



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

GABRIELA COLOMBO

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDE SUL DA ARICÁ
MINERAÇÃO**

CUIABÁ-MT

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE
TALUDE SUL DA ARICÁ MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Carlos Eduardo Domingues da Mata

Coorientador: Me. Pablo Koerich Claudino

CUIABÁ – MT

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C718c colombo, gabriela.
Classificação geomecânica e análise de estabilidade de talude sul da Aricá Mineração / gabriela colombo. -- 2021
54 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Carlos Eduardo Domingues da Mata.
Co-orientador: Pablo Koerich Claudino.
TCC (graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Engenharia, Várzea Grande, 2021.
Inclui bibliografia.

1. classificação geomecânica. 2. Maciço rochoso. 3. Estabilidade de talude.. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

REGISTRO DE REUNIÃO

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Nome do Aluna: Gabriela Colombo

Data da defesa: 01/10/2021

Local: Sala Virtual: <https://meet.google.com/emv-ntbh-jkn> e <https://meet.google.com/ern-ocqj-pds>

Hora de início: 13:10h

Hora de fim: 17:23h

Banca examinadora:

Orientador Prof. Me. Carlos Eduardo Domingues da Mata

Membro Prof. Me. Pedro Henrique Neuppmann

Membro Me. Cramer Moraes de Almeida

Membro Prof. Dr. Eduardo Carlos Alexandrina

Título da monografia: “Análise de Estabilidade de Taludes da Mina a Céu Aberto Casa de Pedra – Mineração Aricá”

Em sessão pública, após exposição de cerca de 31 minutos, a candidata foi arguida oralmente pelos membros da banca tendo como resultado:

Aprovação por unanimidade sem exigências;

Aprovação condicionada ao atendimento das exigências constantes na folha de modificações no prazo fixado pela banca de 06 (seis) dias corridos;

Reprovação;

e a nota 8,58 foi atribuída ao trabalho.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada abaixo pelos membros da banca na ordem acima determinada e pelo aluno.

Cuiabá - MT, 1º

de outubro de 2021.

Orientador Prof. Me. Carlos Eduardo Domingues da Mata

Membro Prof. Me. Pedro Henrique Neuppmann

Membro Me. Cramer Moraes de Almeida

Membro Prof. Dr. Eduardo Carlos Alexandrina

Docente da disciplina de TCC Mônica Aragona

Discente Gabriela Colombo

CORREÇÕES DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Nome do Aluno: Gabriela Colombo

A banca examinadora condicionou a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso às seguintes correções:

As correções estão contidas nos manuscritos de defesa corrigidos pelos membros da banca e encaminhados à docente da disciplina e ao discente.

O prazo para o cumprimento é de 06 (seis) dias corridos, sendo o orientador o responsável pela verificação do atendimento às exigências da banca.

Cuiabá - MT, 1º

de outubro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **PEDRO HENRIQUE NEUPPMANN, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/10/2021, às 23:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **MONICA ARAGONA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/10/2021, às 23:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO CARLOS ALEXANDRINA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 20/10/2021, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS EDUARDO DOMINGUES DA MATA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 24/10/2021, às 15:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CRAMER MORAES DE ALMEIDA, Técnico Administrativo em Educação da UFMT**, em 25/10/2021, às 12:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4044402** e o código CRC **908B58E4**.

Referência: Processo nº 23108.090036/2021-15

SEI nº 4044402

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades que tem colocado em minha vida.

A minha mãe, irmã e avó por sempre me apoiar, por acreditar em mim, e me incentivar a seguir todos os meus sonhos. Muito obrigada por toda dedicação e amor incondicional.

A minha família, obrigada pelas orações, incentivo e compreensão pelos momentos ausentes.

Ao meu orientador e, pelo tempo, paciência, ensinamentos, dedicação e por sempre estarem dispostos a me ajudar.

À minha grande amiga, Isadora, pelo carinho, apoio e por estar comigo em todos os momentos. E aos meus amigos, pela motivação, companheirismo e cumplicidade.

Aos professores, por terem aceitado o convite para compor minha banca, pela paciência e gentileza. E em especial a professora Mônica, pelo apoio ao longo desta jornada, pelos conselhos e por não me deixar desistir.

Agradeço a todos da empresa Aricá Mineração, por cederem as ferramentas necessárias para elaboração deste trabalho. Em especial agradeço a equipe de Geologia e ao Engenheiro de Minas Arnaldo, por todas as conversas e aprendizado.

RESUMO

Os maciços rochosos são constituídos de porções de rocha intacta e descontinuidades, sendo a segunda a principal responsável pela diminuição da resistência dos maciços rochosos. Deste modo a investigação de campo para reconhecimento estrutural e geomecânico das rochas é imprescindível para qualquer projeto que envolva a construção de estruturas sobre a rocha ou maciço rochoso. Trata-se de uma série de etapas que englobam reconhecimento inicial e acompanhamento durante o projeto. Uma distinção de características do maciço rochoso irá determinar seu comportamento e tornar possível a análise de sua estabilidade. Além disso, os parâmetros de resistência da rocha também podem ser determinados, a partir desses dados. Métodos de classificação como o RQD, RMR, são utilizados como ferramenta de verificação de qualidade do maciço rochoso. Com isso, o estudo a ser realizado visa a coleta de dados em campo (informações sobre as rochas constituintes do maciço e das descontinuidades presentes) para caracterizar e classificar o talude sul da cava Sucuri localizada na Mineração Casa de Pedra e, consecutivamente, efetuar a análise destas informações para determinação de suas propriedades geomecânicas - por meio de métodos analíticos. Assim, espera-se com esses resultados auxiliar as operações de lavra da empresa. Segundo o estudo, o maciço rochoso é formado por um filito deformado e ao todo foram determinadas 3 famílias de descontinuidades para o talude analisado. A partir destes resultados conclui-se que os modos de ruptura do talude estão condicionados pelas descontinuidades, sendo assim o cálculo da probabilidade de ruptura dos taludes, através das análises cinemáticas, apresentou boa representatividade das condições de campo.

Palavra-chave: classificação geomecânica, maciço rochoso, estabilidade de talude.

ABSTRACT

Massive rocks are made up of portions of intact rock and discontinuities, the second being primarily responsible for decreasing the strength of rock massifs. Thus, field investigation for structural and geomechanical recognition of the rocks is indispensable for any project that involves the construction of structures on the rock or rock mass. This is a series of steps that encompasses the initial recognition and follow-up during the project. A distinction of rock mass characteristics will determine its behavior and make it possible to analyze its stability. In addition, rock strength parameters can also be determined, from these data. Classification methods such as RQD, RMR, are used as a tool to verify the quality of the rock mass. Thus, the study to be carried out aims to collect data in the field (information about the rock mass and the discontinuities present) to characterize and classify the southern slope of the Sucuri pit located at Casa de Pedra Mining and, consecutively, to analyze this information to determine its geomechanical properties by analytical methods. Therefore, these results are expected to assist the company's mining operations. According to the study, the rock mass is formed by a deformed phyllite and altogether three families of discontinuities were determined for the slope analyzed. From these results it can be concluded that the slope rupture modes are conditioned by the discontinuities, thus the calculation of the probability of slope rupture through kinematic analysis showed good representation of field conditions.

Keywords: geomechanical classifications, rock mass, stability slope.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo da estrutura do maciço rochoso.....	11
Figura 2 – Representação esquemática do efeito escala no estudo de maciços rochoso.....	12
Figura 3 – Diferença entre o critério de Hoek-Brown e o critério de Mohr-Cloumb.....	18
Figura 4 – Ilustração de um maciço rochoso, indicando os aspectos geomecânicos levantados em campo	20
Figura 5 – Desenho esquemático indicando três diferentes famílias de descontinuidades, e a forma de como é medido o espaçamento, através de uma trena	23
Figura 6 – Blocos esquemáticos ilustrando a persistência das descontinuidades	24
Figura 7 – Bloco esquemático ilustrando descontinuidades em A) fechada; B) aberto..	25
Figura 8 – Orientação das descontinuidades mergulho e direção de mergulho.....	26
Figura 9 – Configuração geométrica dos taludes de uma cava a céu aberto.....	27
Figura 10 – Projeção estereográfica indicando como são representadas as orientações das estruturas.....	28
Figura 11 – Perfil esquemático indicando o mecanismo de ruptura planar.....	29
Figura 12 – Mecanismo de ruptura por cunha.....	30
Figura 13 – Bloco esquemático indicando a condição de tombamento.....	30
Figura 14 – Esquema de uma ruptura circular.....	31
Figura 15 – Em A) ruptura circular em solo, rocha muito alterada ou muito fraturada, sem modelo estrutural identificado; B) plano de ruptura em rochas com estruturas muito bem definidas; C) ruptura em cunha em duas interseções de descontinuidade; D) ruptura por tombamento em rocha dura na qual pode formar estruturas colunares separadas por mergulhos de descontinuidades em degraus.....	32

Figura 16 – Mapa de localização do empreendimento.....	33
Figura 17 – Disposição da cava em estudo (Cava Sucuri).....	34
Figura 18 – Mapa geológico do empreendimento em escala de 1:200.000 – SIRGAS 2000 – PROJEÇÃO UTM 21 S.....	35
Figura 19 - Mapa litológico.....	37
Figura 20 – <i>Scan line</i> para determinação de parâmetros RMR.....	40
Figura 21 – Vista do Talude Sul da Cava Sucuri, com seta indicando ponto de coleta de dados (<i>scan line</i>).....	41
Figura 22 – Diagrama de frequência para as discontinuidades do Talude Sul.....	42
Figura 23 – Critérios de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb para determinação de ângulo de atrito e coesão.....	45
Figura 24 – Envoltórias de resistência de Hoek e Brown em vermelho e em azul resistência de Mohr-Coulomb: (a) tensão principal menor x tensão principal maior e (b) tensão de cisalhamento x tensão normal.....	46
Figura 25 – Probabilidade de ruptura planar.....	47
Figura 26 – Probabilidade de ruptura em cunha.....	48
Figura 27 - Probabilidade de ruptura por tombamento.....	48

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Parâmetro de resistência (σ_c).....	16
Quadro 2 – Valores médios de 'mi' e suas variações.....	16
Quadro 3 – Classificação do nível de perturbação do maciço.....	17
Quadro 4 – Ábaco para quantificação do GSI.....	19
Quadro 5 – Classes do maciço rochoso e suas características.....	23
Quadro 6 – Classificação do RQD.....	23
Quadro 7 – Classificação do RQD.....	25
Quadro 8 – Classificação de espaçamento.....	26
Quadro 9 – Características da rugosidade e nomenclaturas sugeridas.....	27
Quadro 10 – Classificação do nível de perturbação do maciço.....	28
Quadro 11 – Relação Autores x Fase de deformação.....	38

LISTA DE SÍMBOLO, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

γ	Peso específico da rocha
H	Altura do talude
σ_1	Tensão efetiva principal maior
σ_3	Tensão efetiva principal menor
σ_c	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
m_b	Valor reduzido da constante do material m_i
a	Constante do maciço rochoso
s	Constante do maciço rochoso
m_i	Constante da rocha intacta
φ	Ângulo de atrito
c	Coesão
α	<i>Dip Direction</i> (Direção de mergulho)
β	<i>Dip</i> (Mergulho)
ψ_A	Ângulo da descontinuidade
Ψ_f	Ângulo da face do talude
D	Nível de perturbação do maciço
GSI	<i>Geological Strength Index</i> (Índice de Resistência Geológica)
RMR	<i>Rock Mass Rating</i> (Classificação de Maciço Rochoso)
RQD	<i>Rock Quality Designation</i> (Descrição da Qualidade de Rocha)
F1	Família 1
F2	Família 2
F3	Família 3

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Considerações Gerais.....	11
1.2 Objetivo	11
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1 Caracterização de um Maciço Rochoso.....	12
2.2 Critério de Resistência Hoek-Brow	14
2.3 Classificações Geomecânicas	20
2.3.1 Sistema de Classificação Geomecânica (<i>Rock Mass Rating</i> - RMR).....	20
2.4 Geometria dos Taludes	27
2.4. Métodos de Análise de Estabilidade.....	28
2.5 Análise dos Métodos Cinemáticos.....	28
3. ESTUDO DE CASO: PROJETO MINERAÇÃO CASA DE PEDRA	33
3.1 Descrição da área de estudo.....	33
4. METODOLOGIA	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Caracterização geológica-geotécnica.....	41
5.2. Determinação do Índice RMR	45
5.3 Critério de Hoek-Brown	45
5.4 Análise Cinemática	47
6. CONCLUSÃO	50
7. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	51
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os diversos fenômenos e os diferentes comportamentos das rochas são os objetos de estudo das ciências geológicas. Para a engenharia de minas, o maciço rochoso é onde se encontra depositado o mineral que deve ser retirado para seu aproveitamento industrial (TEJADA-CERVANTES, 2011).

Ambientes geológicos complexos, tem contribuído para um acréscimo de fatores que influenciam na estabilidade geral da obra, surgindo então, a necessidade cada vez maior da aplicação de controles técnicos mais complexos. Dessa forma, os estudos geotécnicos passam a ser decisivos para a viabilização do projeto, sendo os mesmos responsáveis por garantir a estabilidade das cavas operacionais e finais, ao longo de toda sua operação (DE SOUZA, 2019).

Segundo Neto (2019), na atividade de engenharia geotécnica em mineração deve-se destacar a qualidade dos taludes quanto à segurança. Essa segurança deve ser garantida por um adequado estudo geológico e geomecânico, que conte com aspectos de exploração mineral e, ao mesmo tempo, estudos geotécnicos de estimativa da deflagração ou redução da resistência do maciço rochoso para diferentes regiões ou setores da mina, com a consequente avaliação de estabilidade dos taludes.

Neste contexto, será utilizado como estudo a análise a partir do talude Sul da cava Sucuri, inserida no projeto Casa de Pedra, da Aricá Mineração, no qual será apresentada a metodologia utilizada para realização dos estudos geotécnicos da cava operacional

1.2 Objetivo

O objetivo geral dessa monografia consiste em expor a metodologia utilizada como base para realização dos estudos geotécnicos, a fim de estimar os parâmetros de estabilidade de talude do talude Sul inserido na cava Sucuri da Mineração de Casa de Pedra.

Para que seja possível atingir os objetivos principais, tem-se como objetivos específicos:

- aprimorar o conhecimento sobre estabilidade de taludes através da revisão bibliográfica de estudos de casos sobre o assunto;
- avaliar a qualidade do maciço;

- identificar os possíveis mecanismos de ruptura, através de análises cinemáticas no estudo do talude sul.

