt e tirantes resinados (figura 27), o trabalho analisou as condições geradas a partir do uso do MD Bolt. A obtenção de informações detalhadas sobre as descontinuidades, tabela 10, revelou-se crucial.

O software empregado baseia-se nas informações de entrada para criar combinações conjuntas que geram blocos e avaliam como eles interagem com as galerias tendo em vista que ele utiliza algoritmos para dividir o maciço rochoso em blocos com base nas descontinuidades fornecidas. Esses blocos representam os potenciais cunhas suscetíveis a deslizamentos envolvendo também a comparação das forças de cisalhamento e resistências disponíveis. Foram gerados os modelos preexistentes, com a galeria temporária com *trend* de 325° (figura 17) e para as galerias permanentes, foi considerada uma variação de direção em 8 direções de 22.5° cada uma e um *plunge* fixo de 7°.

Tabela 9: Propriedades utilizadas

		Propriedades		
		Foliação	Familia-J1	Familia2- J2
Barton- Bandis	JRC	2	1.5	2
	JCS/	600	502.8	740.5
	Phi r (°)	35	30	35

Fonte: Autor (2023)

Tabela 10: Informações das descontinuidades

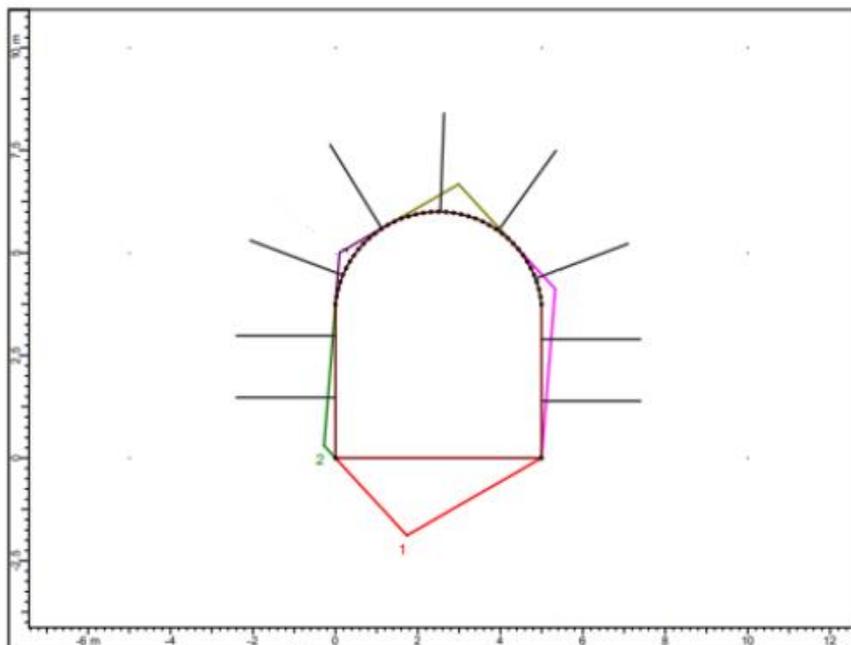
Descontinuidades		
	Dip	Dip direction
Foliação	36	235
Família J1	80	90
Família J2	60	350

Fonte: Autor (2023).

Os parâmetros de Barton-Bandis, como JRC (*Joint Roughness Coefficient*), JCS (*Joint Wall Compressive Strength*), e PHI_r (*Residual Friction Angle*), caracterizam as propriedades das descontinuidades em rochas. Quando aplicados ao *UnWedge*, esses parâmetros desempenham um papel crucial, na avaliação da formação e atuação dos blocos (tabela 9).

O JRC (*Joint Roughness Coefficient*) relaciona a resistência da superfície de descontinuidade ao escorregamento. Uma superfície mais rugosa terá um JRC maior, afetando diretamente a estabilidade dos blocos e a possibilidade de falhas. Já o JCS (*Joint Wall Compressive Strength*) avalia a resistência à compressão das descontinuidades. Por fim o PHI_r (*Residual Friction Angle*), avalia o atrito residual nas descontinuidades, influenciando a estabilidade do maciço rochoso. Um valor mais elevado de PHI_r indica uma maior resistência ao escorregamento.

Figura 16: Modelo de galeria de permanente (rampa). Sem a adição de suporte pontual.

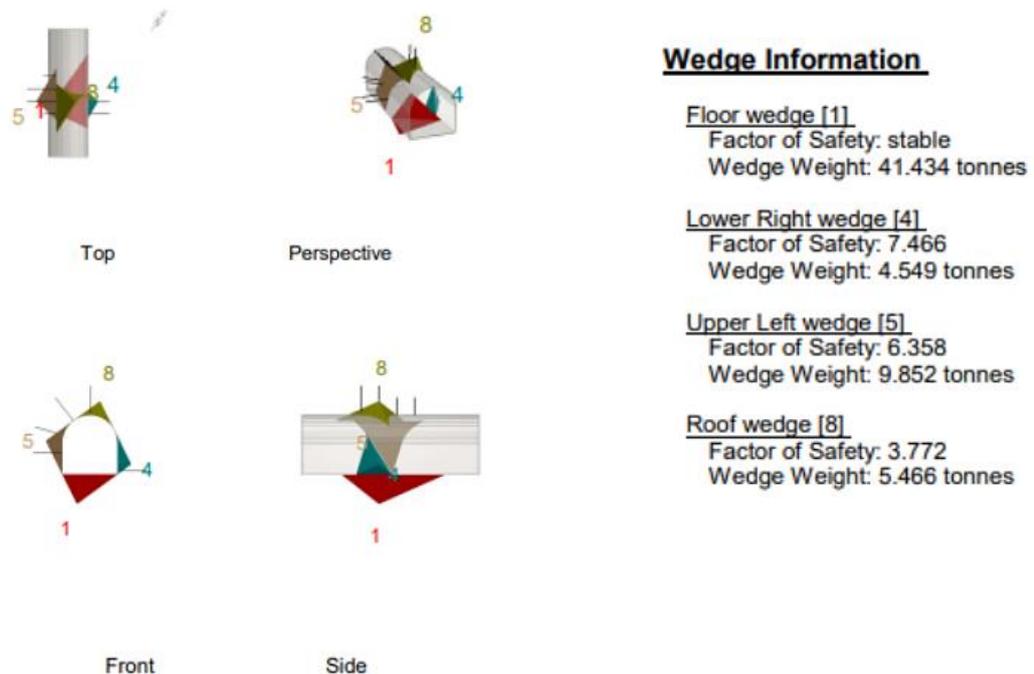


Fonte: Autor (2023).

A qualidade das informações sobre descontinuidades (tabela10) foi fundamental para a precisão e confiabilidade da modelagem realizada. A influência das descontinuidades, sejam elas fraturas ou foliações, foram levados em conta na simulação, identificando os planos de deslizamento. Com base nas características das descontinuidades. O software, permitiu o cálculo do FS conforme a direção de galeria analisada.

7.1 Geração de blocos e interação com os suportes

Figura 17: Blocos galeria temporária Trend 325° sem a geração de nenhum bloco crítico .



