



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**Lucas Pereira da Costa**

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA- GEOTÉCNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO  
NA BR356, DISTRITO DE AMARANTINA MG**

**Ouro Preto**  
**2024**

**Lucas Pereira da Costa**

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA- GEOTÉCNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO  
NA BR356, DISTRITO DE AMARANTINA MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Minas.

**Orientador:** Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos

**Ouro Preto  
2024**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Lucas Pereira da Costa**

Caracterização geológica-geotécnica de um maciço rochoso na BR356, distrito de Amarantina MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 29 de janeiro de 2024

### Membros da banca

Doutor - Allan Erlichman Medeiros Santos - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Doutora - Sylvia Letizia Ferrarezi Reis - Universidade Federal de Ouro Preto  
Doutor - José Fernando Miranda - Universidade Federal de Ouro Preto

Allan Erlichman Medeiros Santos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/01/2024



Documento assinado eletronicamente por **Allan Erlichman Medeiros Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/01/2024, às 10:32, 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.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0660225** e o código CRC **14C758B0**.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as oportunidades que me deste até o presente momento.

Agradeço aos meus pais pelo apoio, dedicação e por nunca me deixarem desistir de realizar esse sonho.

Agradeço a minha irmã pelo companheirismo e pelo carinho.

Agradeço a todos os familiares e amigos que fizeram parte dessa minha trajetória.

Ao meu orientador Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos pelo conhecimento compartilhado e pela paciência.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de forma direta ou indiretamente fizeram parte dessa minha conquista.

## RESUMO

As classificações de maciços rochosos desempenham papel importante na geomecânica fornecendo parâmetros de resistência do maciço necessários para as análises de estabilidade. O principal objetivo desse trabalho é a aplicação das metodologias de classificação de maciços rochosos, RMR, Sistema Q e GSI para um talude localizado na BR-356 em Amarantina, distrito do município de Ouro Preto. Na busca de concluir com êxito esse objetivo, foram realizados trabalhos de campo, com o intuito caracterizar a rocha intacta, descontinuidades e o maciço rochoso. Com uma análise de campo associada a buscas na literatura sobre a geologia local, determinou-se que a rocha é um gnaisse pertencente ao Complexo Bação, que se atribui ao complexo como gnaisse funil. A resistência a compressão uniaxial da rocha intacta, foi determinada com o auxílio do martelo de geólogo. O talude estudado foi subdividido em dois setores, a setorização foi aplicada devido ao padrão de fraturamento do maciço. No cálculo do RQD, o setor 1 apresentou 71,57% e o setor 2 apresentou 95,83%, sendo classificados como “razoável” e “excelente”, respectivamente. A análise pelo RMR por sua vez classificou o setor 1 como, “boa”, com valor de 67, já o setor 2 como “Muito boa”, com o valor de 81. Para o sistema Q o setor 1 teve um valor de 35,79, sendo classificado como “bom”; já o setor 2 obteve um valor de 47,92, classificado como “Muito bom”. Finalmente o GSI, classificou o setor 1 como “muito fraturada”, com um valor de 55, já o setor 2 como “fraturada”, com um valor de 65. Durante a atividade de campo foram determinadas duas famílias de descontinuidades. A análise apresentou o modo de ruptura em cunha e tombamento de blocos como os mais críticos. Por fim, vale ressaltar que a utilização de métodos empíricos deve ser sempre feita de modo criterioso e cauteloso quanto as incertezas, a fim de reduzir possíveis erros que não refletem a real condição do maciço.

**Palavras-chave:** Classificação geomecânica; Maciço rochoso; Análise cinemática; BR-356.

## ABSTRACT

Rock mass classifications play a crucial role in geomechanics by providing mass strength parameters needed for stability analyses. The main objective of this study is to apply rock mass classification methodologies, namely RMR, Q System, and GSI, to a slope located on BR-356 in Amarantina, a district of Ouro Preto municipality. To successfully achieve this goal, fieldwork was conducted to characterize intact rock, discontinuities, and the rock mass. Through field analysis and literature reviews on local geology, it was determined that the rock is a gneiss belonging to the Bação Complex, classified as funnel-shaped gneiss. The uniaxial compressive strength of the intact rock was determined using a geologist's hammer. The studied slope was divided into two sectors based on mass fracturing patterns. The RQD calculation resulted in 71.57% for sector 1 and 95.83% for sector 2, classified as "fair" and "excellent," respectively. RMR analysis classified sector 1 as "good" with a value of 67 and sector 2 as "very good" with a value of 81. For the Q System, sector 1 had a value of 35.79, classified as "fair," while sector 2 had a value of 47.92, classified as "very good." Finally, GSI classified sector 1 as "highly fractured" with a value of 55 and sector 2 as "fractured" with a value of 65. Two discontinuity families were identified during field activities, with wedge failure and block toppling identified as the most critical failure modes. It is important to note that the use of empirical methods should always be approached with caution, considering uncertainties to minimize potential errors that may not accurately reflect the actual mass condition