2. REVISÃO DA LITERATURA

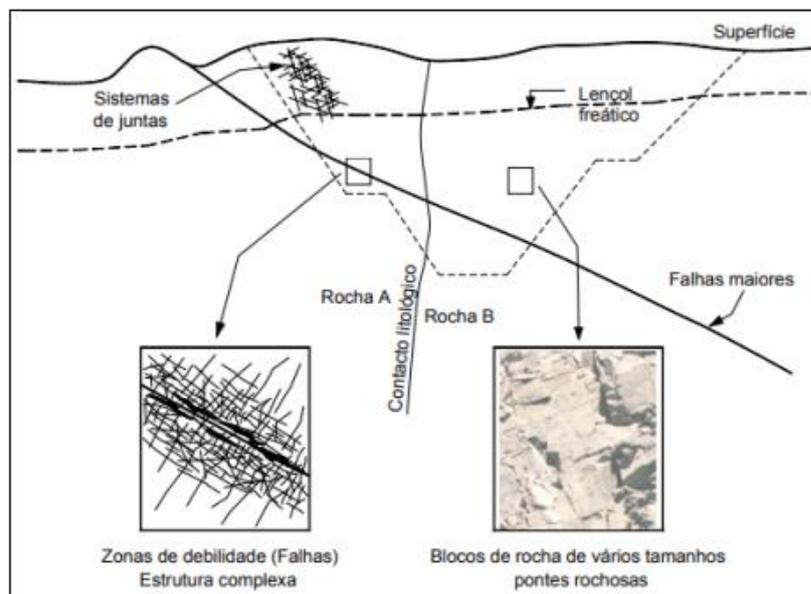
Neste capítulo serão apresentados: conceitos e definições sobre classificação geomecânica, as referências utilizadas para determinação dos parâmetros de resistência de maciços rochosos; e os principais conceitos que embasaram os estudos realizados de análise cinemática de taludes.

2.1 Caracterização de um Maciço Rochoso

A classificação de um maciço permite conhecê-lo e agrupá-lo em padrões geomecânicos semelhantes, segundo parâmetros específicos, baseando-se nas características estruturais e geológicas da formação rochosa (MENEZES, 2013).

Uma seção típica de um maciço rochoso é atravessado por diferentes discontinuidades, tais como falhas e sistemas de juntas, além disso, podem ocorrer vários tipos de litologias com diferentes graus de fraturamento (Figura 1).

Figura 1 - Exemplo da estrutura do maciço rochoso



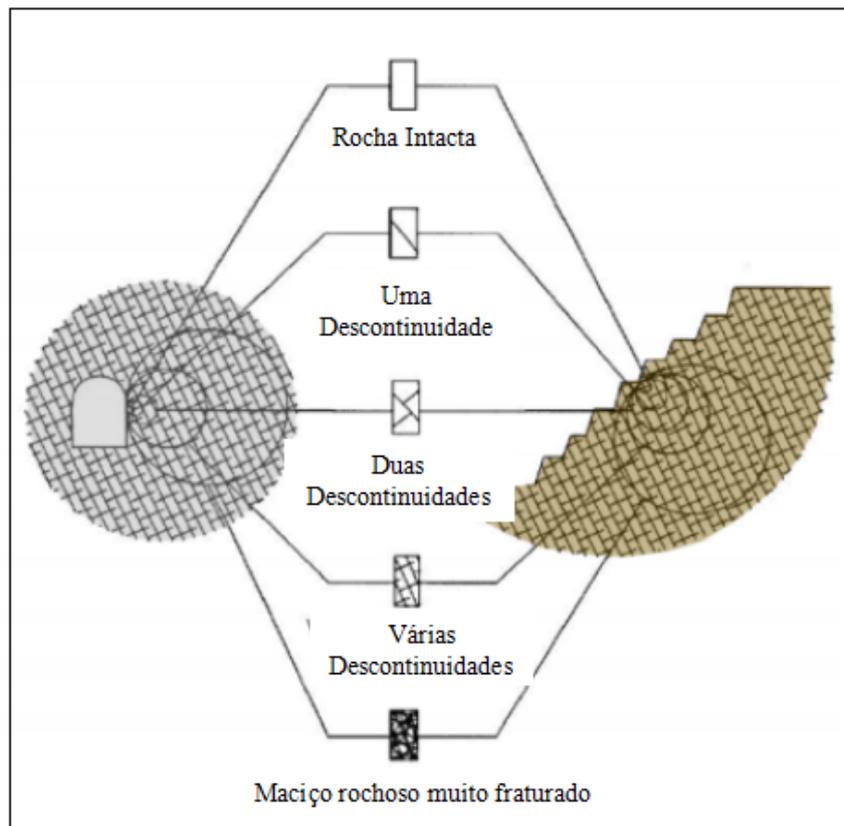
Fonte: Hauallanca (2004).

Pode-se também observar que as discontinuidades persistentes são de extrema importância pois atuam como zonas de fraquezas, podendo eventualmente governar a estabilidade. As estruturas consistem em blocos limitados por juntas, fraturas ou fissuras deste modo, a distância entre estes tipos de discontinuidades determina o tamanho dos blocos e as características destes blocos influenciam na resistência do maciço rochoso (HAULLANCA, 2004).

Definir as propriedades do maciço rochoso em relação à obra de engenharia que o mesmo se encontra inserido é essencial. O maciço é representado por uma massa rochosa descontínua, diretamente influenciada pela presença de estruturas geológicas como juntas e falhas, portanto, suas propriedades sofrem variações em função da escala de observação (Figura 2). Em razão disso, especificar as propriedades mecânicas de uma massa rochosa não é algo simples e, dessa forma, é importante entender os conceitos de rocha intacta e discontinuidades (BRADY & BROWN, 1992).

Em geral, quando se fala em rocha intacta, trabalha-se com pequenas escalas, como exemplo tem-se o processo de perfuração em rochas que geralmente refletem as propriedades de resistência da rocha intacta.

Figura 2 - Representação esquemática do efeito escala no estudo de maciços rochosos



Fonte: Modificado de Hoek et al. (1995).

As discontinuidades são consideradas como planos de fraqueza que podem vir a controlar o comportamento da massa rochosa. Segundo Assis (2003), elas podem conter baixa ou nenhuma resistência à tração, podendo vir a representar os planos de acamamento, planos de foliação, contatos litológicos, falhas, fraturas, dentre outros. Hoek e Bray (1981) afirmaram que a orientação das discontinuidades pré-existentes em relação à orientação do talude (condições cinemáticas de ruptura) pode ter impacto no comportamento dos taludes em rocha, vindo a interferir na geometria, layout da mina ou até mesmo em inviabilizar algum projeto.

A resistência do maciço rochoso pode ser determinada correlacionando os resultados dos ensaios da rocha intacta com os parâmetros obtidos no mapeamento geomecânico, utilizando critérios e correlações empíricas. Dentre os critérios de ruptura disponíveis, o de Hoek-Brown é um dos mais utilizados para estimação da resistência do maciço rochoso.

2.2 Critério de Resistência Hoek-Brown

Segundo Hoek et al. (2002), o critério de Hoek-Brown generalizado é dado pela Equação 1:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad 1$$

Onde,

σ_1 e σ_3 - corresponde as tensões principais efetivas, maior e menor na ruptura

σ_c - resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

m_b - constante m para o maciço

a e s - são constantes do maciço rochoso

Como observado na Equação 1, σ_c é a resistência à compressão simples da rocha intacta e pode ser determinado em campo através de uma análise geomecânica (Quadro 1).

Quadro 1 - Parâmetro de resistência (σ_c)

Parâmetro		Variações						
Resistência	Estimativa de campo	Amostra não quebra após sucessivos golpes de martelo geológico;	Amostra quebra após muitos golpes de martelo geológico;	Amostra quebra com mais de um golpe de martelo geológico;	Amostra quebra com um único golpe de martelo geológico;	Amostra é marcada pela ponta do martelo geológico;	Amostra é marcada por canivete;	Amostra é marcada pela unha;
	Compressão Uniaxial (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1

Fonte: Modificado de Hoek et al. (2002).

Para representar o aumento da resistência da rocha intacta com o aumento do confinamento é utilizado o parâmetro m_i , que diz respeito a natureza da rocha (Quadro 2).

Quadro 2 - Valores médios de ' m_i ' e suas variações

Tipo de rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grosseira	Média	Fina	Muito fina
Sedimentar	Clástica		Conglomerado (*)	Arenito 17±4	Siltito 7±2	Argilito 4±2
			Brecha (*)		Grauvaca 18±3	Folhelho 6±2
						Marga 7±2
	Não clástica	Carbonatado	Calacério Cristalina 12±3	Calcário 9±2	Dolomita 9±3	
		Químico		Gesso 8±2	Anidrita 12±2	
		Orgânico				Giz 7±2
Metamórfica	Não foliada		Mármore 9±3	Corneana 19±4	Quartzito 20±3	
	Levemente foliada		Migmatito 29±3	Anfibolito 26±6	Gnaisse 28±5	
	Foliada (**)			Xisto 12±3	Filito 7±3	Ardósia 7±4
Ígnea	Plutônica	Claras	Granito 32±2	Diorito 25±5		
			Granodiorito 29±3			
		Escuras	Gabro 27±3	Dolorito 16±5		
			Norito 20±5			
	Hipobissais		Pórfiro 20±5	Diabásio 15±5	Peridotito 25±5	
	Vulcânica	Lava	Riolito 20±5		Dacito 25±3	
			Andesito 25±5		Basalto 25±5	
Piroclástica extrusiva		Aglomerado 19±3	Brecha 19±5	Turfa 13±5		

Fonte: Modificado de Hoek et al.(2013).

Para o maciço rochoso é utilizado um parâmetro m_b que é um valor reduzido da constante do material m_i , e é dado pela Equação 2:

$$m_b = m_i \times e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad 2$$

Onde,

m_i - constante da rocha intacta

D - nível de perturbação do maciço

GSI - índice de resistência geológica

As constantes para o maciço rochoso 's' e 'a' dadas pelas Equações 3 e 4 respectivamente:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad 3$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad 4$$

O Parâmetro D (*Disturbance*) é o grau de perturbação que o maciço sofreu devido, por exemplo, às vibrações do desmonte de rocha ou reduções de tensão na abertura de novas faces livres, medido de 0 a 1 (Quadro 3).

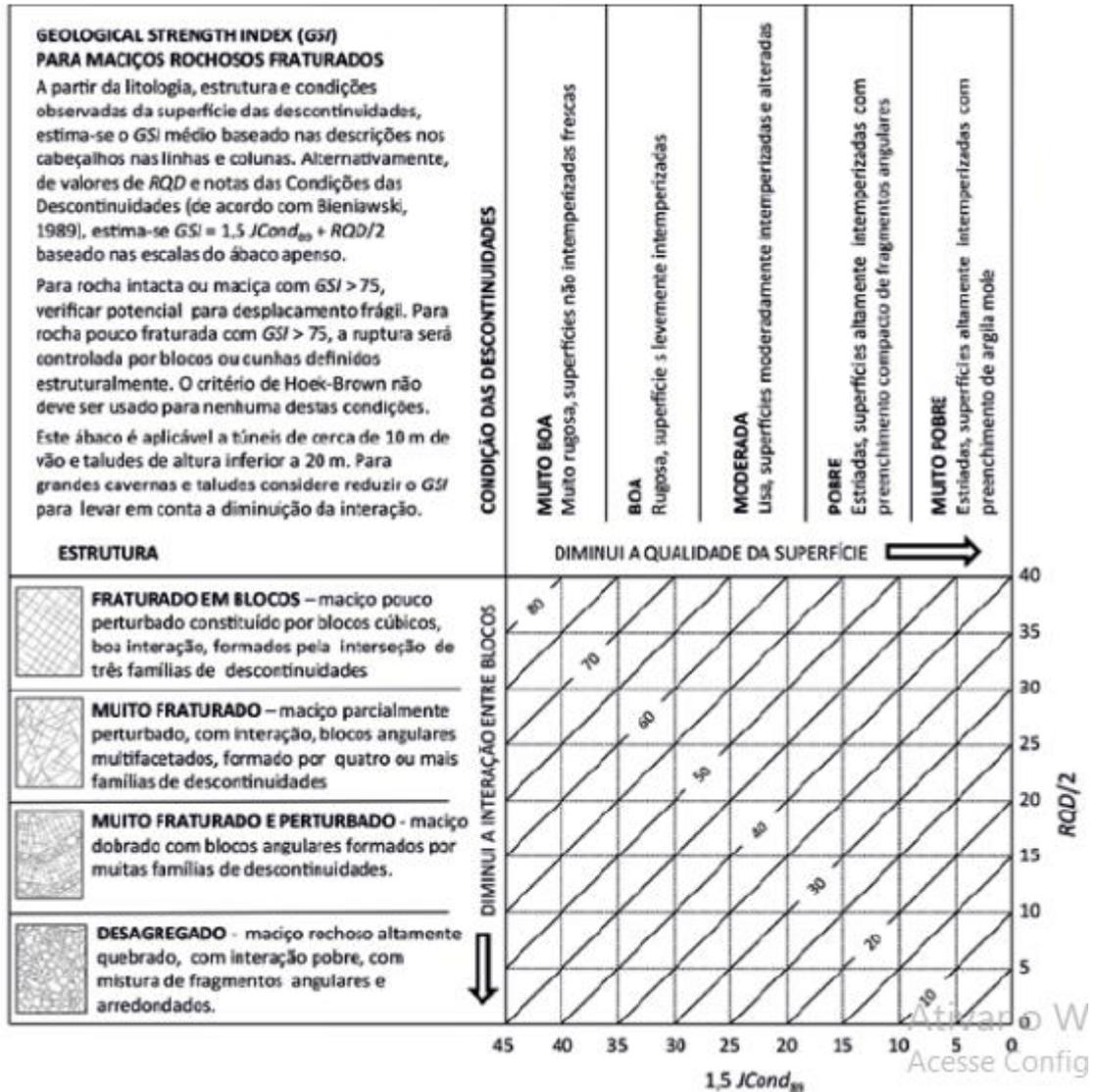
Quadro 3 - Classificação do nível de perturbação do maciço

Aparência do Maciço Rochoso	Descrição do Maciço Rochoso	Valores sugeridos para D
	Um desmonte de rocha controlado ou uma escavação com tuneladora, de perturbação do maciço rochoso no entorno do túnel	D = 0
	Uma escavação mecânica ou manual, em maciço rochoso de qualidade pobre (sem desmonte por explosivo), resulta em mínima perturbação do maciço rochoso no entorno do túnel.	D = 0 D = 0,5 (sem suporte invertido)
	Um desmonte de rochas de qualidade muito pobre, em túneis em rocha dura, resulta em danos locais severos, que se entendem 2 ou 3 metros para dentro do maciço rochoso, no entorno da escavação.	D = 0,8
	Desmonte de rocha de pequena escala, resulta em danos modestos ao maciço rochoso, particularmente, se um desmonte controlado é usada. Entretanto, o alívio de tensões pode resultar em alguma perturbação.	D = 0,7 qualidade boa D = 1,0 qualidade pobre
	Cavas de mina com grandes dimensões estão sujeitas a uma perturbação significativa, devido ao desmonte da rocha para grandes produções. Escavações mecânica de taludes de mina em rochas alteradas.	D = 1,0 produção elevada D = 0,7 Escavação mecânica

Fonte: Modificado de Hoek et al.(2013).