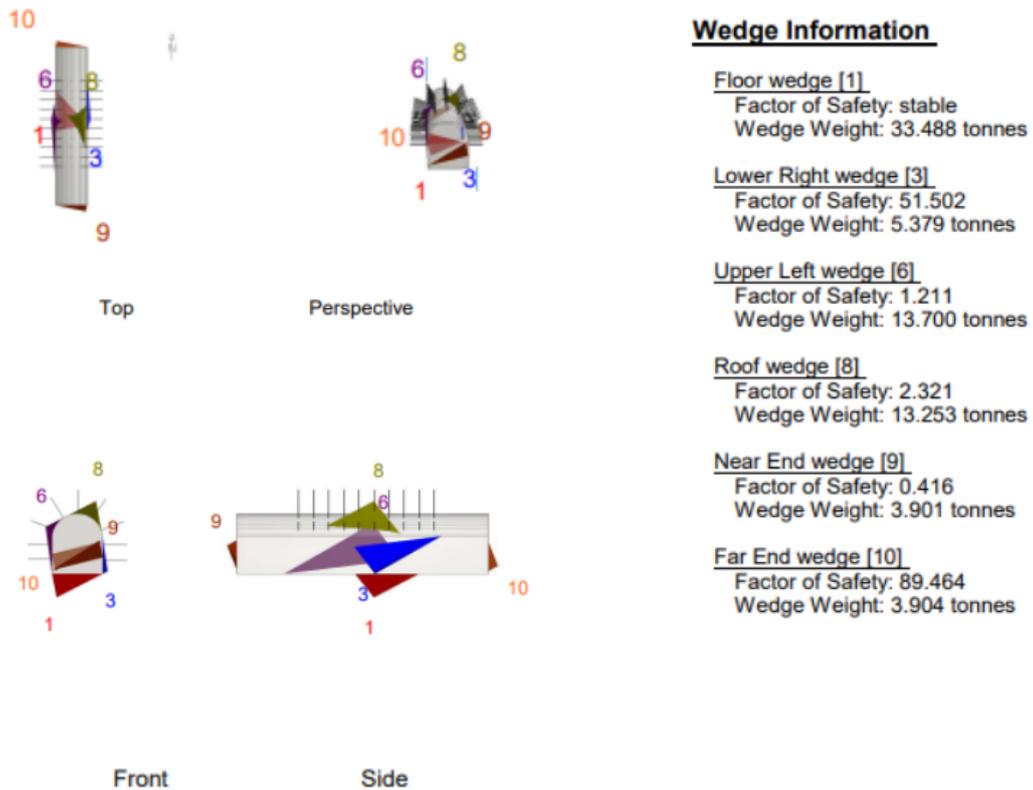
Fonte: Autor(2023).

A figura 16 demonstra o primeiro resultado com os dados das descontinuidades contidos na tabela 10 para a galeria temporária. Todos os blocos gerados tiveram um fator de segurança acima do que utilizado pela empresa, não se verificando necessária a mudança ou adição além do suporte já existente.

Para a direção 0° com *plunge* fixo 7°, foram identificados dois blocos críticos, 6 e 9 com fatores de segurança de 1,21 no bloco 6 e 0,42 no bloco 9 (figura 18), foi ajustada a angulação, espaçamento e disposição dos parafusos existentes e adicionado uma linha pontual no 6. Mesmo

com um fator tão baixo, a disposição espacial do bloco 9 não é preocupante, pois o bloco é formado nas faces somente.

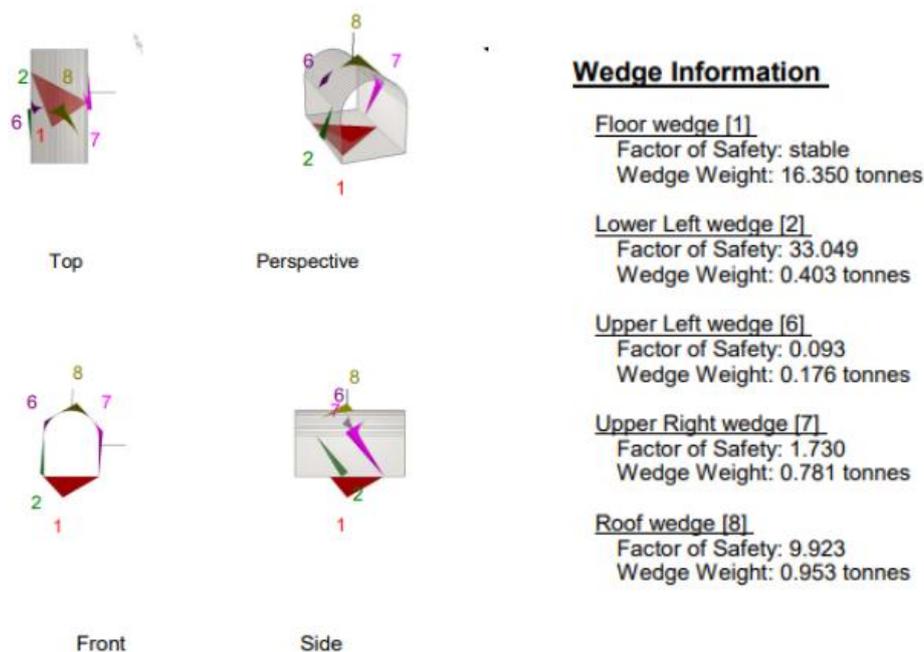
Figura 18: Blocos galeria Permanente 0°, com a geração de dois blocos críticos indicados.



Fonte: Autor (2023).

Para a direção 22.5° com *plunge* fixo 7°, foram identificados 1 bloco crítico. A identificação destes, notadamente o bloco 6, apresentou fator de segurança muito baixo, registrando 0.093 (figura 19). No bloco 6, a estratégia adotada foi a adição de uma linha de suporte, mantendo o espaçamento pré-existente de 1,5m. A manutenção do espaçamento original visou minimizar a interferência no layout pré-estabelecido da galeria, enquanto a adição da linha de suporte procurou reforçar a integridade estrutural do bloco 6. A implementação dessa solução demandou considerações precisas sobre a resistência e eficácia do suporte adicionado (figura 28), levando em conta a interação complexa entre as características geotécnicas do maciço rochoso e as condições específicas.

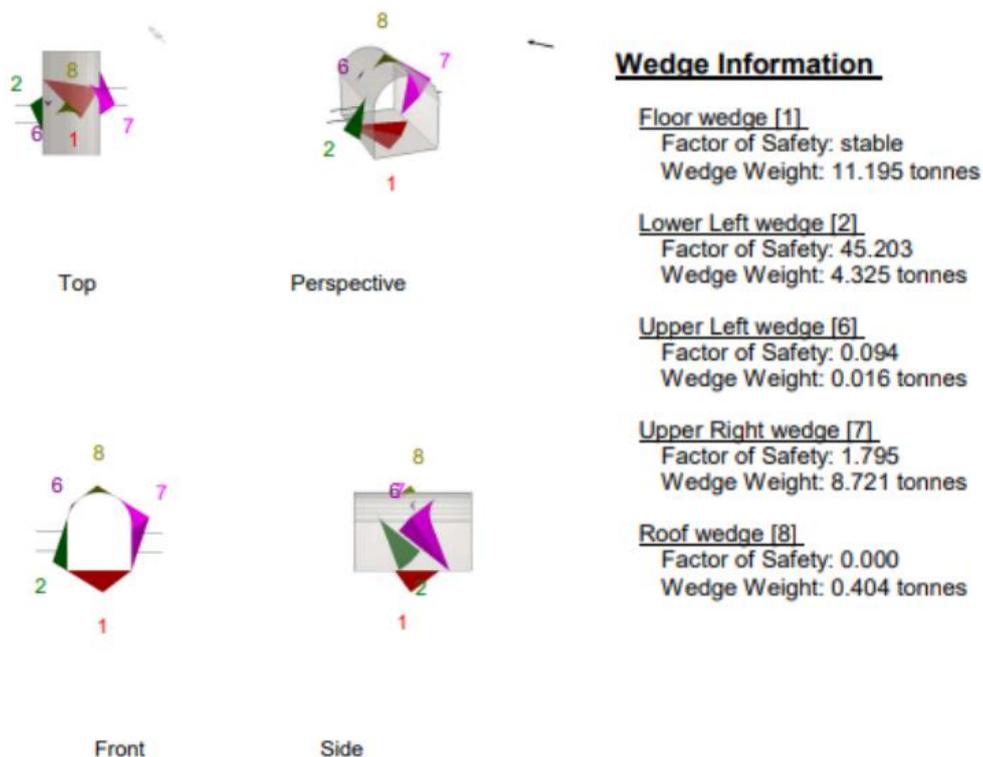
Figura 19: Blocos galeria permanente 22.5° com geração de um bloco crítico



Fonte: Autor (2023).