**Keywords:** Geomechanical classifications; rock mass; kinematic analysis; BR-356.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esboço da Geologia do Quadrilátero Ferrífero com o Complexo Bação....	13
Figura 2- Orientação das descontinuidades.....	16
Figura 3- Relação entre o grau de rugosidade e o JRC.....	17
Figura 4- Valores de D para taludes rochosos.....	21
Figura 5- Exemplo de cálculo de RQD utilizando testemunho de sondagem.....	25
Figura 6- Ábaco de campo para classificação de maciços através do GSI.....	31
Figura 7- Localização da área de estudo indicada pelo “X” .....	33
Figura 8- Maciço rochoso analisado.....	34
Figura 9-Altura do Maciço rochoso.....	34
Figura 10- Bússola utilizada.....	35
Figura 11-Aplicação do pente de Barton.....	36
Figura 12-Martelo de Geólogo.....	36
Figura 13-Setorização proposta para o talude.....	38
Figura 14-Estereograma das famílias de descontinuidade .....	39
Figura 15- Histograma com as medidas de espaçamento da foliação no setor 1. ....	39
Figura 16-Histograma com as medidas de espaçamento da foliação no setor 2. ....	40
Figura 17- Histograma com as medidas de espaçamento da fratura no setor 1. ....	40
Figura 18- Histograma com as medidas de espaçamento da fratura no setor 2. ....	40
Figura 19-Ábaco dos perfis típicos de rugosidade.....	41
Figura 20- Ábaco GSI proposto por Hoek et al.....	45
Figura 21-Análise probabilística- Ruptura planar.....	47
Figura 22-Análise probabilística- Ruptura em cunha.....	47
Figura 23-Análise probabilística- Tombamento de blocos.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Grau de resistência – Martelo de geólogo.....	14
Tabela 2 - Classificação do grau de alteração em maciços rochosos.....	15
Tabela 3- Pontuação para abertura das descontinuidades .....	17
Tabela 4- Classificação das descontinuidades.....	18
Tabela 5- Valores para classificação da persistência.....	18
Tabela 6- Grau de fraturamento .....	19
Tabela 7- Condições das descontinuidades.....	19
Tabela 8-Valores da constante $m_i$ para rocha intacta. . <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Tabela 9- Parâmetros associados no cálculo de RMR e seus respectivos pesos.....	24
Tabela 10 - Correlação entre o índice RQD e a qualidade da rocha.....	25
Tabela 11- Parâmetros das descontinuidades .....	27
Tabela 12-Número de famílias de descontinuidades – $J_n$ .....	27
Tabela 13-Rugosidade das paredes – $J_r$ . .....	28
Tabela 14-Alteração das paredes – $J_a$ .....	28
Tabela 15- Ação da água subterrânea – $J_w$ .....	29
Tabela 16-Estado de tensões no maciço – SRF .....	29
Tabela 17-Orientação média das famílias de descontinuidades. ....	38
Tabela 18-Parametros das famílias de descontinuidade.....	41
Tabela 19-Resumo dos valores para critérios analisados.....	42
Tabela 20-Resultados para o $J_v$ .....	43
Tabela 21-Resultados para o RQD. ....	43
Tabela 22-Classificação do RQD para os valores encontrados .....	43
Tabela 23- Pesos para cálculo do RMR.....	44
Tabela 24-Parâmetros e cálculo do sistema Q.....	44
Tabela 25-Parâmetros do critério de Hoek e Brown (2002). ....	46
Tabela 26- Valores obtidos através das equações de correlação entre parâmetros.	46



## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	OBJETIVOS .....	12
2.1	Objetivo Geral .....	12
2.2	Objetivos específicos .....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
3.1	Delimitação da área de estudo .....	13
3.2	Parâmetros geomecânicos .....	14
3.2.1	Parâmetros de rocha intacta .....	14
3.2.2	Parâmetros de descontinuidade .....	15
3.3	Critérios de resistência .....	20
3.3.1	Critério de Barton & Bandis .....	20
3.3.2	Critério de Hoek-Brown Generalizado .....	20
3.4	Classificação dos maciços rochosos .....	23
3.4.1	RMR .....	23
3.4.2	Sistema Q .....	27
3.4.3	GSI .....	30
3.5	Relação entre os sistemas de classificação .....	32
4	METODOLOGIA .....	33
4.1	Localização do talude estudado .....	33
4.2	Levantamento geológico- geotécnico .....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	37
5.1	Caracterização .....	37
5.1.1	Critérios das descontinuidades .....	39
5.2	Resistência a compressão uniaxial .....	42
5.2.1	Ensaio com o martelo de geólogo .....	42
5.3	Classificação geomecânica .....	42