Geological Strength Index (Índice de resistência geológica - GSI) é um sistema de graduação da qualidade de maciços rochosos, semelhante ao RMR, que se baseia nas condições observadas em campo, como fraturamento, rugosidade, grau de intemperismo. Pode ser dividido em duas categorias: maciços rochosos fraturados; maciços rochosos foliados (Quadro 4).

Quadro 4 – Ábaco para quantificação do GSI

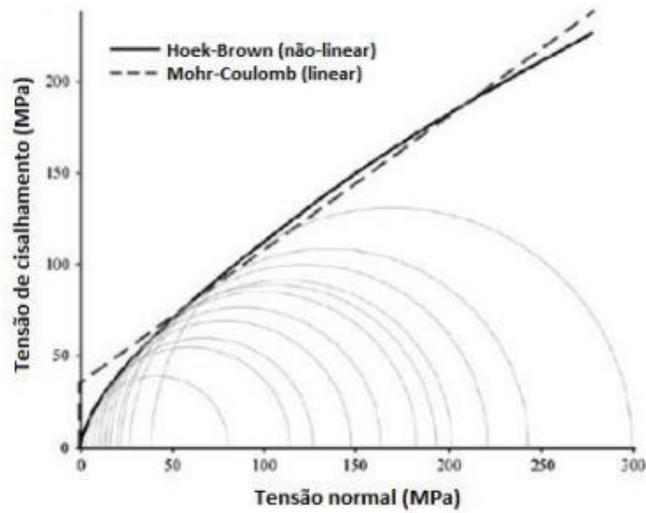


Fonte: Modificado de Hoek et al.(2013).

Considerando que muitos softwares geotécnicos ainda utilizam somente o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, torna-se necessário então a determinação dos valores de ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) do maciço rochoso.

Hoek et al. (2002) propuseram um processo de ajuste de curvas que envolve balancear as áreas acima e abaixo do gráfico de Mohr-Coulomb, conduzindo a novas equações para o ângulo de atrito e coesão (Figura 3).

Figura 3 - Diferença entre o critério de Hoek-Brown e o critério de Mohr-Coulomb



Fonte: Modificado de Eberhardt, 2012 apud BATALHA, 2016, P.22

A partir das constantes apresentadas anteriormente é possível calcular dois novos parâmetros intrínsecos às discontinuidades, que correspondem ao Critério de Mohr-Coulomb. São eles o ângulo de atrito (φ) e a coesão (c), dados pelas equações 5 e 6 respectivamente:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right) \quad 5$$

$$c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)]}} \quad 6$$

Sendo σ_{3n} a tensão σ_{3max} máxima dividida pela resistência à compressão uniaxial da rocha e é determinado pela Equação 7:

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_c} = 0,47 \left(\frac{\sigma_c}{\gamma H} \right)^{-0,94} \text{ ou } 0,72 \left(\frac{\sigma_c}{\gamma H} \right)^{-0,91} \quad 7$$

Onde:

γ : é o peso específico da rocha

H : é a altura do talude

Os critérios de resistência permitem determinar os valores máximos aos quais um material pode estar submetido, sem comprometer sua integridade, ou seja, sem sofrer deformação ou ruptura.

2.3 Classificações Geomecânicas

Segundo Neto (2019), a utilização de classificações geomecânicas vem sendo uma prática difundida na Geologia de Engenharia e utilizada pelas empresas de mineração para prever o comportamento geotécnico e até mesmo o tipo de tratamento a ser utilizado durante e após as escavações, devido principalmente à dificuldade operacional de ensaiar as rochas, em função da escala.

Essas classificações permitem conhecer e agrupar padrões geomecânicos semelhantes segundo parâmetros específicos avaliados, baseando-se nas características estruturais e geológicas da formação rochosa (MENEZES, 2013). Portanto, a previsibilidade do comportamento geotécnico de um maciço rochoso está intimamente relacionada ao nível de identificação real dos parâmetros dessa classificação e o índice correlato

Vários foram os autores que propuseram modelos de sistema de classificação para os maciços rochosos. Neste estudo, foram utilizados conceitos baseados nas propostas de Deere (1964) para determinação do Rock Quality Designation - RQD (Índice de qualidade da rocha) do maciço, Bieniawski (1973), para classificação do maciço rochoso em campo e Hoek e Brown (1988) para determinação da resistência do maciço rochoso, com a definição do ângulo de atrito das discontinuidades.

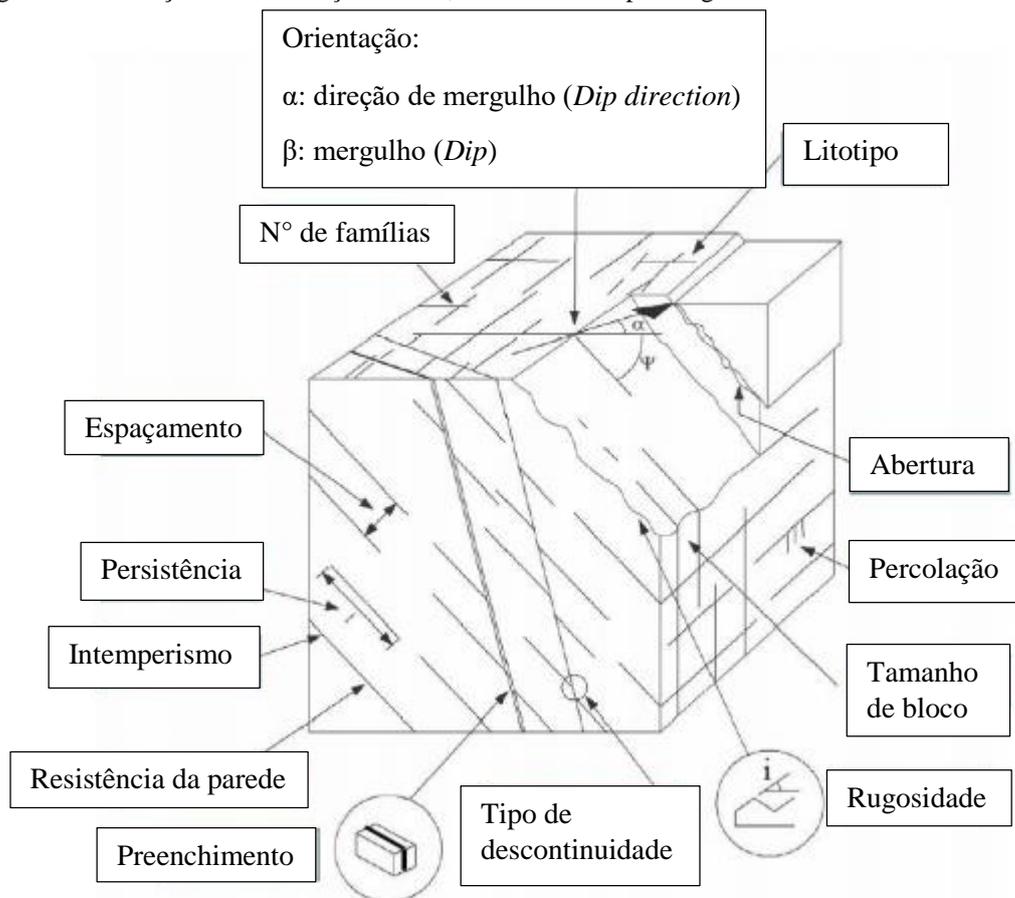
2.3.1 Sistema de Classificação Geomecânica (*Rock Mass Rating* - RMR)

Desenvolvido por Bieniawski em 1973, tal sistema foi amplamente difundido a nível mundial, sendo que diversos autores e profissionais utilizaram sua metodologia envolvendo túneis, minas, taludes e fundações. Para que o sistema de classificação geomecânica, ou RMR, seja realizado é necessário dividir o local de estudo em uma série de unidades geológicas e estruturais, de forma que cada tipo de maciço rochoso seja representado por uma unidade particular (Figura 4). As particularidades de cada unidade estrutural são medidas seguindo os seis parâmetros listados a seguir:

P1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

- P2. RQD (*Rock Mass Rating*)
- P3. Espaçamento das descontinuidades
- P4. Condição das descontinuidades
- P5. Condições da água no maciço
- P6. Orientação das descontinuidades

Figura 4 - Ilustração de um maciço rochoso, indicando os aspectos geomecânicos levantados em campo



Fonte: Neto (2019).

Para cada parâmetro é atribuído um valor, conforme suas características observadas em campo, segundo as condições que melhor o representam a soma de todos os parâmetros fornece o índice RMR.

$$\mathbf{RMR = P1+P2+P3+P4+P5+P6}$$

Após os ajustes para a orientação das descontinuidades, o maciço rochoso é classificado, onde são apresentadas as classes do maciço rochoso conforme os valores de RMR e suas principais características (Quadro 5).

Quadro 5 - Classes do maciço rochoso e suas características

Faixa	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha regular	Rocha pobre	Rocha muito pobre
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

Fonte: Modificado de Bieniawski (1989).

P1 - Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

A resistência do material rochoso na classificação RMR é determinada pelos valores da resistência à compressão uniaxial, sendo obtidos através da utilização do martelo geológico *in situ*, sendo um teste fácil, rápido, barato e confiável (YAGIZ, 2008).

Na determinação das propriedades da rocha, é essencial o trabalho em campo para determinar a resistência dos materiais rochosos (Bieniawski, 1974). O grau de consistência, a resistência e os índices físicos são estimados com base na apreciação táctil-visual das características de resistência ao impacto, trabalhabilidade do material e estimativa da resistência à compressão simples, através de ensaios de martelo geológico realizados em campo.

O valor obtido é posteriormente relacionado com a resistência à compressão uniaxial (Quadro 6).

Quadro 6 - Classificação de resistência à compressão uniaxial

Parâmetro		Variações						
Resistência	Estimativa de campo	Amostra não quebra após sucessivos golpes de martelo geológico;	Amostra quebra após muitos golpes de martelo geológico;	Amostra quebra com mais de um golpe de martelo geológico;	Amostra quebra com um único golpe de martelo geológico;	Amostra é marcada pela ponta do martelo geológico;	Amostra é marcada por canivete;	Amostra é marcada pela unha;
	Compressão Uniaxial (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1

Fonte: Hoek et al. (2002).

P2 - Rock Quality Designation (RQD)

Este parâmetro é um índice modificado de recuperação de testemunhos de sondagem, que leva em consideração o padrão de fraturamento da rocha.

O RQD é obtido a partir da divisão do somatório do comprimento dos testemunhos com comprimento maior que 10 cm, pelo comprimento total do furo ou da manobra, expresso em porcentagem.

Em situações que não existem sondagens disponíveis, o método não deixa de ser aplicável. Outros autores trabalharam em elaborar formas diferentes para determinação do RQD. Um desses autores foi Palmstrom (1982), que sugeriu estimar o valor de qualidade da rocha por meio do número de descontinuidades por metro. Para sua execução é necessário que as descontinuidades estejam em superfícies de afloramentos de maneira visível e passível de mapeamento (Quadro 7).

O RQD sozinho não é suficiente para gerar uma descrição adequada do maciço rochoso, uma vez que ele não considera a orientação das juntas, a abertura, o preenchimento, a rugosidade, a alteração, como também não considera as características da rocha intacta e a presença de água. O grande problema do RQD é a dificuldade em obter a orientação relativa das descontinuidades e do furo.

Quadro 7 - Classificação do RQD

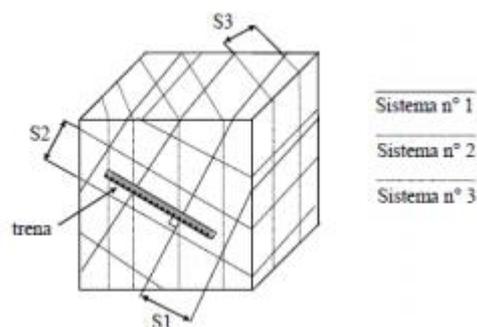
RQD				
Condição Geral	Estimativa de Campo	Valor em %	Peso	Qualidade da Rocha
Intacta	0 -1 Fraturas por metro de talude	90-100	20	Excelente
Pouco Fraturada	2-5 Fraturas por metro de talude	75-90	17	Bom
Fraturada	6-10 fraturas por metro de talude	50-75	13	Fraco
Muito Fraturada	11-20 Fraturas por metro de talude	25-50	8	Pobre
Fragmentada	>20 Fraturas por metro de talude	<25	3	Muito Pobre

Fonte: Hoek et al. (2002).

P3 - Espaçamento das descontinuidades

O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes, caracterizadas pela mesma família (Cavalcante, 1997). Deste modo, o espaçamento é responsável por condicionar o tamanho dos blocos, ou seja, um pequeno espaçamento corresponde a um fraturamento intenso, que por sua vez faz com que o maciço tenha características próximas a de um material granular. Para ser quantificado, é feito uso de uma trena graduada (Figura 5).

Figura 5 - Desenho esquemático indicando três diferentes famílias de descontinuidades, e a forma de como é medido o espaçamento, através de uma trena



Fonte: Retirado de Cavalcante (1997).

O espaçamento pode ser classificado com a atribuição de pesos para classificação das descontinuidades (Quadro 8).