Na orientação de 45°, dois blocos críticos foram identificados, sendo o bloco 6 e o bloco 8, conforme ilustrado na figura 20. O bloco 6 apresentou um fator de segurança de 0.094, enquanto o bloco 8 registrou um valor alarmante de 0.000. Ao buscar uma solução para melhorar a estabilidade do bloco 6, observou-se que, apesar de seu fator indicar um possível colapso iminente, o bloco tinha um tamanho relativamente pequeno com peso de 16kg. Isso sugere que a abordagem mais eficaz seria a derrubada do bloco, eliminando a necessidade da aplicação de um suporte adicional. Por outro lado, para o bloco 8, posicionado no teto da galeria, a solução proposta foi a adição de uma linha pontual. Essa intervenção resultou em um aumento significativo no fator de segurança, alcançando 21.440, em um bloco com aproximadamente 400kg. Essa estratégia revelou-se eficaz em sua estabilização, demonstrando a importância de abordagens específicas e adaptadas para cada cenário geotécnico único.

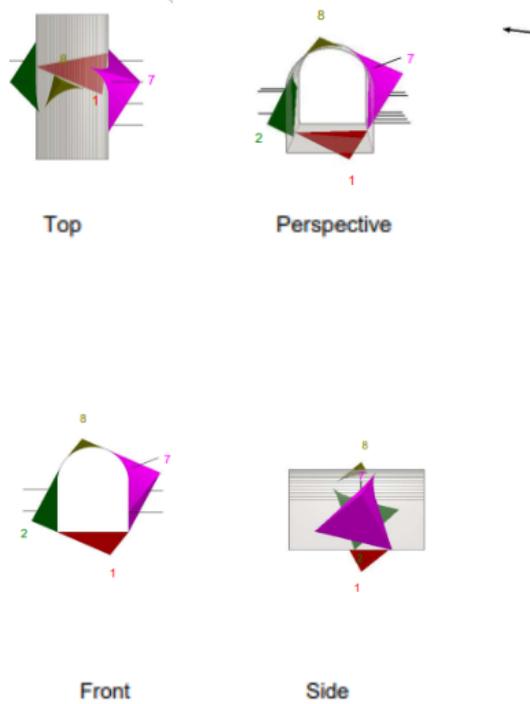
Figura 20: Blocos galeria permanente 45° com geração de dois blocos críticos.



Fonte: Autor (2023).

Na direção de 67.5 graus, dentre os blocos gerados, o bloco 8 revelou-se crítico (figura 21). Localizado no teto da galeria, este bloco exibiu um FS de 0.000, indicando um iminente colapso sem qualquer capacidade intrínseca de um autossuporte. Como medida corretiva, a solução indicada envolve a inserção pontual de uma linha de suporte do tipo Md Bolt, assumindo um FS superior a 10. Essa intervenção demonstra uma melhoria significativa na estabilidade do bloco 8, evidenciando a eficácia da estratégia adotada.

Figura 21: Blocos galeria permanente 67.5° com geração de um bloco crítico.



Wedge Information

Floor wedge [1]
 Factor of Safety: stable
 Wedge Weight: 10.263 tonnes

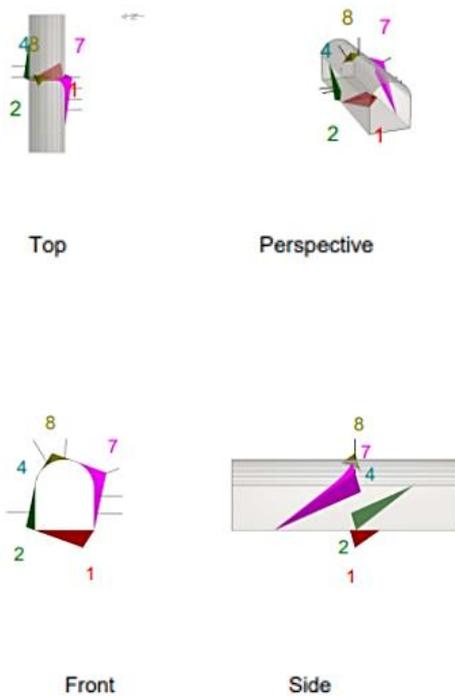
Lower Left wedge [2]
 Factor of Safety: 42.408
 Wedge Weight: 14.308 tonnes

Lower Right wedge [7]
 Factor of Safety: 2.333
 Wedge Weight: 27.896 tonnes

Roof wedge [8]
 Factor of Safety: 0.000
 Wedge Weight: 0.861 tonnes

Fonte: Autor (2023).

Figura 22: Blocos galeria permanente 90° sem geração de blocos críticos



Wedge Information

Floor wedge [1]
 Factor of Safety: stable
 Wedge Weight: 8.541 tonnes

Lower Left wedge [2]
 Factor of Safety: 116.403
 Wedge Weight: 2.973 tonnes

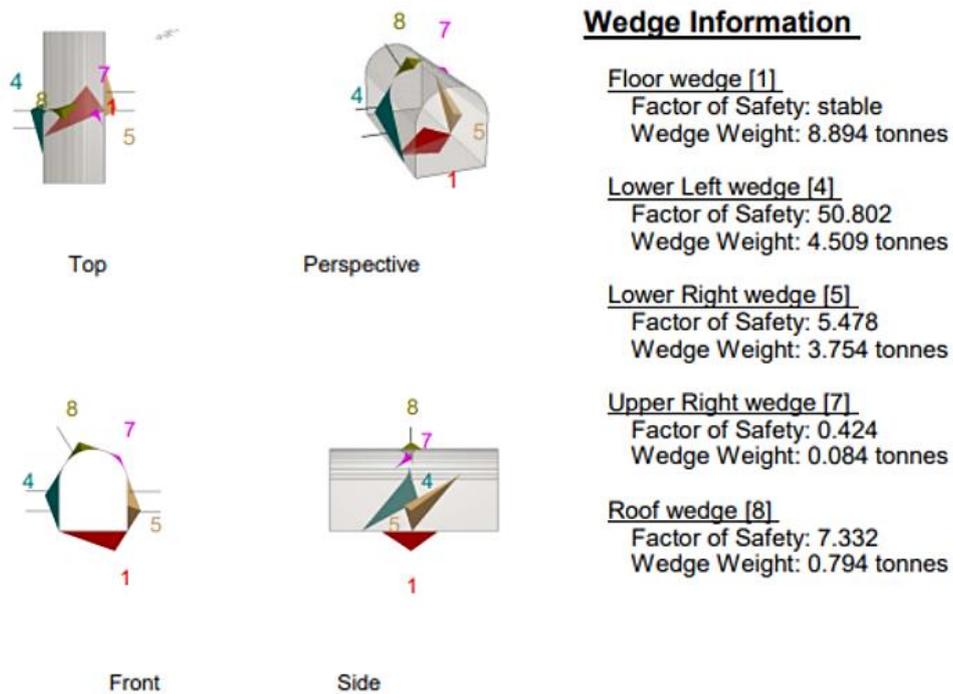
Upper Left wedge [4]
 Factor of Safety: 380.952
 Wedge Weight: 0.002 tonnes

Upper Right wedge [7]
 Factor of Safety: 4.238
 Wedge Weight: 8.610 tonnes

Roof wedge [8]
 Factor of Safety: 11.629
 Wedge Weight: 0.962 tonnes

Fonte: Autor (2023).