5.3.1 RQD .....	42
5.3.2 RMR .....	43
5.3.3 Sistema Q.....	44
5.3.4 GSI .....	45
5.4 Parâmetros dos critérios de resistência .....	46
5.5 Relação entre os sistemas de classificação .....	46
5.6 Análise cinemática .....	47
6 CONCLUSÃO .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

Em Minas Gerais, devido a existência de regiões montanhosas, diversas cidades estão cercadas por maciços rochosos, seja no seu interior urbano, em rodovias próximas e até mesmo linhas ferroviárias. Esses maciços quando apresentam condições favoráveis a instabilidades acabam se tornando um objeto de risco eminente para a população.

Segundo a ISRM (1978), um maciço rochoso é um conjunto de blocos de rocha intacta separados por descontinuidades, que podem ou não conter material de preenchimento, as propriedades do maciço rochoso serão determinadas pelas propriedades da rocha intacta, pelo número e condições das descontinuidades.

Ouro Preto é uma cidade histórica localizada na região central de Minas Gerais, e apresenta grande quantidade de ocorrências de rupturas de solos e maciços rochosos, em função das características da cidade, como terreno altamente acidentado, alto índice pluviométrico e a geologia estrutural dominante, a região se torna crítica e propícia a acidentes envolvendo taludes, tanto no perímetro urbano, quanto nos distritos e conseqüentemente nas rodovias de interligação destes com a sede. No perímetro urbano e rodovias o perigo se torna maior devido a movimentação de pessoas e veículos. Neste contexto se torna fundamental a caracterização destes maciços, devido aos cortes para abertura das estradas, para direcionar um programa de gestão de riscos geotécnicos.

Para auxiliar nesse processo, os sistemas de classificação dos maciços rochosos abrangem os estudos relacionados com a descrição/caracterização da rocha intacta, quanto das descontinuidades e das estruturas presentes no maciço rochoso. Um exemplo é o sistema RMR (*Rock Mass Rating*), amplamente aplicado na engenharia, que caracteriza parâmetros como a resistência da rocha intacta, RQD (*Rock Quality Design*), espaçamento e condições das descontinuidades, condições de percolação de água, e ajustes relativos a projetos de engenharia. Por fim, estes sistemas são utilizados para estimativas de parâmetros de resistência do maciço, além de auxiliar no dimensionamento de estruturas/escavações e suportes de obras de engenharia. Assim a caracterização geológica-geotécnica de maciços rochosos auxilia na avaliação e prevenção de possíveis movimentações para taludes.

Para demonstrar a importância desses sistemas de classificação, nesse estudo selecionou-se um talude localizado na rodovia BR356 em Amarantina, que é um

distrito do município de Ouro Preto. Nesse talude foram realizados o levantamento geotécnico, e a classificação geomecânica com base nos métodos disponíveis na literatura. Com os resultados foram estimados os parâmetros de resistência e algumas comparações das equações que correlacionam os parâmetros de classificação existentes na literatura, visando descrever o grau de risco geotécnico do referido talude.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi a caracterização geológica-geotécnica de um maciço rochoso localizado na BR-356 em Amarantina, distrito do município de Ouro Preto- MG, visando caracterizá-lo quanto ao grau de risco geotécnico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Revisar da literatura, sobre os métodos de classificação de riscos geotécnicos e da área de estudo.
- b) Realizar o levantamento de campo dos parâmetros do maciço rochoso.
- c) Determinar as classificações para o maciço, segundo as metodologias do: RMR, sistema Q e GSI.
- d) Apresentar os possíveis mecanismos de ruptura por meio de análise cinemática.
- e) Avaliar os métodos de classificação utilizados e os resultados encontrados.
- f) Discutir as correlações dos resultados encontrados, comparados com os métodos de classificação propostos na literatura