Quadro 8 - Classificação de espaçamento

Parâmetro	Variações				
Espaçamento da descontinuidade	>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm
Peso	20	15	10	8	5

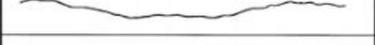
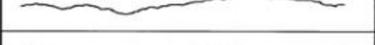
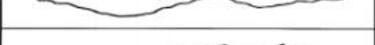
Fonte: Modificado de Bieniawski (1989).

P4 - Condição das descontinuidades

A presença de descontinuidades pode ter efeito dominante sobre a resposta do maciço rochoso em função das atividades mineiras (Brady & Brown, 1992), vindo a interferir na geometria, leiaute da mina ou até mesmo em inviabilizar algum projeto. Com isso, torna-se necessário a caracterização de propriedades mais importantes das descontinuidades que, segundo Brady & Brown (1992), podem vir a influenciar o comportamento de engenharia da massa rochosa, sendo essas discutidas brevemente a seguir.

Rugosidade: é representada pela irregularidade e/ou ondulações inerentes à descontinuidade em relação ao seu plano médio, podendo indicar características desde recortadas a planas (Brady & Brown, 1992; Quadro 9).

Quadro 9 - Características da rugosidade e nomenclaturas sugeridas

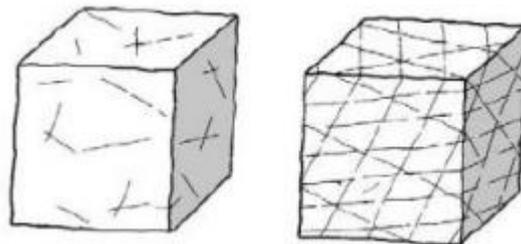
	ASPECTO	PESO RELATIVO
	ESTRIADO	0
	ESTRIADO	0
	LISO	1
	LISO	1
	POUCO RUGOSO	4
	POUCO RUGOSO	4
	RUGOSO	5
	RUGOSO	5
	MUITO RUGOSO	6
	MUITO RUGOSO	6

0 5 cm 10

Fonte: Modificado de Bieniawski (1989).

Persistência: se refere à extensão do traço de uma descontinuidade em relação ao plano. Para taludes em rocha, estimar a persistência é de extrema relevância, pois apresentam grande influência na resistência ao cisalhamento desenvolvida nos planos das descontinuidades e nas características de fragmentação do maciço (Brady & Brown 1992; Figura 6).

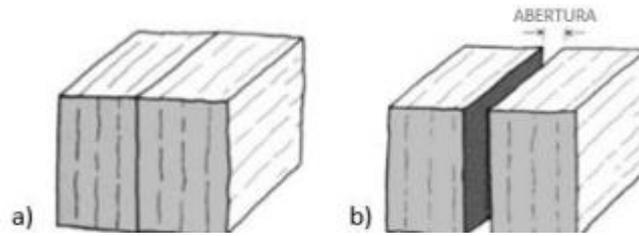
Figura 6 - Blocos esquemáticos ilustrando a persistência das descontinuidades



Fonte: Brady & Brown (1992).

Abertura: espaço entre descontinuidades, podem ser abertas ou não, sendo medidas a dimensão da abertura em relação à perpendicular aos planos das fraturas (Brady & Brown 1992; Figura 7).

Figura 7 - Bloco esquemático ilustrando descontinuidades em A) fechada; B) aberta



Fonte: Modificado de Brady & Brown (1992).

Alteração: é a identificação das paredes das juntas, onde elas podem ser inalteradas, pouco alteradas ou muito alteradas e quanto a presença ou não de preenchimentos consolidados ou macios (NETO, 2019).

Preenchimento: é descrito pelas características geológicas dos preenchimentos, quando há um material que separa as paredes das descontinuidades. Geralmente este material é mais fraco do que a rocha que o deu origem (CAVALCANTE, 1997).

P5 - Condições da água no maciço

A água detém papel importante na estabilidade de taludes de mineração. A presença de água produz, de maneira geral, um efeito adverso na estabilidade dos taludes, diminuindo a resistência das descontinuidades e incrementando a decomposição química das rochas, o qual também reduz a resistência do maciço rochoso (NETO, 2019). O Quadro 10 mostra o peso atribuído ao maciço de acordo com a presença de água.

Quadro 10 - Parâmetro de presença de água

Parâmetro	Variações				
	Seco	Úmido	Molhado	Pingando	Fluindo
Presença de água no Maciço					
Peso	15	10	7	4	0

Fonte: Modificado de Bieniawski (1989).

P6 - Orientação das descontinuidades

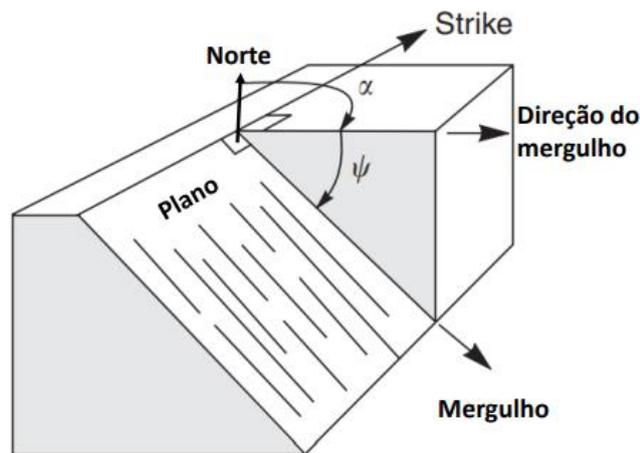
A orientação das descontinuidades no espaço é definida através da medida de sua atitude (Figura 8). A coleta de informações sobre a orientação é feita no modelo de Mergulho/Direção, sendo que o mergulho varia de 0 a 360, enquanto que o ângulo da direção do mergulho pode variar de 0 a 90 graus. Obter a atitude das descontinuidades é de grande relevância, uma vez que elas definem o formato dos blocos, além de serem as

responsáveis por controlar os possíveis mecanismos de ruptura presentes nos taludes rochosos (DE SOUZA,2019).

Mergulho (*dip*): é a inclinação máxima do plano da descontinuidade em relação à horizontal;

Direção do mergulho (*dip direction*): é o ângulo medido a partir do norte em sentido horário (azimute).

Figura 8 - Orientação das descontinuidades mergulho e direção de mergulho



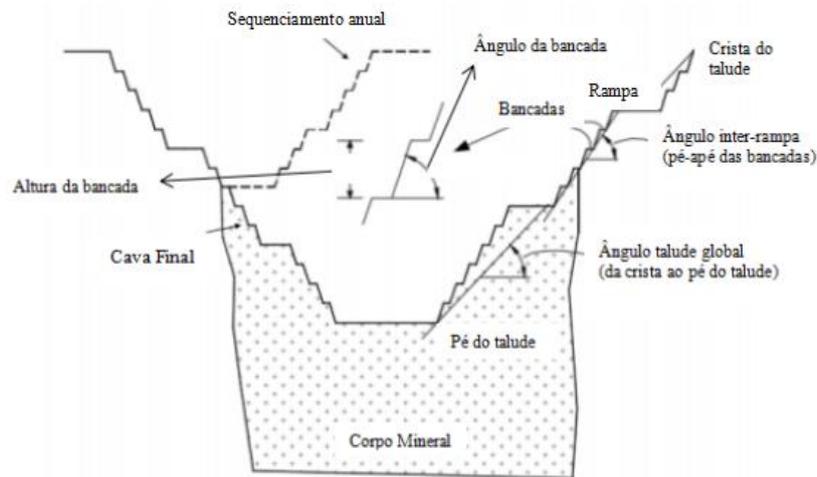
Fonte: Koerich (2019).

2.4 Geometria dos Taludes

Segundo De Souza (2019), a conformação geométrica de um talude depende basicamente da forma em que se encontra o corpo mineral a ser lavrado, juntamente com as características geomecânicas do maciço rochoso. O cenário econômico atual, também influencia na geometria de uma cava, uma vez que quanto mais íngreme for um talude, menor é a remoção de estéril, com isso, o custo de extração se torna ainda menor.

Entretanto, escavações a céu aberto cada vez maiores, somadas ao acréscimo no ângulo de taludes, geram um aumento do risco de instabilidade, tornando necessárias análises não somente em nível global, como também em níveis de rampa e interrampa (DE SOUZA, 2019; Figura 9).

Figura 9 - Configuração geométrica dos taludes de uma cava a céu aberto



Fonte: Modificado de Hauallanca (2004).

2.4. Métodos de Análise de Estabilidade

Segundo Hoek (2009) o bom design de uma escavação a céu aberto deve estar atrelado à segurança, sem deixar de avaliar quesitos como eficiência operacional e econômica. Frente a isto, a gestão em termos de estabilidade dos taludes deve ser feita de forma contínua, tendo início na elaboração dos projetos que buscam determinar a geometria da cava e ao longo de todo processo de extração do recurso mineral. Há diversas formas e recursos usados nas avaliações em termos de estabilidade dos taludes, como as análises empíricas, ábacos de estabilidade, modelos numéricos, análises probabilísticas, análises cinemáticas, modelos analíticos, dentre outros.

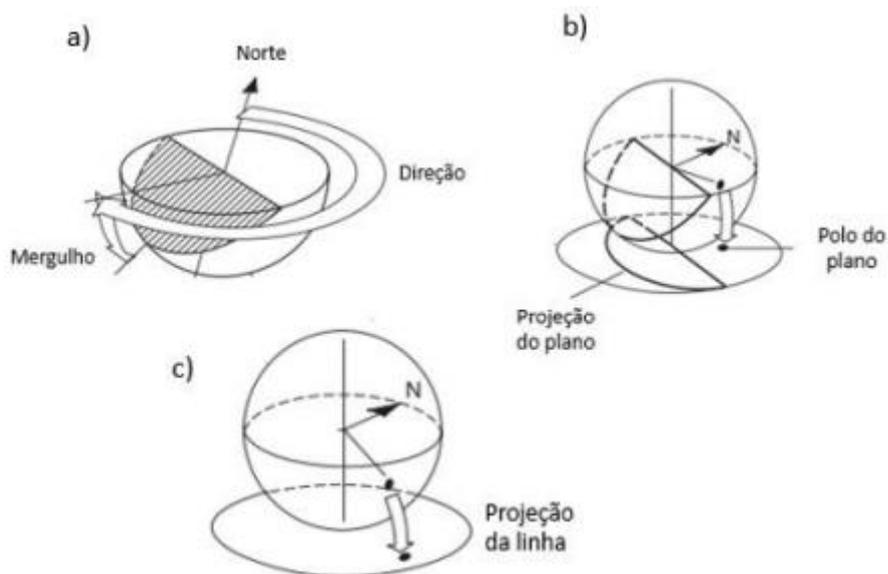
2.5 Análise dos Métodos Cinemáticos

As análises cinemáticas correspondem a uma das formas mais simples de avaliar os mecanismos de ruptura aos quais o maciço se encontra submetido, além de contribuir no cálculo da análise de estabilidade.

Para tal, faz-se uso das projeções estereográficas que permitem representar dados de orientação das descontinuidades em duas dimensões. As projeções são feitas em uma esfera de referência, na qual o plano equatorial é horizontal e as direções fixadas em relação ao norte (Figura 10). Como mencionado por Duncan & Christopher (2005), quando este plano intercepta a parte inferior da esfera, tem-se então uma projeção em

formato de linha na superfície do hemisfério de referência, que no caso das linhas, a projeção corresponde a um ponto.

Figura 10 - Projeção estereográfica indicando como são representadas as orientações das estruturas



Fonte: Modificado de Duncan & Christopher (2005).

Para se realizar a análise de estabilidade de um talude, primeiramente é necessário determinar as famílias de descontinuidades e o modo potencial de ruptura do talude. Os modos de ruptura estão associados a diferentes estruturas geológicas, como fraturas, falhas e descontinuidades. Avaliar criteriosamente as condições destas estruturas e da face do talude é muito importante para que o projetista possa reconhecer o potencial de ocorrência de problemas com a estabilidade do talude, durante os estágios iniciais do projeto. Os modos rupturas condicionados pela estrutura podem ser classificados em quatro tipos principais, conforme Hoek & Bray (1981):

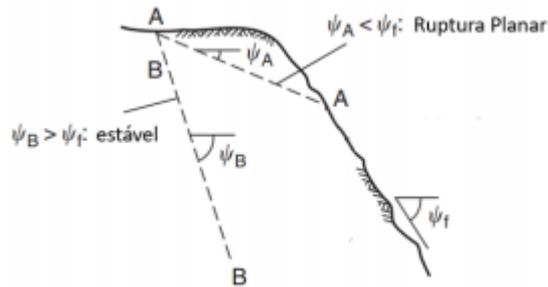
Ruptura planar

Segundo Duncan & Christopher (2005), as rupturas planares ocorrem quando a direção do plano da descontinuidade é aproximadamente paralela a face do talude, tendo uma diferença inferior a 20° , neste caso há um aumento da espessura de rocha intacta em uma extremidade do bloco, fazendo com que o mesmo tenha força suficiente para resistir ao deslizamento.

Outra premissa para que ocorra a ruptura planar é que o ângulo de inclinação da descontinuidade deve ser menor que o ângulo da face do talude, permitindo que o material acima daquele deslize por gravidade. Segundo De Souza (2019) as rupturas planares

podem movimentar milhares de metros cúbicos em uma só ruptura, porém para que isto ocorra é obrigatória a existência de descontinuidades laterais que permitam o desprendimento do bloco, além de ser necessário que essas estruturas aflorem, com o ângulo de inclinação do plano de deslizamento maior que o ângulo de atrito do mesmo plano (Figura 11).

Figura 11 - Perfil esquemático indicando o mecanismo de ruptura planar



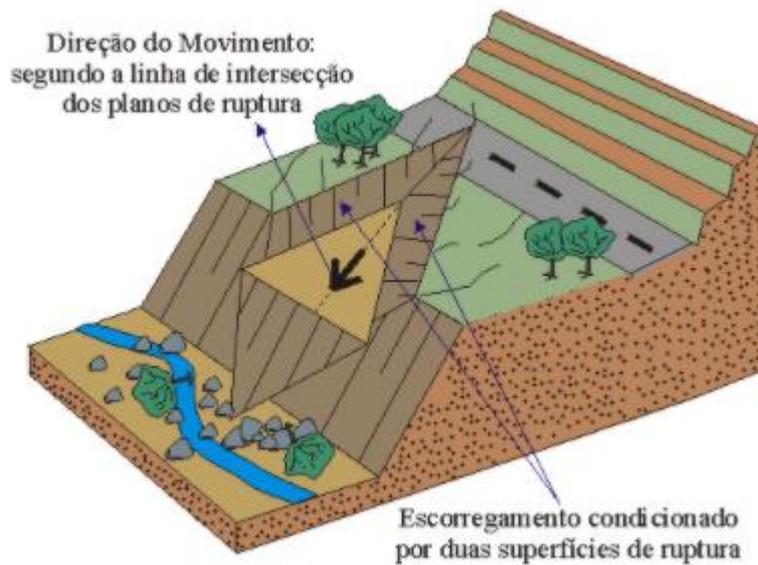
Fonte: Modificado de Duncan & Christopher (2005).