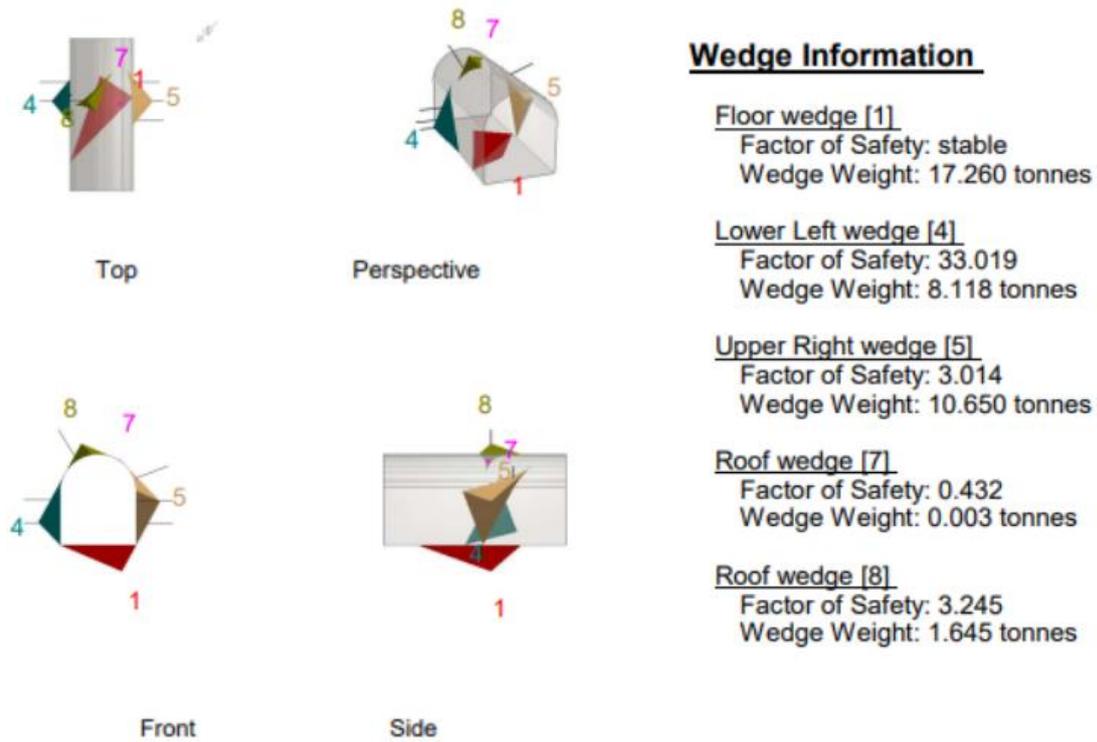
Figura 23: Blocos galeria permanente 112.5° com geração de um bloco crítico



Fonte: Autor (2023).

Foi necessário adicionar uma linha pontual à galeria permanente com orientação de 112.5° após a identificação de um bloco crítico 7 (figura 23). Inicialmente, o fator de segurança desse bloco era de 0.424, e após a implementação dos suportes, o valor do fato de segurança aumentou para mais de 90. O espaçamento entre os suportes permaneceu inalterado, mantendo-se em 1.5 metros.

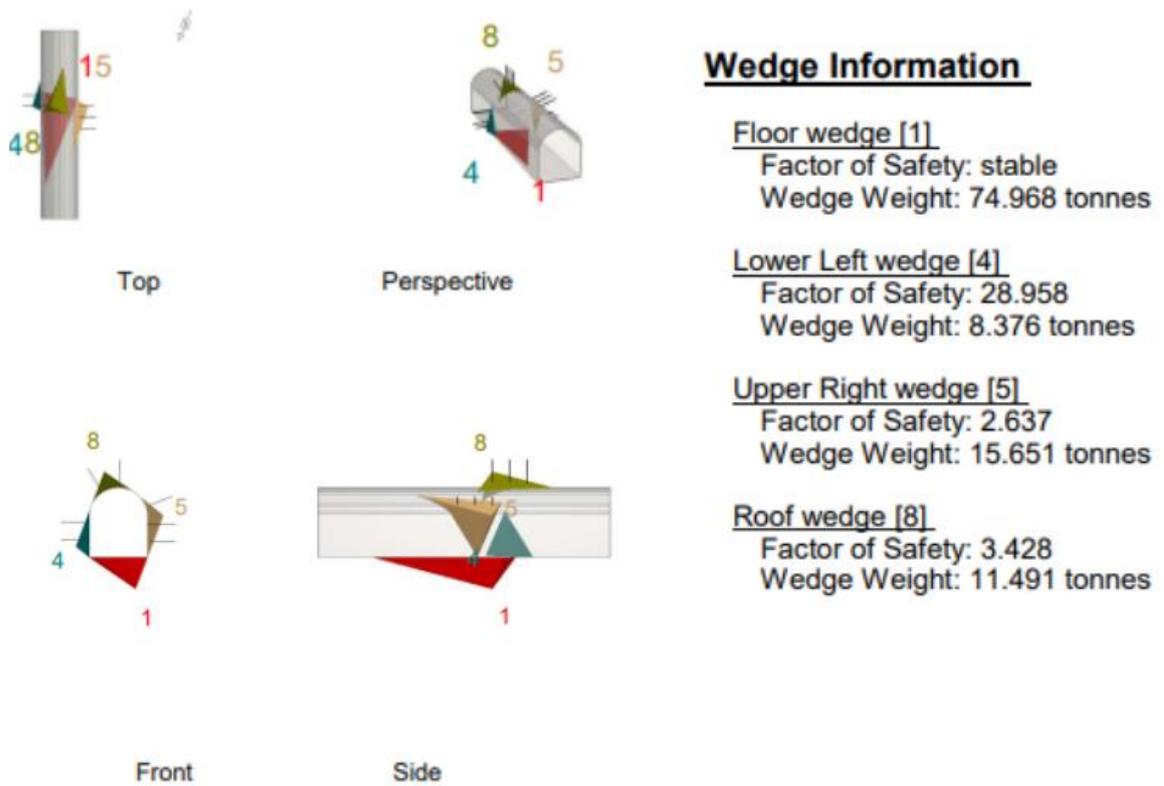
Figura 24: Blocos galeria permanente 135° com geração de um bloco crítico



Fonte: Autor (2023).

Apesar de ter sido identificado um bloco crítico com o número 7 na direção 135° (figura 24) no teto da galeria, este bloco não oferece nenhum risco, levando em consideração que o bloco em questão possui apenas 3kg de peso, ou seja, deverá ser derrubado naturalmente durante o desmonte da galeria, ou no abatimento de choco.

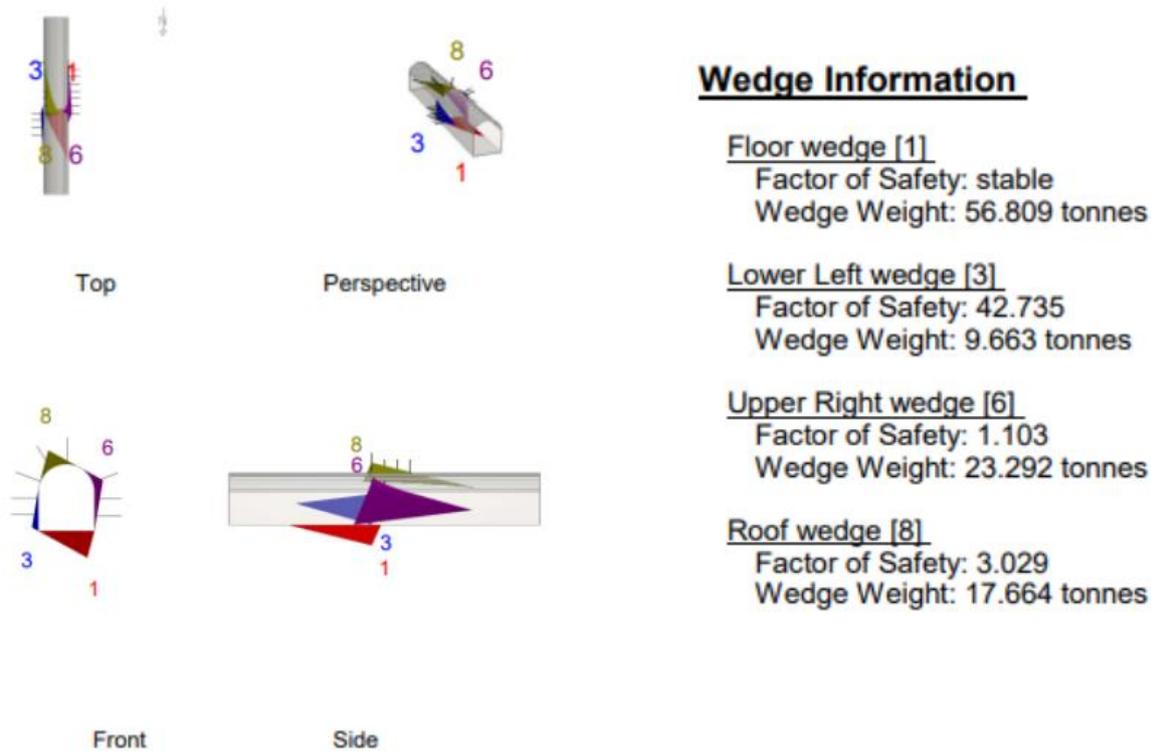
Figura 25: Blocos galeria permanente 157.5° sem geração de blocos críticos



Fonte: Autor (2023).