A figura 10 representa o perfil indicando o mecanismo de ruptura planar formado pela descontinuidade AA, onde o ângulo da descontinuidade (ψ_A) é menor que o ângulo da face do talude (ψ_f).

Ruptura em cunha

Para que isto ocorra, é necessária a existência de dois planos de descontinuidades com direções opostas, em que, segundo Fiori & Carmignani (2009), a linha formada pelo encontro dos dois planos deve aflorar na superfície do talude, tendo um ângulo de inclinação maior que o ângulo de atrito das descontinuidades (Figura 12). Dessa forma, nota-se que não há limite de tolerância da direção da descontinuidade em relação à direção da face do talude, como é nas rupturas planares, uma vez que o deslizamento é comandado pelo confinamento lateral imposto pelas próprias descontinuidades.

Figura 12 - Mecanismo de ruptura por cunha

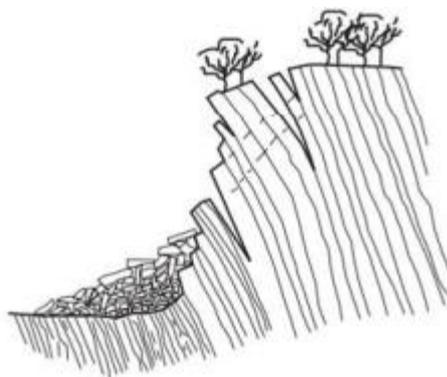


Fonte: Modificado Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998.

Ruptura por tombamento

Para De Souza (2019), a ruptura de tombamento é melhor observada em maciços rochosos cujas descontinuidades são bem desenvolvidas, como por exemplo, onde há planos de foliações bem persistentes. Quando essas estruturas apresentam direções paralelas o, subparalelas à direção da face de um talude, o ângulo de mergulho é elevado e a estrutura mergulha para o interior da face do talude, possibilitando dessa forma o tombamento de blocos (Figura 13). Segundo Pereira (2012), a principal característica dos tombamentos é o colapso progressivo do material rochoso do talude, além do fato de que quando a ruptura ocorre no pé do talude, há a possibilidade de desencadear rupturas secundárias.

Figura 13 - Bloco esquemático indicando a condição de tombamento



Fonte: Modificado de Duncan & Christopher (2005).

Ruptura circular

A ruptura circular (Figura 14) é mais frequente em solo, porém também pode ocorrer em rocha quando se tem um maciço rochoso muito fraturado pois, devido ao grande número de estruturas, o maciço passa a ter comportamento homogêneo e isotrópico. Pereira (2012) diz que a ruptura circular também pode ocorrer quando o maciço se encontra muito intemperizado, pois neste caso as descontinuidades já não são relevantes, devido à baixa resistência oferecida pela rocha alterada. A superfície de deslizamento na ruptura circular é muitas vezes visível ou inferida nas análises, podendo apresentar grande variação nas dimensões, movimentando desde poucos metros até grandes volumes de material.

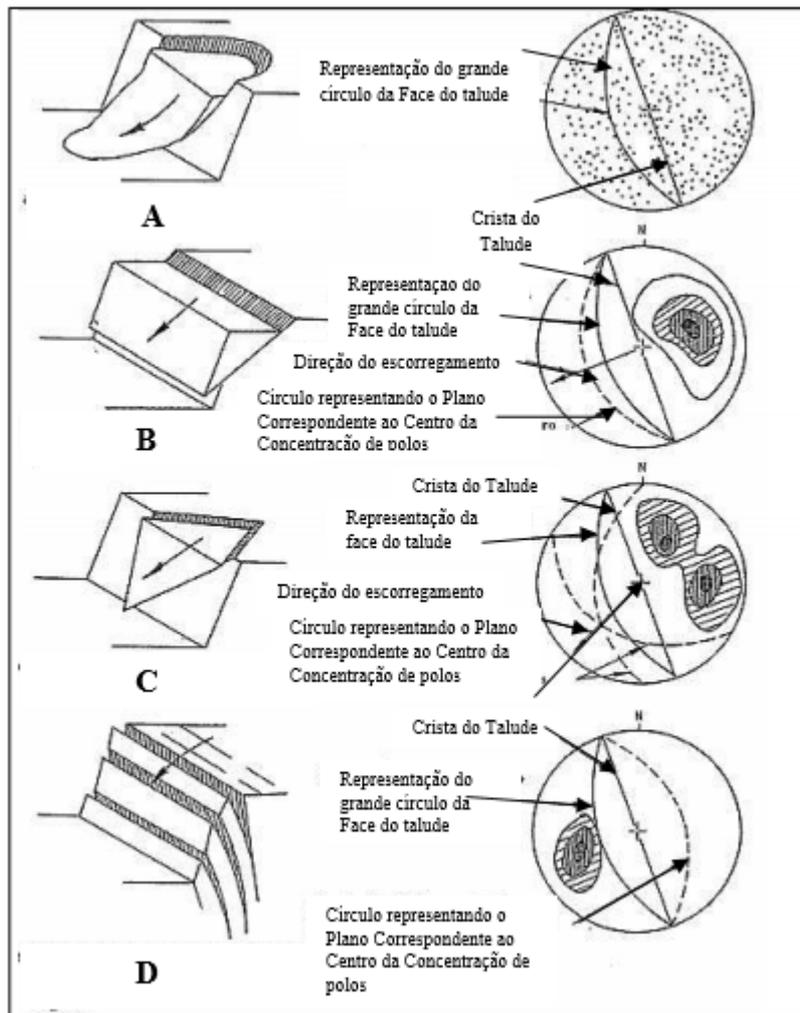
Figura 14 - Esquema de uma ruptura circular



Fonte: Modificado Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998.

A utilização de projeções hemisféricas permite a representação das relações geométricas entre o talude e as descontinuidades, promovendo a comunicação entre geólogos e engenheiros na busca de melhorar o entendimento e interpretação dos dados de um determinado talude.

Figura 15 - Em A) ruptura circular em solo, rocha muito alterada ou muito fraturada, sem modelo estrutural identificado; B) plano de ruptura em rochas com estruturas muito bem definidas; C) ruptura em cunha em duas interseções de descontinuidade; D) ruptura por tombamento em rocha dura na qual poderá formar estruturas colunares separadas por mergulhos de descontinuidades em degraus.



Fonte: Modificado de Hoek & Bray (1981).

3. ESTUDO DE CASO: PROJETO MINERAÇÃO CASA DE PEDRA

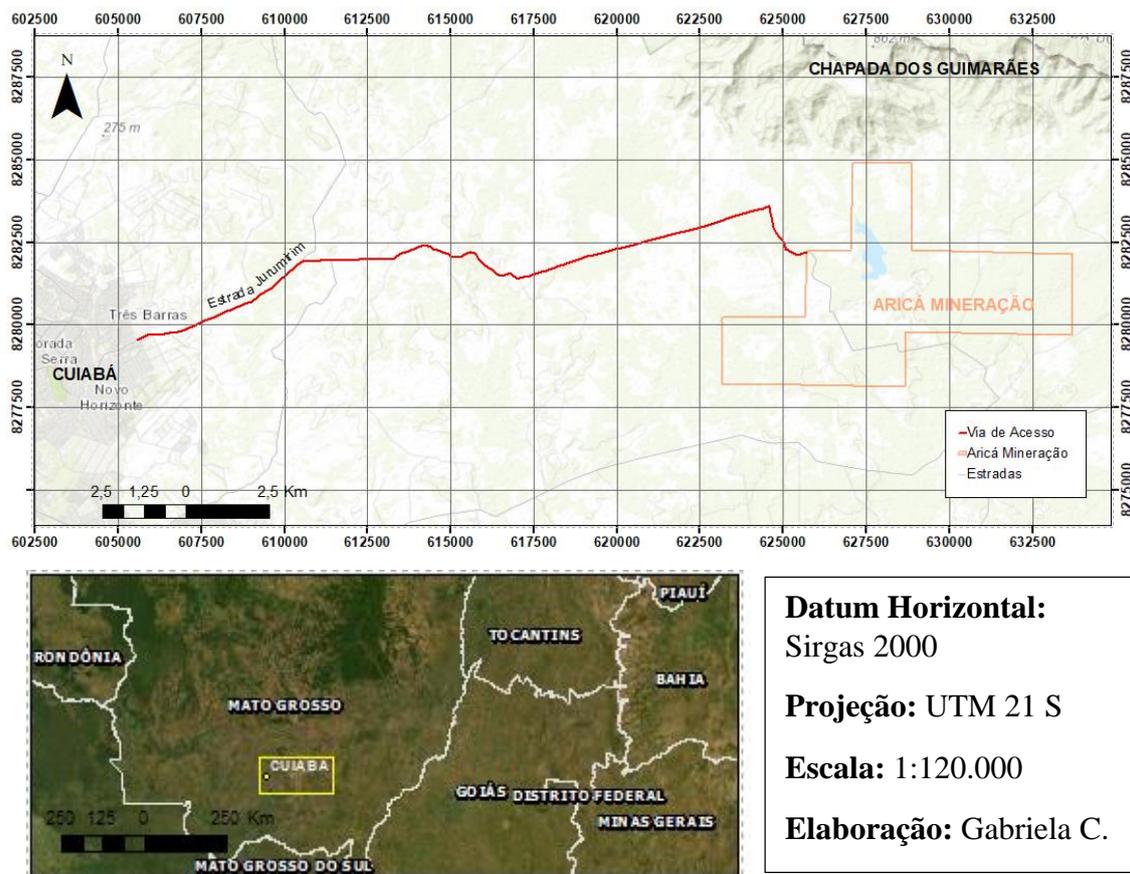
3.1 Descrição da área de estudo

A jazida Casa de Pedra é uma importante ocorrência de minério de ouro relacionado aos metassedimentos do Grupo Cuiabá na região da Baixada Cuiabana. Teve suas atividades garimpeiras iniciadas no período colonial, tendo um pico importante de produção nas décadas de 80 e 90 (Pinho, 1990). Atualmente a Aricá Mineração é detentora dos direitos minerários, sendo responsável pelos trabalhos de viabilização e produção deste minério.

Contextualizar a atividade garimpeira ao longo de toda essa região se torna uma atividade de grande relevância para o presente trabalho, uma vez que a Casa de Pedra se encontra locada sobre um antigo garimpo.

O principal acesso se dá pela Estrada Coxipó do Ouro passando pelo bairro Dr. Fábio Leite e pelo Residencial Lagoa Azul onde podemos acessar a Estrada Jurumirim, percorrendo-se cerca de 25 km até a área da mineradora (Figura 16).

Figura 16 - Mapa de localização do empreendimento



Atualmente a mina encontra-se regionalizada em cavas, que estão em processo de desenvolvimento e lavra (Figura 17). O estudo é direcionado à Cava Sucuri onde a foliação proeminente do filito é a principal descontinuidade condicionante para os deslizamentos dos taludes da mina.

Figura 17 - Disposição da cava em estudo (Cava Sucuri)



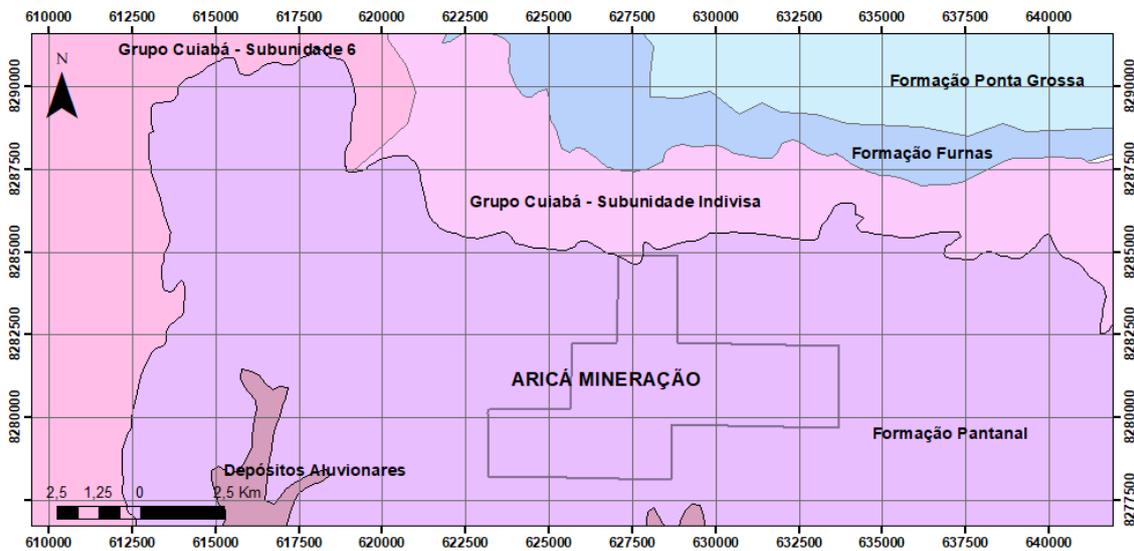
Fonte: Google Earth – 2021.

3.2 Geologia Regional

O Grupo Alto Paraguai corresponde a uma pilha de sedimentos que ocorrem na porção setentrional da Faixa de Dobramentos Paraguai, recobrando discordantemente os metamorfitos do Grupo Cuiabá. Ocorre sob a forma de um cinturão móvel ou faixa de dobramentos, exibindo transporte tectônico em direção ao Cráton Amazônico. Está localizado na porção meridional de Mato Grosso, principalmente na região drenada pelo alto curso do Rio Paraguai, onde apresenta sua seção completa. Distribui-se ao longo de uma faixa arqueada, com concavidade voltada para sudeste, que se limita ao norte com o Planalto dos Parecis; e, ao sul, com os terrenos baixos do Grupo Cuiabá e com as planícies dos pantanais matogrossenses.

As rochas do Grupo Cuiabá apresentam-se, ao longo de toda a extensão da baixada Cuiabana, com relevo bastante arrasado. Sobre as rochas deste grupo destaca-se a foliação principal Sn com direção NE e mergulhos de alto ângulo para SE e NW, que passam para médio ângulo na porção SE da Baixada Cuiabana. Esta foliação é uma clivagem ardósiana, observada em todos os litotipos e ao longo de toda a área.

Figura 18 - Mapa geológico do empreendimento em escala de 1:200.000 – SIRGAS 2000 – PROJEÇÃO UTM 21 S



Fonte: Elaborado pela autora.

Na baixada cuiabana existem diversos trabalhos no quais alguns autores defendem 3 fases de deformação e outros autores como Silva (2002), Costa *et al.* (2015), Alvarenga e Trompette (1993), descrevem 4 fases de deformação, porém atribuídas ao ciclo brasileiro. A fase D1 na zona externa com dobras abertas simétricas à assimétricas e clivagem incipiente, na zona interna com dobras fechadas com foliação plano axial S1 com D1, inversas e isoclinais com eixos das dobras com caimento menor ou igual 15NE por vezes para SW.

Silva *et al.* (2002) destaca como sendo a principal estrutura a foliação S_n com direção NE e mergulho com alto ângulo para SE e NW, e médio ângulo na parte SE da baixada cuiabana. Em D_n (dobras) ocorre o dobramento do acamamento sedimentar e a formação de lineações de estiramento e lineação de intersecção entre o S₀ (acamamento sedimentar) e S_n (foliação), simultâneo a este evento D_n, ocorre o metamorfismo regional na facie xisto verde na zona da clorita e biotita. O evento caracterizado como D_{n+1} e D_{n+2} é evidente clivagens de crenulação, sendo S_{n+1} com mergulho suave com caimento para NW e S_{n+2} com mergulho médio a alto e com caimento para SE, já na fase D_{n+3}, as estruturas geradas são dobras suaves com o plano axial com mergulho íngreme para NE ou SW e paralelos ao fraturamento (Silva, 2002). Ainda segundo Silva (2002), são classificados os veios de quartzo em relação a sua posição com S₀ e S_n caracterizando 3 tipos de veios, sendo os veios subparalelos a paralelos ao S₀ como sendo Tipo 1, geralmente estão dobrados e foliação plano axial com S_n predominantemente composto

por quartzo leitoso, os veios Tipo 2 são paralelos a S_n , e o Tipo 3 são perpendiculares cortando a foliação principal S_n e com mergulho íngreme para NE ou SW. Partindo das análises feitas com base na estrutura principal no trabalho de Costa (2014) traz uma compilado com os comparativos de outros autores em relação ao número de eventos deformacionais que cada autor (Quadro 11).

Quadro 11 - Relação Autores x Fase de deformação

Autor(es)	Fases de deformação				
Luz <i>et al.</i> 1980	D1	D2		D3	
Pires <i>et al.</i> 1986		D1		D2	D3
Del Rey Silva (1990)	D1	D2		D3	D4
Alvarenga e Trompette (1993)		D1	D2	D3	D4
Silva (1999)		D_n	D_{n+1}	D_{n+2}	D_{n+3}
Barboza (2008)		D_n	D_{n+1}		D_{n+2}

Fonte: Modificado Costa 2014 e modificado de Silva 1999.

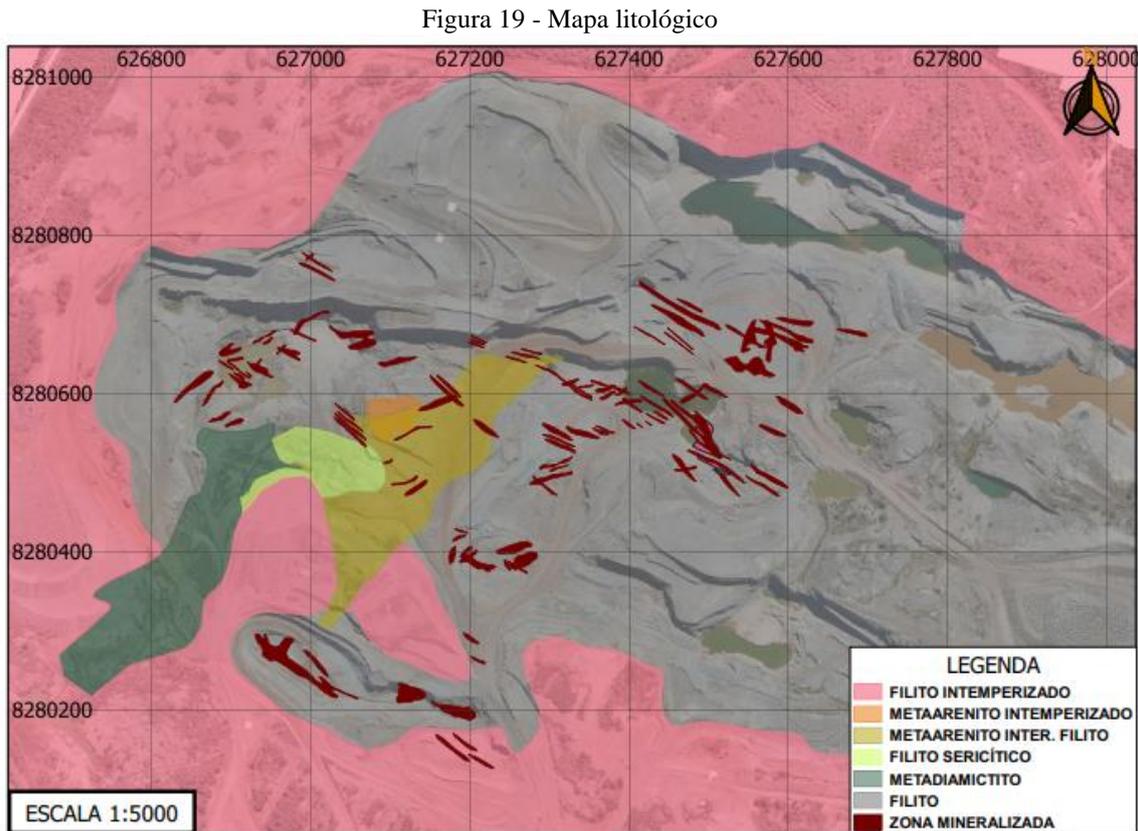
Na jazida de Casa de Pedra ocorrem rochas do subunidade indivisa descrita em Luz *et al.* (1980) e aquele correspondem à unidade de fácies distal de acordo com Alvarenga *et al.*(1990). Em geral, esta subunidade é composta por metadiamicritos, quartzitos, metasandito, metassiltitos e filitos sericíticos.

A Formação Pantanal manifesta-se como uma extensa cobertura arenosa que recobre a porção interiorana das depressões do Alto Paraguai e do Cuiabá. Para leste, os sedimentos pantanal estendem-se até as faldas da Serra de São Jerônimo, onde ruptura de relevo está presente ao longo de quase toda borda oriental da Bacia do Paraná, com direção contínua norte-sul, evidenciando controle estrutural através das escarpas estruturais de recuo de linhas de falha. Nesta porção da bacia, formas residuais edificadas sobre a Formação Furnas, são encontradas no interior da planície pantaneira, em posição rebaixada em mais de 200 m, também evidenciando controle estrutural nos limites orientais da bacia, com abatimento da porção deprimida.

Na bacia do rio Aricá Açu, no local delimitado para a pesquisa em questão o Grupo Cuiabá está constituído por filitos, contendo intercalações de quartzitos, metarenitos, metarcóseos, metassiltitos, às vezes dobrados.

3.3 Geologia da Mina Casa de Pedra

Na Casa de Pedra, as rochas hospedeiras do minério são representadas principalmente por uma camada de filitos sericíticos com níveis de cinza escuro alternando com níveis esbranquiçados circundados por metadiamicritos acinzentados. Estes podem apresentar-se fortemente foliados e, localmente, crenulados (Figura 19).



Fonte: Aricá Mineração.

Os filitos geralmente apresentam aspecto ardosiânico e ocorrem intercalados com camadas de outros litotipos, contudo, mais frequentemente com metarenitos. Localmente, ocorrem dobras métricas a hectométricas que refletem as grandes estruturas em antiformais e sinformais presentes na região

Quando intemperizados, os filitos sericíticos, principal rocha hospedeira de o minério, adquire tons avermelhados de vinho tornando-o semelhante a metassiltitos. A paragênese mineral associada ao minério inclui quartzo, albita, ortoclase, clorita, biotita, branco mica, carbonatos. Os sulfetos são representados principalmente por pirita, calcopirita, galena e óxido; hematita também foi identificado. Os nódulos carbonáticos descritos em rochas hospedeiras de as veias auríferas Cangas também estão presentes na

Casa de Pedra, e todo o pacote está em um avançado processo de intemperismo. O contato dos filitos sericíticos com o metadiamicitites é gradacional.

Os metadiamicitites têm matriz arenosa onde fragmentos de granitos com arenitos, quartzitos, granitos, calcários e quartzo. Embora não seja vistos como hospedeiros de minério na jazida de ouro de Casa de Pedra, relatórios de uma fazenda vizinha apontam que metadiamicitites também hospeda veios ricos em ouro.

Os metarenitos são predominantemente ortoquartzíticos e, subordinadamente, quartzo-feldspáticos a arcoseanos e, mais raramente, micáceos. Apresentam granulometria variável de fina a grossa e, localmente, microconglomerático a conglomerático. Apresentam tonalidades esbranquiçadas a acinzentadas quando fresco, e amarelada a avermelhada quando alterados. No geral, são rochas muito alteradas e friáveis, entretanto, localmente são silicificados, quando adquirem aspecto de quartzitos. Este litotipo apresenta foliação penetrativa, sempre intercalados com camadas de filito. Frequentemente os metarenitos e os filitos estão cortados por uma profusão de vênulas e veios de quartzo, que localmente atingem espessuras métricas. Estas vênulas e veios orientam-se, grosso modo, concordantes a subconcordantes com a foliação geral e, aparentemente, estão associados, com maior frequência, aos metarenitos.

A mineralização aurífera está intimamente associada aos veios de quartzo nos níveis inferiores do perfil de alteração, tomando-se mais espalhada nos níveis superiores, à medida que a desagregação dos veios avança.

Os solos são geralmente muito rasos, entre 0,1 e 1,0 m argilosos e argilo-arenosos, amarelados e avermelhados, frequentemente muito cascalhentos, ricos em fragmentos de quartzo angulosos e, localmente, muito laterizados e/ou associados à crosta laterítica ferruginosa. Erosão concentrada é desencadeada quando ocorre remoção da crosta laterítica, normalmente utilizada como material de empréstimo para cascalhar estradas.

4. METODOLOGIA

A metodologia consiste no desenvolvimento de quatro etapas, que servirão de base para os resultados obtidos nesta monografia:

Etapa 1 – Levantamento bibliográfico utilizado para determinação dos parâmetros de resistência de maciços rochosos e os principais conceitos que embasaram os estudos realizados de análise cinemática dos taludes. Posteriormente foram levantados

os dados de localização da Mina e vias de acesso. Foram levantados ainda dados sobre a geologia regional da região, bem como o contexto da Mina em relação a geologia local, imagens de satélite e mapas geológicos disponíveis. Nessa etapa se definiu os detalhes de planejamento dos trabalhos de campo.

Etapa 2 – Foi realizada o trabalho de campo como parte do reconhecimento para aquisição de dados geológicos e geotécnicos, com a autorização da empresa detentora do empreendimento mineiro, seguindo as normas internas de segurança. Nesta etapa as características geológicas e geomecânicas da mina foram levantadas para conhecimento do maciço rochoso. Foram utilizados como instrumentos, além dos equipamentos de segurança pessoal, trena; martelo de geólogo e canivete (utilizados para avaliar a resistência da rocha); bússola (utilizada para obter as atitudes das estruturas); caderneta de campo e escala.

No mapeamento de campo foram avaliadas e registradas as características geomecânicas do maciço (pela Classificação Geomecânica RMR), e foi realizado o mapeamento geológico e geomecânico do talude sul da cava Sucuri, identificando os litotipos e estruturas geológicas existentes e suas principais características.

Foram anotados os dados no cabeçalho da planilha de campo sobre as informações gerais da seção que estarão sendo mapeada:

- Data do levantamento
- Região da Mina ou Setor
- Identificação do Ponto

Os dados referentes às descontinuidades foram coletados através de *scan line* (Figura 20) em trecho avaliado como representativo dos domínios estruturais. Este método consiste em colocar uma fita graduada paralela a face exposta do talude, em que são medidas as atitudes de todas as descontinuidades que a intersectam, e descritos os parâmetros necessários para classificação do maciço, que seguiram as nomenclaturas propostas por Bieniawski (1989).

Figura 20 - Scan line para determinação de parâmetros RMR



Fonte: Arquivo pessoal.

Etapa 3 – Organização e análise de dados, após obtenção em campo. Os dados foram organizados em planilhas e lançados em projeção estereográfica, tendo suas frequências corrigidas de acordo com a orientação da linha de amostragem.

Foi feito então, a análise cinemática do talude operacional, com avaliação dos modos de ruptura potenciais, considerando os planos de descontinuidades identificados no maciço, analisado em campo, através do programa Dips 6.0. A resistência do maciço rochoso, foi determinada a partir do programa RocData.

Etapa 4 – Análise de resultados obtidos ao longo das etapas anteriores e conclusão do estudo de caso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização geológica-geotécnica

O talude Sul está localizado no limite de exploração da mina e suas coordenadas geográficas são $15^{\circ}33'9.35''S$ e $55^{\circ}48'58.07''O$. Foi selecionada uma extensão de aproximadamente 6 metros para a coleta de dados onde o talude possui altura 10 metros e inclinação de 52° (Figura 21). O maciço rochoso formador do talude é bastante fraturado

por toda a extensão do talude, apresentando continuidade em suas características. A rocha constituinte do maciço possui coloração cinza característica do filito que é a rocha encaixante.

Figura 21 - Vista do Talude Sul da Cava Sucuri, com seta indicando ponto de coleta de dados (scan line)



Fonte: Arquivo pessoal.

O maciço apresenta três famílias de descontinuidades, sendo duas do tipo fratura e uma família a foliação. O Talude Sul tem uma orientação de afloramento de 52/036. As famílias foram definidas estatisticamente utilizando o software Dips (Figura 21) e apresentam orientação média apresentada na tabela 1.