No caso da direção 180, que é um espelhamento da direção 0, sugere-se a aplicação das mesmas medidas adotadas anteriormente (figura 18).

Figura 26: Blocos galeria permanente 180° com geração de dois blocos críticos



Fonte: Autor (2023).

Ao analisar as direções, identificaram-se sete direções críticas que demandavam suporte pontual adicional (tabela 11) de forma a aumentar o fator de segurança. Sendo aplicado o parafuso MD-Bolt, uma vez que a empresa está fazendo a substituição dos modelos anteriormente usados.

Tabela 11: Blocos críticos gerados

Direções	N dos blocos Críticos	Peso	Obs
0°	6 - 9	Bloco 6 - 13700kg Bloco 9 - 39010kg	
22.5°	6	Bloco 6 - 176kg	
45°	6 - 8	Bloco 6 - 16kg Bloco 8 - 404kg	6 (Bloco pequeno 16kg)
67.5°	8	Bloco 8 - 86100kg	
90°	Não contém	-	
112.5°	7	Bloco 7 - 84kg	
135°	7	Bloco 7 - 3kg	7 (Bloco pequeno 3kg)
157.5°	Não contém	-	
180°	6 - 9	Bloco 6 - 23292kg Bloco 9 - 39010kg	

Fonte: Autor (2023).

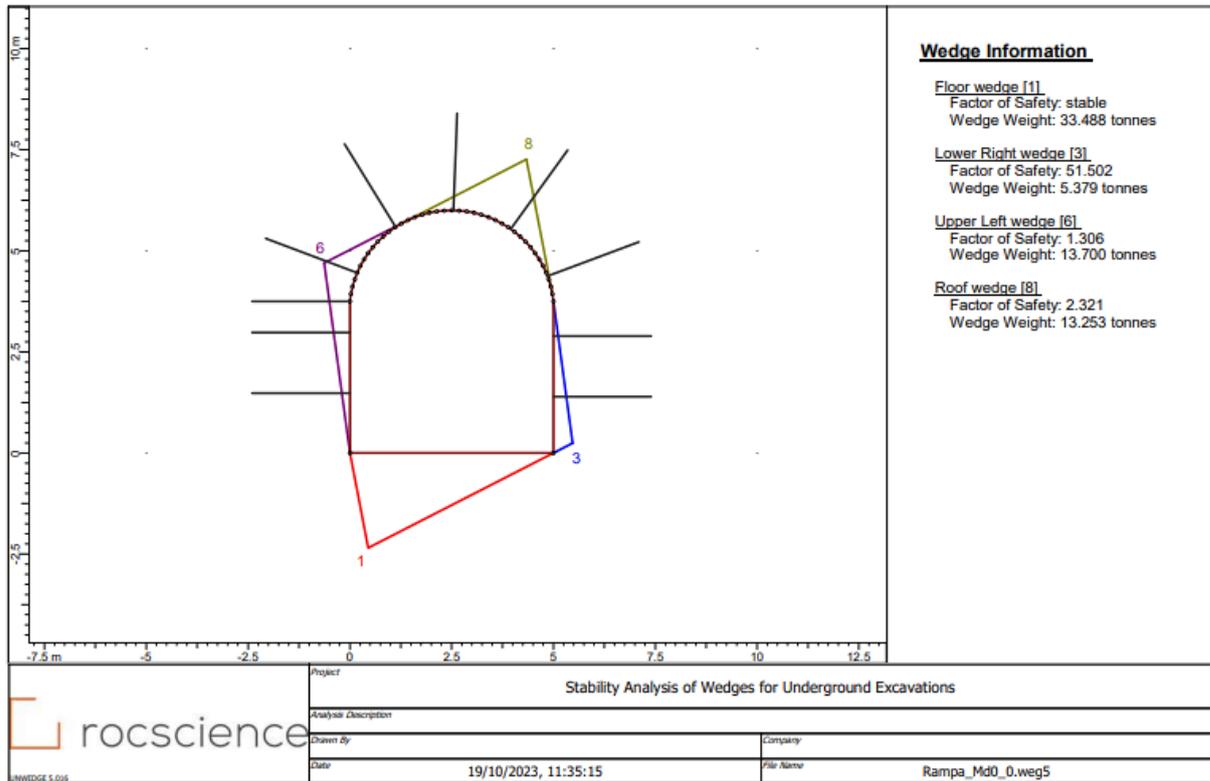
Figura 27: Propriedades dos parafusos utilizados no estudo.

MDBolt		Tirante Resinado	
Color		Color	
Bolt Type:	Split Set	Bolt Type:	Grouted Dowel
Tensile Capacity:	34 tonnes	Tensile Capacity:	18 tonnes
Plate Capacity:	5 tonnes	Plate Capacity:	5 tonnes
Bond Strength:	14 tonnes/m	Bond Strength:	7.5 tonnes/m
Shear Strength:	Unused	Bond Length:	100% of Bolt Length
Bolt Orientation Efficiency:	Used	Shear Strength:	Unused
Method:	Cosine Tension/Shear	Bolt Orientation Efficiency:	Used
SplitSet		Method:	Cosine Tension/Shear
Color			
Bolt Type:	Split Set		
Tensile Capacity:	18 tonnes		
Plate Capacity:	5 tonnes		
Bond Strength:	7.5 tonnes/m		
Shear Strength:	Unused		
Bolt Orientation Efficiency:	Used		
Method:	Cosine Tension/Shear		

Fonte: Autor (2023).

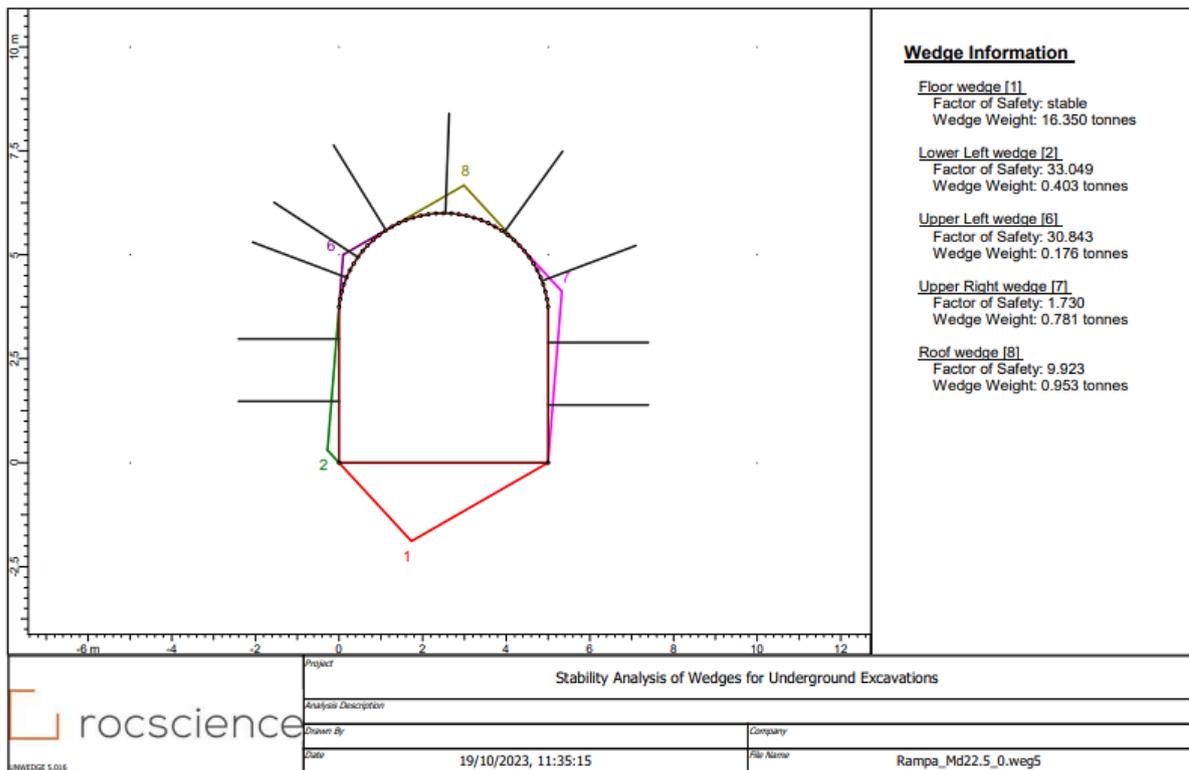
7.1.1 Suportes pontuais

Figura 28: Adição de suportes pontuais galeria permanente 0°. Blocos 6 – 9.



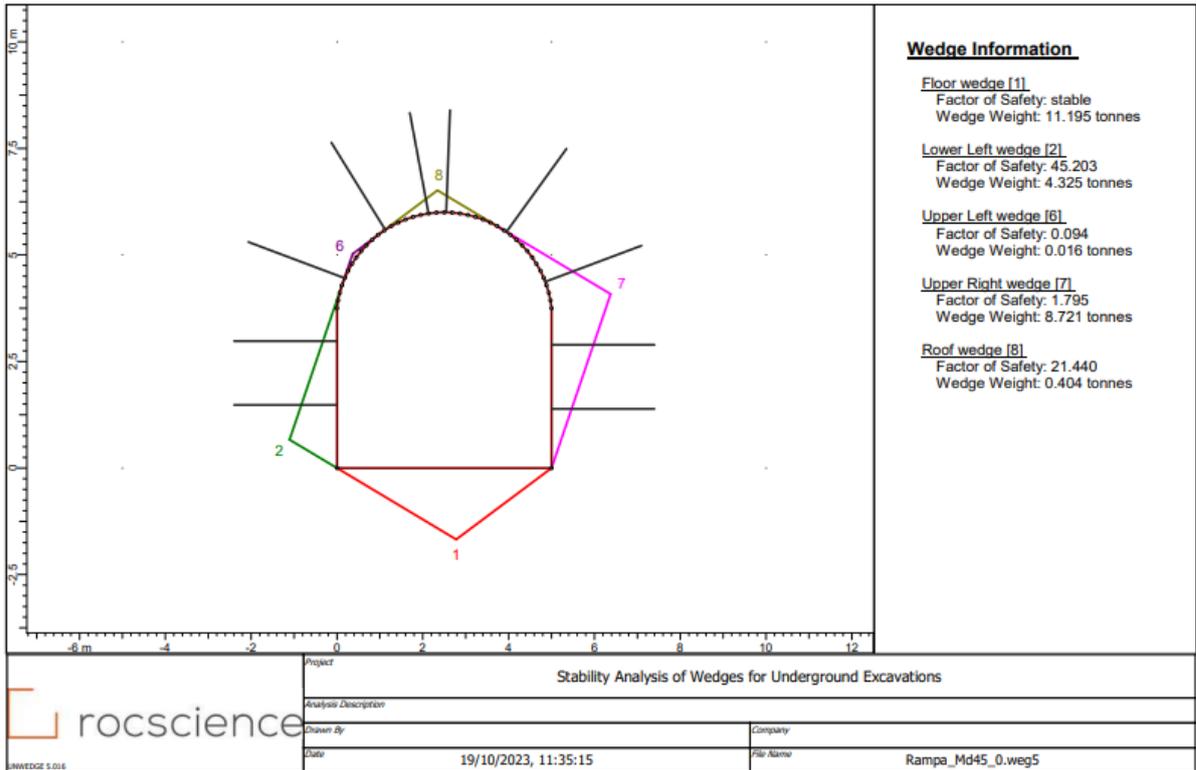
Fonte: Autor (2023)

Figura 29: Adição de suportes pontuais galeria permanente 22.5°. Bloco 6.



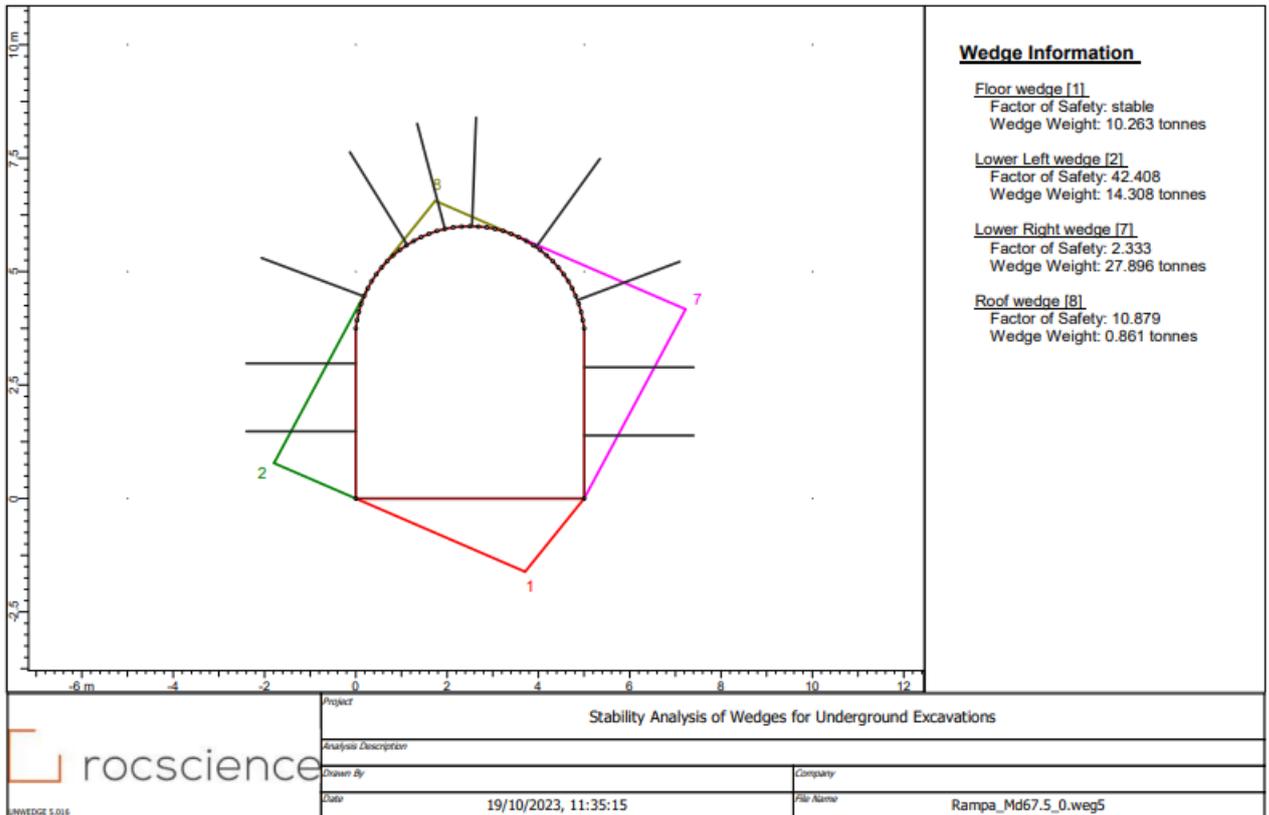
Fonte: Autor (2023).

Figura 30: Adição de suportes pontuais galeria permanente 45°. Blocos 6 – 8.