Figura 22 - Diagrama de frequência para as descontinuidades do Talude Sul

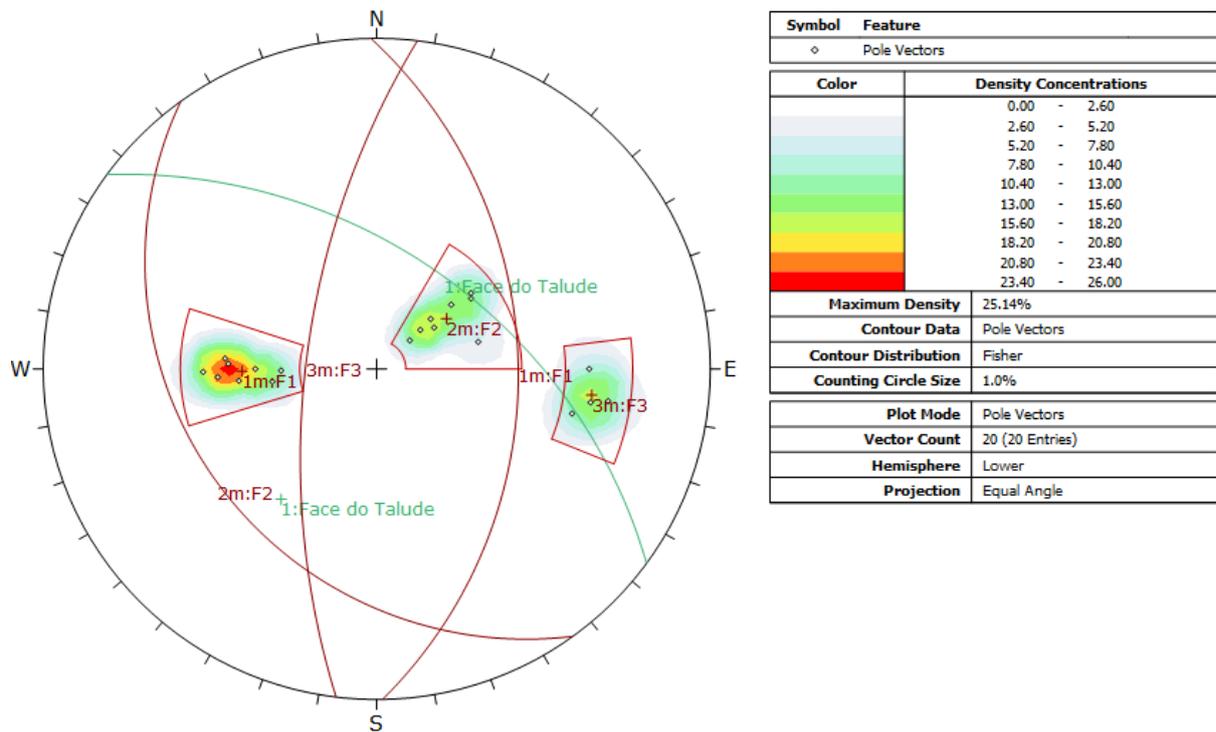


Tabela 1 – Orientações médias das famílias de descontinuidades

Nome da Família de descontinuidades	Sigla	Atitude média
<i>Família 1</i>	F1	40/73
<i>Família 2 (foliação)</i>	F2	331/35
<i>Família 3</i>	F3	114/81

Os resultados médios dos espaçamentos das famílias (1, 2 e 3) medidos são apresentados na Tabela 2. Com relação à persistência das descontinuidades, não foi possível determinar o comprimento exato, somente fazer uma estimativa pela fato das descontinuidades entrarem no maciço. Observou-se que a família 1 apresenta persistência média em torno de 3 metros, enquanto a persistência da família 2 e 3 está em torno de 1,5 metros.

Tabela 2 – Espaçamento média das famílias de descontinuidades

Família	Espaçamento médio (cm)
<i>Família 1</i>	32 cm
<i>Família 2 (foliação)</i>	60 cm
<i>Família 3</i>	43 cm

Não foi observado presença de água em nenhum ponto. Quanto ao restante dos parâmetros colhidos, todas as condições são expostas na Tabela 3 de acordo com suas respectivas famílias. Todas possuem características predominantemente parecidas, diferindo no quesito abertura e rugosidade.

Tabela 3 – Condição das descontinuidades do Talude Sul

	Família 1	Família 2	Família 3
<i>Abertura</i>	0,1 a 1mm	fechada	0,1 a 1mm
<i>Preenchimento</i>	sem preenchimento	sem preenchimento	sem preenchimento
<i>Rugosidade</i>	pouco rugosa	rugosa	rugosa
<i>Alteração da Parede</i>	muito alterado	alterado	muito alterada

O ensaio de resistência é de fácil execução por depender somente de martelo geológico, canivete e tato. É considerado um método muito subjetivo e susceptível à erros.

Em todas as famílias de descontinuidades foram encontrados valores semelhantes para a resistência do maciço com predominância para: as amostras quebram com mais de um golpe de martelo. De acordo com vários estudos presentes na literatura, a resistência à compressão do filito está em torno de 100 - 50 MPa, assim como foi constatado no teste efetuado. Diante disso, confirma-se, como os resultados deste teste são aceitáveis.

Para a determinação do RQD foram analisados os números de descontinuidades por metro, uma vez que a região de estudo não possui furos de sondagem. Foram observadas em média 5 fraturas para cada metro de talude analisado, deste modo o talude Sul pode ser classificado como Bom segundo as classes sugeridas, ou seja, está entre 75 – 90% do RQD.

5.2. Determinação do Índice RMR

O índice RMR foi determinado a partir dos parâmetros citados anteriormente. Como se trata de um somatório de pesos para cada descontinuidade, foi adotada a média para cada um dos parâmetros e os pesos e resultado são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Identificação do RMR

	Cenário estudado	Peso
<i>Resistência à compressão uniaxial</i>	Completamente seco	15
<i>RQD (Rock Mass Rating)</i>	Pouco fraturado	17
<i>Espaçamento das descontinuidades</i>	200 – 600 mm	10
<i>Condição das descontinuidades</i>	Superfície com separação	25
	< 1 mm muito alterada	
<i>Orientação das descontinuidades</i>	Desfavorável	-25
RMR	Classe III – Rocha Regular	42

Diante do que foi exibido acima e analisando a Tabela 4, o Talude Sul pode ser classificado como regular (Classe III) de acordo com o cenário escolhido. Nota-se que o principal fator responsável pela queda do RMR, está na condição das descontinuidades. Para o âmbito de projeto, quando não se dispõe de muitas informações, é interessante utilizar o RMR do pior caso, sendo assim mais conservador.

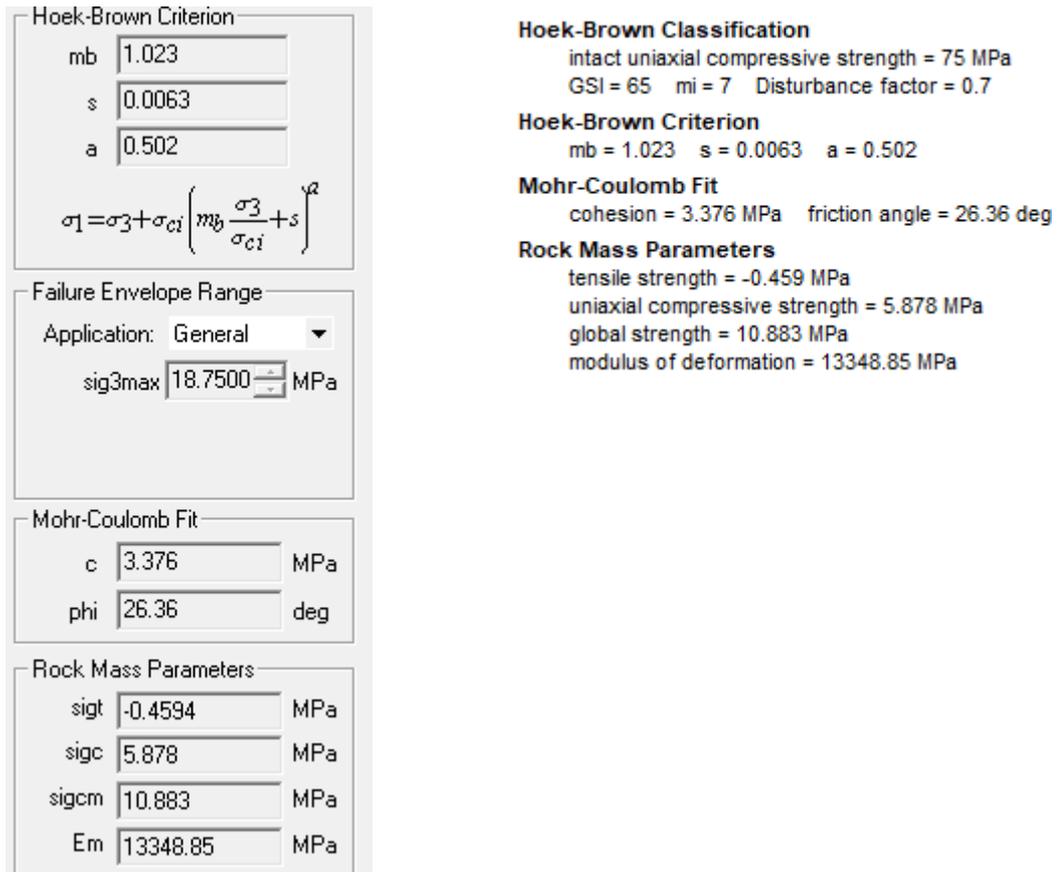
5.3 Critério de Hoek-Brown

O critério de Hoek-Brown estabelece quatro parâmetros para a determinação de resistência do maciço rochoso. A partir desse resultado, é possível estimar valores de ângulo de atrito e coesão, propostos pelo critério de Mohr-Coulomb. O *m* utilizado foi igual 7 uma vez que a rocha em estudo é o filito, o fator D foi igual à 0,7 pelo fato da escavação ser do tipo mecânica. Como o GSI é dado por uma faixa ou intervalo de valores, foi adotado um valor médio de 65 indicando um maciço fraturado com superfície em condições regulares. E por fim o parâmetro de resistência à compressão uniaxial da rocha intacta com o valor de 75 Mpa calculado a partir do número de golpes em rocha a partir

do uso de martelo de geólogo. Esse critério foi determinado a partir de uma análise no programa RocData, da Rocscience.

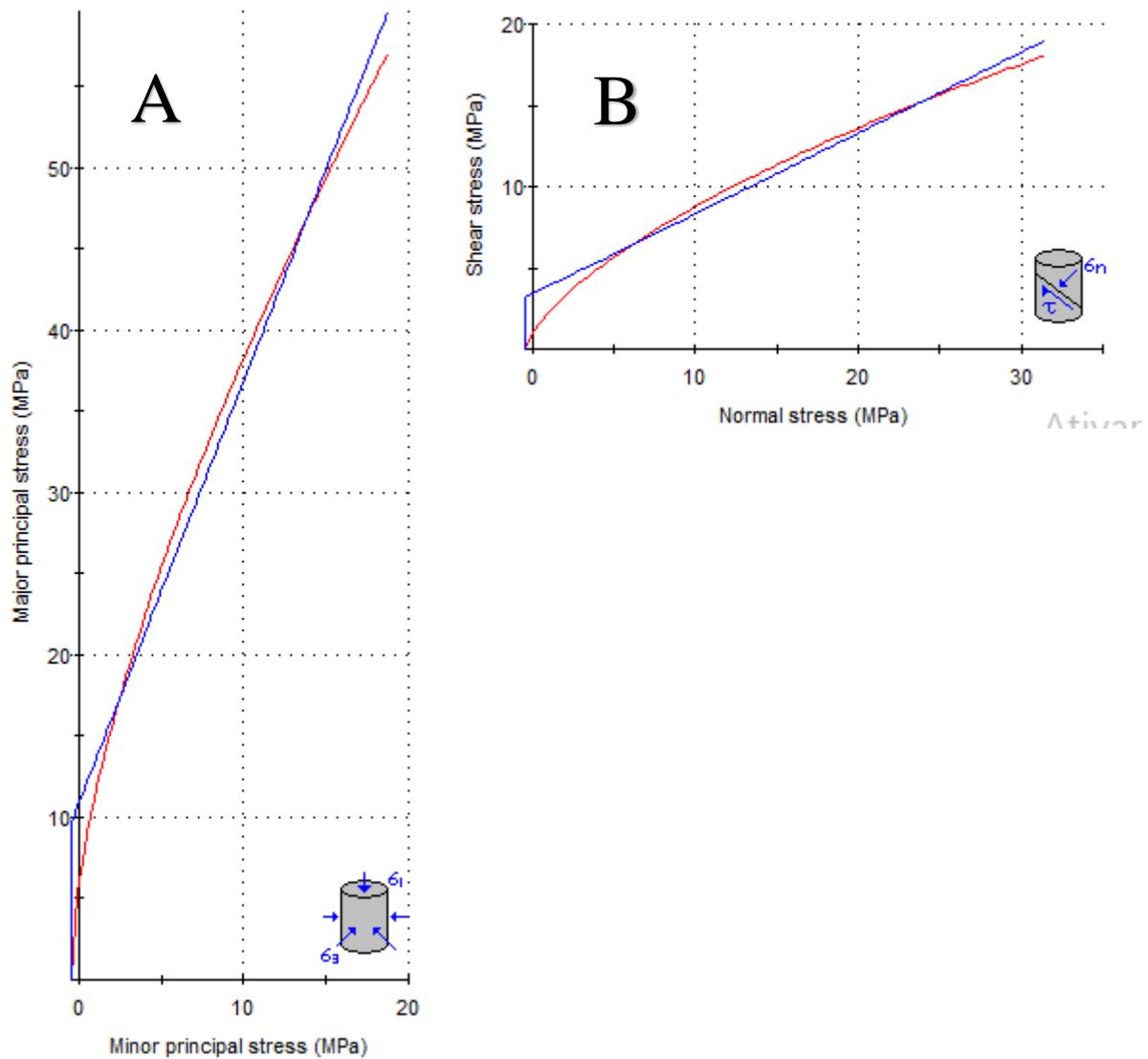
A partir dos parâmetros de entrada foram determinados os seguintes parâmetros de resistência: ângulo de atrito de 26,36° e coesão de 3.376 Mpa. Além dos parâmetros (mb, s, a) de Hoek-Brown (Figura 22).