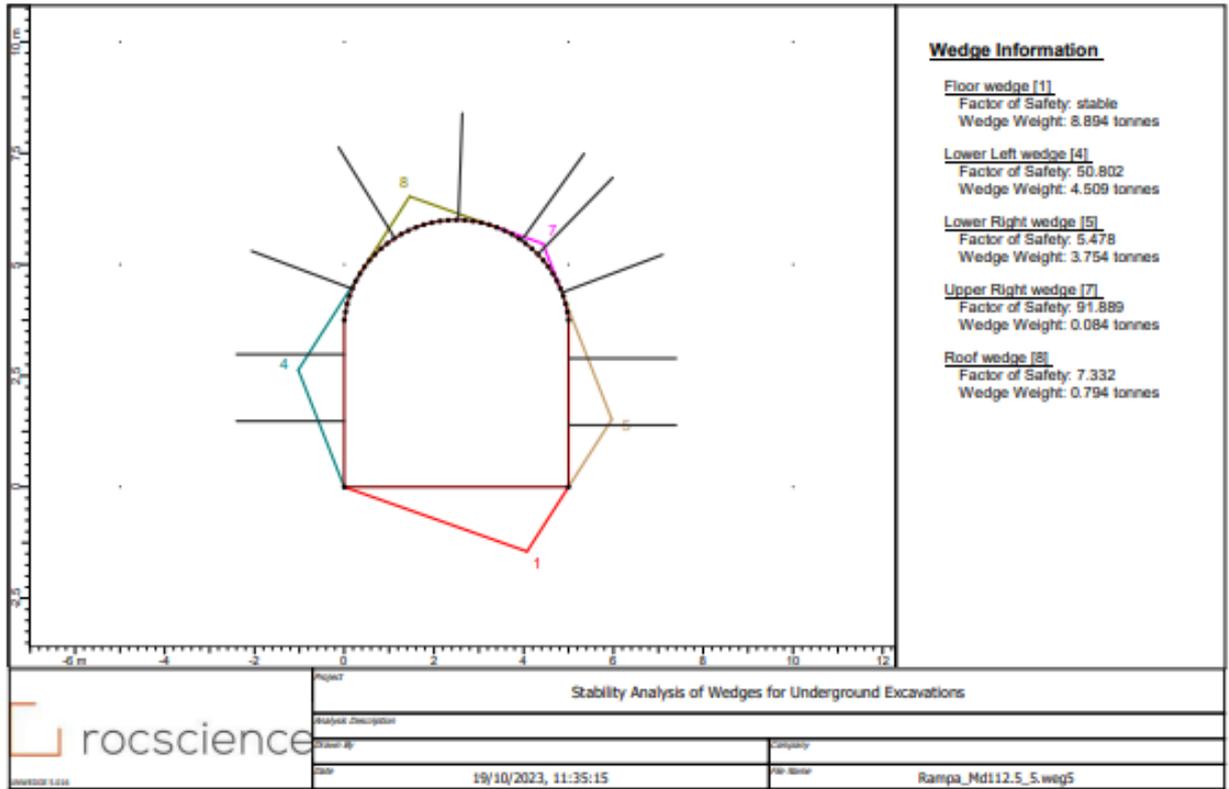
Fonte: Autor (2023).

Figura 31: Adição de suportes pontuais galeria permanente 67.5°.Bloco 8.



Fonte: Autor (2023).

Figura 32: Adição de suportes pontuais galeria permanente 112.5° Bloco 7



Wedge Information

- Floor wedge [1]
Factor of Safety: stable
Wedge Weight: 8.894 tonnes
- Lower Left wedge [4]
Factor of Safety: 50.802
Wedge Weight: 4.509 tonnes
- Lower Right wedge [5]
Factor of Safety: 5.478
Wedge Weight: 3.754 tonnes
- Upper Right wedge [7]
Factor of Safety: 91.889
Wedge Weight: 0.084 tonnes
- Roof wedge [8]
Factor of Safety: 7.332
Wedge Weight: 0.794 tonnes

Fonte: Autor (2023).

8 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco a otimização de suportes em galerias subterrâneas já existentes, com base em uma pré-caracterização geomecânica do maciço rochoso e utilização do software *Unwedge* da Rocscience para verificação e otimização do suporte aplicado nas galerias. A utilização de dados provenientes da pré-caracterização geomecânica permitiu uma compreensão mais aprofundada das condições do maciço rochoso, proporcionando uma base sólida para o processo de otimização. A aplicação do *Unwedge* na projeção das galerias e na implementação dos suportes pontuais demonstrou eficácia na melhoria da estabilidade estrutural, e a atualização do espaçamento dos parafusos contribuiu para uma distribuição mais eficiente das cargas no maciço, por padrão desde os últimos anos a empresa tem adotado uso de telas (malhas) ao longo de todas as galerias. Os resultados positivos obtidos, quando comparados com suportes sistemáticos empregados, indicam que as modificações propostas não apenas aprimoraram a estabilidade das galerias, mas também proporcionaram um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Este estudo destaca a importância da integração de técnicas geomecânicas avançadas e ferramentas de análise e otimização como o *Unwedge*, para aprimorar a tomada de decisões na engenharia subterrânea.

Dessa forma, as conclusões deste TCC sugerem que a abordagem adotada pode ser aplicada em projetos similares, proporcionando melhorias substanciais na segurança e eficiência de galerias subterrâneas existentes. Em recomendação para medidas que sejam de relevante adoção, para aprimoramento da metodologia aplicada ao longo do estudo são elas:

- A implementação de um programa contínuo de avaliação da estabilidade nas direções identificadas como críticas. Isso permitirá monitorar a eficácia das mudanças propostas ao longo do tempo e realizar ajustes conforme necessário.
- Realizar simulações e análises que abordem o desempenho dos suportes a longo prazo, considerando fatores como desgaste, degradação e possíveis mudanças nas condições geotécnicas.
- Explorar a integração de tecnologias inovadoras, como sistemas de escaneamento a laser para monitoramento em tempo real da estabilidade e condição dos suportes. Isso pode contribuir para uma gestão mais proativa e eficaz.
- Sugestão de uma abordagem de implementação gradual das alterações propostas, começando por áreas menos críticas, isso permitindo a observação dos resultados e ajustes antes da expansão para áreas mais sensíveis.

- Realizar uma análise mais detalhada dos custos associados à substituição e melhoria espacial dos suportes, comparando-os com os benefícios em termos de segurança, eficiência operacional e potencial prolongamento da vida útil da mina.
- Conduzir uma discussão crítica sobre a viabilidade prática da substituição e melhoria espacial dos suportes, considerando as limitações operacionais e logísticas da mina em questão.
- Por fim, oferecer uma visão mais abrangente e pragmática das implicações e potenciais melhorias advindas das alterações propostas na otimização do suporte em galerias de mina subterrânea.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Estadual: Rio Grande do Sul 2018 ano base 2017**. Brasília, 2019.
- AGISOFT LLC. **Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition**, Version 1.5. Agisoft Llc, 2019
- ALEJANO, L. R. et al. **ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests**. Rock Mechanics and Rock Engineering, [s.l.], v. 51, n. 12, p.3853-3859, 29 out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>.
- ALMEIDA, Fernando F. M. de; HASUI, Yociteru. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. 374 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: **Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15845-2: Rochas para revestimento Parte 2: **Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2015.
- BARTON, Nicholas. **Review of a new shear-strength criterion for rock joints**. Engineering Geology, [s.l.], v. 7, n. 4, p.287-332, jan. 1973. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6).
- BARTON, Nicky Ryland; CHOUBEY, Vishnu. **The shear strength of rock joints in theory and practice**. Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches, [s.l.], v. 10, n. 1-2, p.1-54, dez. 1977. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01261801>.
- BITENCOURT, Maria de Fátima. **Metamorfitos da Região de Caçapava do Sul, RS: Geologia e Relações com o Corpo Granítico**. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1., 1983, Porto Alegre. Ata. Porto Alegre: Ssbgeo, 1983. p. 37 - 47.
- BORTOLOTTI, Olavo José. **Petrologia dos Mármore de Caçapava do Sul, RS**. 1986. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
- BORTOLOTTI, Olavo José. **Petrografia dos Mármore de Caçapava do Sul, RS**. Ciência e Natura. Santa Maria, p. 37-65. set. 1987.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T.. **Rock Mechanics: For Underground Mining**. 3. ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005. 628 p.
- BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS 5930: 1999**: Code of practice for site investigations. British Standard, 1999.
- COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Eduerj, 2007.
- CHRISTOFOLLETTI, C. 2014. **Correlação entre as classificações geomecânicas RMR e Q e sua relevância geológica**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 310 p.

DARLINGTON, B; RATAJ, M; BALOG, G; BARNETT, D. **Development of the MDX Bolt and in-situ dynamic testing at Telfer Gold Mine**. Proceedings of the 3rd international conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3) 2018.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock**. Kirtland Air Force Base, New Mexico: Air Force Weapons Laboratory, 1966. 327 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **NRM-02 – Lavra a céu aberto**. Brasília, DNPM, 2001.

FIORI, Alberto Pio; CARMIGNANI, Luigi. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes**. 2. ed. Curitiba: Editora Ufpr, 2011. 2ª edição rev. e amp.: 1ª reimpressão.

FONTES, Luiz Carlos A. de A.. **Fundamentos de Aerofotogrametria: Aplicada à Topografia**. 2005. Disponível em: <<http://www.topografia.ufba.br/nocoes%20de%20aerofotogrametriapdf.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2019.

FOSSEN, Haakon. **Geologia Estrutural**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 584 p. Tradução de: Fábio R. D. de Andrade.

GOODMAN, Richard E.. **Introduction to Rock Mechanics**. 2. ed. New York: Wiley, 1989. 562 p.

GOODMAN, Richard E.; BRAY, John. Toppling of rock slopes. **Proceedings Of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes**, [S. l.], p.201-234, 1976.

HARTMANN, Léo Afraneo; CHEMALE JUNIOR, Farid; PHILIPP, Ruy Paulo. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano**. Centro de investigação do gondwana e instituto de geociências da universidade federal do rio grande do Sul (porto alegre). 50 anos de Geologia: Instituto de Geociências Contribuições. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, 2007. p. 97-123.

HIDEKI, Ito, William. **Contribuição ao estudo de instabilidade em túneis não revestidos da estrada de ferro vitória-minas através da teoria dos blocos-chave e caracterização da rocha através de ensaios laboratoriais e de campo**. Universidade de São Paulo. 2016.

HOEK, Evert; BRAY, John. **Rock Slope Engineering**. 2. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977. 402 p.

HOEK, E.; KAISER, P.K.; BAWDEN, W.F. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. capítulo 12. Rockbolts and dowels.1. ed. 1995. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781482287332>>. Acesso em: 17 dez. 2023.

HUDSON, John A.; HARRISON, John P. **Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles**. Oxford: Elsevier Science, 1997. 456 p.

LIMA, Túlio. **Análise técnica e econômica para utilização de cabos duplos em realces de sublevel na mina pequião - mineração serra grande, Crixás – Go**. 2016.

MAIA, Pedro Alexandre dos Santos. **Sobre o uso do GSI na avaliação do efeito da variabilidade do maciço no dimensionamento de túneis**. 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/62040>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

MARTINS, Carla Ferreira Vieira. **Avaliação das normas reguladoras de mineração para minas subterrâneas no Brasil e da Legislação Mineral Brasileira para segurança em**

subsolo. 2017. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

MOEBS, N. N.; STATEHAM R. M. **Coal Mine Roof Instability categories and Causes.**

BuMines IC 9076, 1986. 15 p.

MOLINDA, G.M. & MARK, C. **The Coal Mine Roof Rating: A Practical Rock Mass Classification for Coal Mines,** In: Proceedings, 12th International Conference on Ground Control in Mining, West Virginia University, Morgantown, EUA, p. 92-103. 1993.

NARDI, Lauro Valentim Stoll; BITENCOURT, Maria de Fátima. **Geologia, Petrologia e Geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS.** Revista Brasileira de Geociências, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p.153-169, fev. 1989.

NICHOLSON, Luke. **Analysis and Interpretation of In Situ Rock Bolt Pull Tests in Hard Rock Mines.** University of Toronto (Canada) ProQuest Dissertations Publishing, 2016.

PASETTO, Giovanni Argenta. **Modelagem Geológica Tridimensional de Mina de Mármore no Complexo Metamórfico Passo Feio, Caçapava do Sul - RS, Com Base de Dados de Sensoriamento Remoto.** 2018. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018.

PAZ, Valmor Madeira. **Levantamento das Descontinuidades e Avaliação da Estabilidade de Taludes da Mina do Mangueirão.** 2005. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2005.

PHILIPP, Ruy Paulo, BITENCOURT, Maria de Fátima, JUNGES, S. L. *Nd isotopic study of the Neoproterozoic Vila Nova Arc, south Brazil: implication for evolution of the São Gabriel Belt.* Journal of South American Earth Sciences, Londres. 2011.

PINTO, Bruno; ANDRADE, Marcelo; ZINGANO, André. **Análise de rupturas do teto imediato em mina de carvão, camada Barro Branco.** Criciúma, Santa Catarina, Brasil: 2017. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CBCM2017-0031>>. Acesso em: 9 dez. 2023.

PINOTTI, Alexandre Mathias; CARNEIRO, Celso Dal Ré, **Geologia estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP,** Terrae Didática, v. 9, n. 2, p. 132, 2015.

PROPELLER AERO. **How Do Drones Collect Quality Data - Part Two.** Disponível em: <<https://www.propelleraero.com/blog/quality-drone-data-part-2-significant-elevation-change/>>. 2018. Acesso em: 12 dez. 2022.

RAGAN, Donal M. **Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques.** 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 602 p.

REMUS, M.v.d et al. **The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in southern Brazil.** Journal Of South American Earth Sciences, [s.l.], v. 13, n. 3, p.191-216, jul. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0895-9811\(00\)00017-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0895-9811(00)00017-1).

ROCSCIENCE. **Barton-Bandis Criterion.** 2019. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/rocddata/rocddata/Barton-Bandis_Criterion.htm>. Acesso em: 10 set. 2023.

ROWLAND, Stephen M.; DUEBENDORFER, Ernest M.; SCHIEFELBEIN, Ilsa M. **Structural Analysis & Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology**. 3. ed. Malden: Blackwell Publishing, 2007. 320 p.

SANTOS, Evandro Gomes dos. **Análise da Performance dos Sensores Óptico e por Transmitância de Raios-X no Processo de Classificação de Calcário em Mina de Caçapava do Sul/RS**. 2018. Programa de Pós-graduação em Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SILVA, Henrique. **Tirantes em estruturas de contenção de solo: diretrizes para projeto e execução**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Escola de engenharia; Departamento de engenharia civil. 2015.

SIMONS, Noel; MENZIES, Bruce; MATTHEWS, Marcus. **A Short Course in Soil and Rock Slope Engineering**. London: Thomas Telford, 2001. 432 p.

TAVANI, Stefano et al. **Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran)**. Computers & Geosciences, [S.l.], v. 63, p.44-53, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013>.

TAVANI, Stefano; CORRADETTI, Amerigo; BILLI, Andrea. **High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology**. Journal Of Structural Geology, [S.l.], v. 86, p.200-210, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.03.009>.

TEMBA, Plínio. **Fundamentos da Fotogrametria**. 2000. Disponível em: <<http://csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/fotogrametria.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2022.

UNAL, E. **Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs**, PhD thesis, The Pennsylvania State University, EUA, 355 p. 1983.

WEISS, Anderson Luis. **Incorporação de dados geomecânicos em projetos de suporte de teto em mina subterrânea de carvão**. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2838>> Acesso em: 9 dezembro 2023.

WYLLIE, Duncan C. **Rock Slope Engineering: Civil Applications**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 620 p.

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Christopher W. **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. 4. ed. New York: Spon Press, 2004. 431 p.

Zhang, N.; Li, C. C.; Lu, A.; Chen, X.; Liu, D.; Zhu, E. **Experimental Studies on the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Tilt Test**, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 47, No. 1, 2019, pp. 256–283, <https://doi.org/10.1520/JTE20170308>. ISSN 0090-3973