Figura 23 - Critérios de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb para determinação de ângulo de atrito e coesão.



Através do software foram obtidas as curvas que representam as envoltórias de resistência do maciço, o que possibilita as análises de ruptura. As envoltórias são mostradas na Figura 24.

Figura 24 - Envoltórias de resistência de Hoek e Brown em vermelho e em azul resistência de Mohr-Coulomb: (a) tensão principal menor x tensão principal maior e (b) tensão de cisalhamento x tensão normal



5.4 Análise Cinemática

A principal motivação para realização de análises cinemáticas foi verificar o potencial de ruptura, sabendo que as características do filito são tipicamente de rocha dura e que nestes casos, a estabilidade dos taludes operacionais é condicionada pelos planos de fraturas.

As análises cinemáticas foram realizadas considerando a geometria de lavra da mina, para definição do talude operacional, e os dados obtidos no mapeamento geomecânico do talude Sul identificado na cava Sucuri. Foi definido o talude operacional, considerando a geometria de avanço da lavra na região da cava, com a base topográfica

atualizada de agosto/2021. Em seguida, foi extraído do mapa o azimuth de mergulho predominante no talude, e desta forma foi possível determinar a face do talude (52/036).

A análise foi conduzida no *software Dips 6.0* da *Rocscience* de forma determinística utilizando as orientações médias das descontinuidades para a família (1, 2 e 3), considerado um ângulo de atrito de 26° .

Pelas condições do talude e das famílias de descontinuidades, o resultado de probabilidade de ruptura significativa foi a ruptura planar com probabilidade de ruptura em 25%, enquanto para cunha e tombamento de blocos os modos de ruptura apresentam resultados de baixa significância com probabilidade de 2,63% e 1,05%, respectivamente

As Figuras 25, 26 e 27 apresentam as análises cinemáticas probabilísticas para ruptura planar, por cunha e tombamento de blocos, respectivamente.

Figura 25 - Probabilidade de ruptura planar

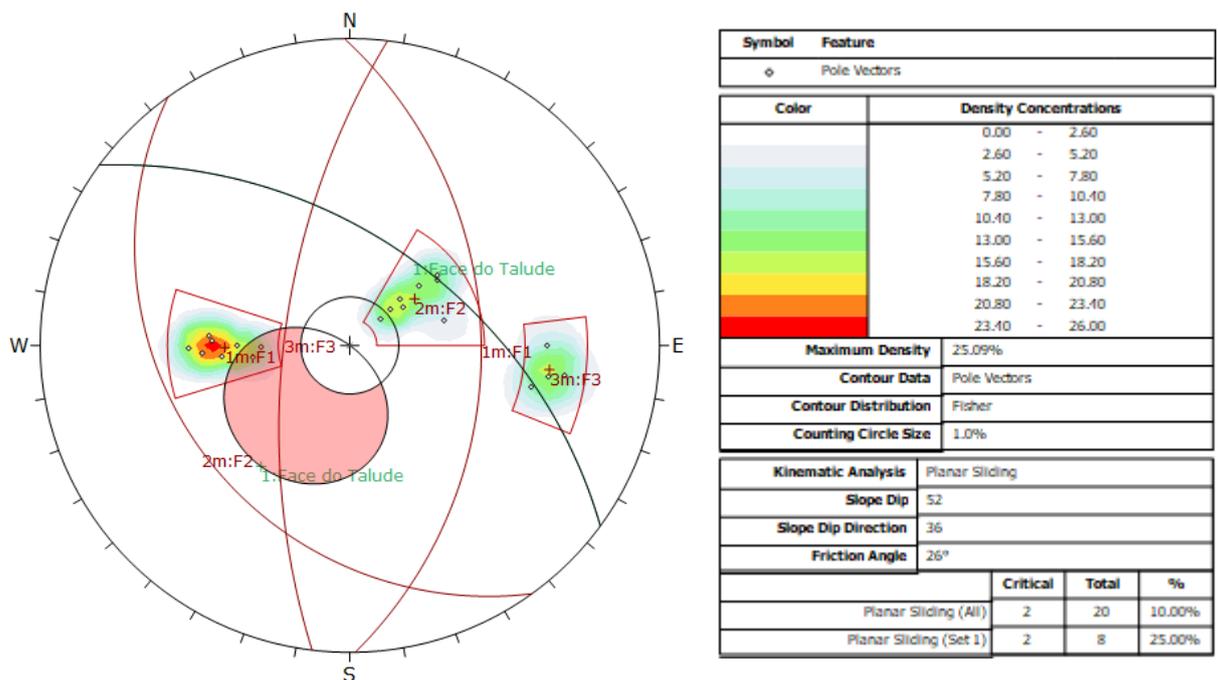


Figura 26 - Probabilidade de ruptura em cunha

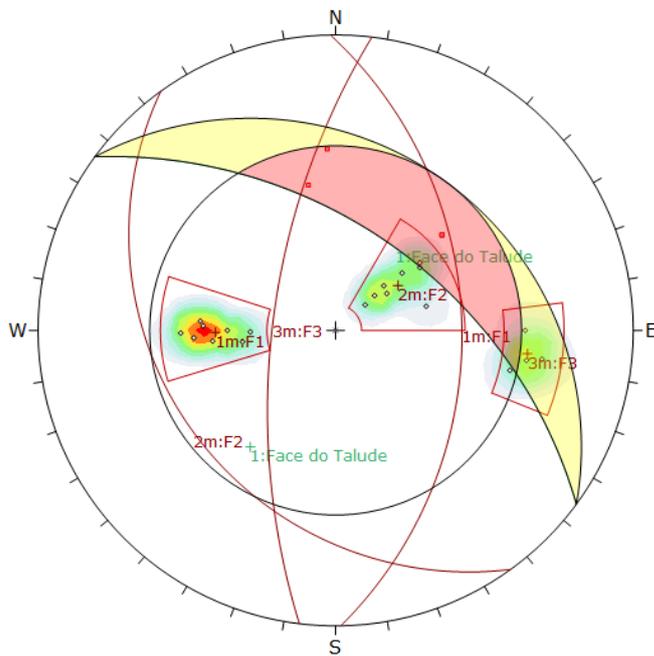
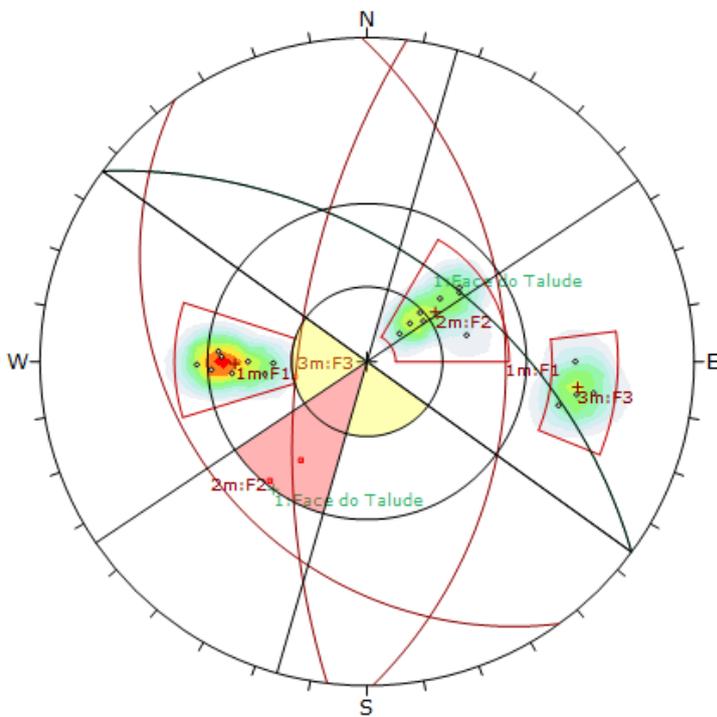


Figura 27 - Probabilidade de ruptura por tombamento



6. CONCLUSÃO

As classificações geomecânicas foram utilizadas para verificar a qualidade e comportamento do talude sul da cava Sucuri pertencente à Mineração Aricá. A atividade de caracterização e classificação do maciço rochoso envolveu diferentes etapas durante o estudo, indo do trabalho de campo ao tratamento dos dados e uso de softwares. Ao fim todos os objetivos da pesquisa foram alcançados.

A rocha constituinte do maciço rochoso é o filitio deformado de coloração cinza com resistência a compressão uniaxial por volta de 75 MPa, obtida a partir do teste do martelo de geólogo.

A classificação do maciço rochoso pelos sistemas de classificação RQD, RMR convergem para resultados semelhantes, um maciço rochoso regular. O RQD obtido pela quadro aplicada foi de 75%, pertencendo à Classe III. O RMR foi de 42 e foi classificado como Classe III. Por fim a última classificação aplicada foi o GSI; para este sistema obteve-se o valor de 65. Entre todos os sistemas aplicados, o RQD era o mais simplificado.

A análise cinemática permitiu identificar que o maior problema em relação à estabilidade está relacionado com as descontinuidades pertencentes a Família 1, responsável pelo mecanismo de ruptura planar, condizente com os aspectos observados em campo.

O uso de ferramentas computacionais para a análise da geologia estrutural e obtenção dos critérios de resistência constituiu uma boa metodologia. Tanto o software Dips e RocData apresentaram resultados condizentes com uma plataforma didática.

De modo geral, foi possível concluir a importância do uso de classificações geomecânicas como dispositivo na estimativa de parâmetros relevantes ao maciço rochoso, em casos nos quais não é possível obtê-los em ensaios de laboratório.

7. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Fica como sugestão para trabalhos futuros desenvolver um modelo hidrogeotécnico, que deverá ser elaborado para dar suporte às análises de estabilidade, abordando a importância da caracterização do nível freático e seu comportamento no maciço, uma vez que o talude foi tratado em condições secas. Outra sugestão seria para determinar o fator de segurança do talude com base nas análises cinemáticas.

Propõe-se incorporar na rotina operacional da mina a atualização do mapeamento geomecânico conforme avanço das frentes de lavra para constante atualização dos dados geológicos e estruturais da mina. A partir dos dados de campo, deve-se alimentar o banco dos dados e reavaliar a probabilidade de ruptura dos taludes, através de análises cinemáticas, ou a partir de análises de estabilidade utilizando as metodologias tradicionais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, A.P. (2003). **Mecânica e engenharia de rochas**. Curso avançado. Publicação: G. APAA002/03. Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT – Geotecnia.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses**. Trans. South African Institute of Civil Engineering 15, 1973. p. 335-344.

BIENIAWSKI, Z.T. **Estimating the Strength of Rock Materials**. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**. Março 1974, pp. 312-320.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering Rock Mass Classifications - A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 251p.

BRADY, B.H.G, BROWN, E.T. **Rock mechanics for underground mining**. London: Allen and Unwin. 1992.

CAVALCANTE, R.F. **Análise de estabilidade de taludes de mineração por métodos do equilíbrio limite e tensão-deformação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 156p. 1997.

DE SOUZA, M.M., **Estudos Geotécnicos para determinação e viabilização de cavas operacionais e finais estudo de caso: Cava Três Buracos, Goiás**. 2019, 100 F. Tese (Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2019.

DEERE, D.U. **Technical Description of Rock Cores for Engineer-purposes, Rock Mechanics and Engineering Geology**. 1(1): 16-22, 1963.

DUNCAN, C.W. CHRISTOPHER, W.M. (2005). **Rock slope engineering: civil and mining**. Taylor & Francis e-Library, 456p.

FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicação na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da UFPR, Oficina de Textos. 2 ed., 602p, 2009.

HAULLANCA, R.E.Z., **Mecanismos de Ruptura em Taludes Altos de Mineração a Céu Aberto**. 2004. 132 F. Tese (Dissertação de Mestrado à Escola de Engenharia de São Carlos) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

HOEK, E., BRAY, J. **Rock Slope Engineering**. 3.ed. Hertford: Stephen Austin and Sons Limited, 1981. 358p.

HOEK, E.; KAISER, P.; BAWDEN, W. **Support of underground excavations in hard rock**. Nova York: Taylor & Francis, 225p, 1995.

HOEK, E. **Practical Rock Engineering**. Canadá. 2002

HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C. & CORKUM, B. HoekBrown Failure Criterion—2002 Edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: **NARMS-TAC 2002**, July 7–10, University of Toronto, 267–271, 2002.

HOEK, E., **Fundamentals of slope design**. Keynote address at Slope Stability 2009, Santiago, Chile, 9 - 11 November 2009.

HOEK, E. CARTER, T., DIEDERICHS, M. **Quantification of the Geological Strength Index Chart**. 47th. Is: US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco. 2013.

MENEZES, D. A., **Caracterização Geotécnica e Análise dos Modos de Ruptura de Taludes Operacionais em Itabirito Compacto**. 2013. 192 F. Tese (Dissertação de Mestrado do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

NETO, J. A. B., **Classificação Geomecânica de Taludes de Mineração a Céu Aberto**. 2019. 174 F. Tese (Dissertação de Mestrado em Geotecnia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília. Brasília, 2019.

NONATO, C.A. **Contribuição à Caracterização Geológica-Geomecânica no Quadrilátero Ferrífero**. 2002. 186 F. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2002.

PEREIRA, L.C. **Análise tensão-deformação e por equilíbrio limite do mecanismo de tombamento de blocos**. Dissertação de Mestrado, NUGEO, UFOP, Ouro Preto, Brasil, 198p. 2012.

PIRES, B. H.; VIANA, C.D.; CAMPANHA, G. A., **Classificação Geomecânica e Análise de Estabilidade de Taludes da Mina Vau Novo (SP) com Ênfase na Análise**

de Descontinuidades. Revista RBGEA, Volume 6, p 56-74, 2016. Disponível em: <https://www.abge.org.br/volume-6-n-1-e-2>. Acesso em: 08/07/21.

DE SOUZA, M.M., **Estudos Geotécnicos para determinação e viabilização de cavas operacionais e finais estudo de caso: Cava Três Buracos, Goiás.** 2019, 100 F. Tese (Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2019.

TEJADA-CERVANTES, L. M. **Resistência de Maciços Rochosos Estruturalmente Complexos de Mineração Submetidos a Carregamentos Dinâmicos,** 277 p, 2011.

YAGIZ, S. **Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer.** Predicting geotechnical properties using Schmidt hammer. 1 Novembro 2008, pp. 55-63, 2008.

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. **Processos de Dinâmica Superficial.** In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 9, p.131-152.