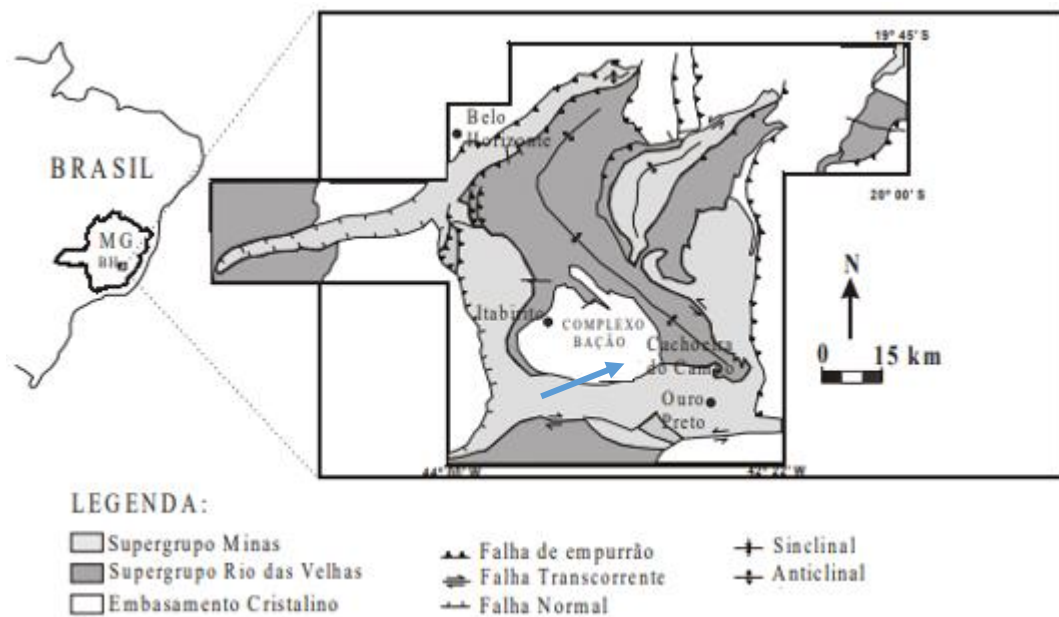
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre temas considerados relevantes para este trabalho.

#### 3.1 Delimitação da área de estudo

A área de estudo está localizada em Amarantina, distrito do município de Ouro Preto- MG, sendo pertencente, geologicamente, ao Complexo Bação, no sul-sudeste do Quadrilátero ferrífero (QF), conforme a Figura (1).

Figura 1- Esboço da Geologia do Quadrilátero Ferrífero com o Complexo Bação.



Fonte: R. BRAS (2004).

Segundo Salaroli (1999) e Vilela (1999) o complexo metamórfico Bação representa o embasamento cristalino granito-gnáissico-migmatítico das unidades geológicas do QF. Formado por uma composição granodiorítica com bandas escuras e com bandas claras (Granitoide) ricas em quartzo, migmatitos, gnaisses, granitos gnaiss e xistos, além de intrusivas de diabásio constitui o chamado Gnaiss Funil, cujos minerais predominantes são quartzo e plagioclásio (SALAROLI, 1999; VILELA, 1999; BACELLAR, 2000).

### 3.2 Parâmetros geomecânicos

De acordo com a ABNT-NBR 6502 (1995), um maciço rochoso é um aglomerado de rocha intacta e descontinuidades. Os parâmetros geomecânicos observados possuem ligação com as descontinuidades presentes no maciço e com a rocha intacta.

#### 3.2.1 Parâmetros de rocha intacta

A resistência à compressão da rocha intacta comumente é obtida por ensaios de compressão, como ensaios uniaxiais ou triaxial, onde as amostras são submetidas a cargas em prensas até que a amostra seja rompida. Segundo Dos Santos (2015), a resistência da rocha intacta pode ser encontrada com o auxílio do martelo de geólogo, além dos ensaios de compressão já citados. Na Tabela (1) são apresentadas as faixas de valores, descrição e características relativas à resistência da rocha intacta determinada por meio do martelo de geólogo de acordo com a ISRM (1981).

Tabela 1- Grau de resistência – Martelo de geólogo.

<b>Grau</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Descrição</b>	<b>Característica</b>
R0	0,25 – 1,00	Extremamente branda	Marcada pela unha
R1	1,00 – 5,00	Muito Branda	Esmigalha-se com um golpe de martelo
R2	5,00 – 25,00	Branda	Marcada com a ponta do martelo
R3	25,00 – 50,00	Resistência média	Amostras fraturadas com único golpe do martelo
R4	50,00 – 100	Resistente	Mais de um golpe de martelo para fraturar a rocha
R5	100 – 250	Muito resistente	Muitos golpes de martelo para fraturar a rocha
R6	>250	Extremamente resistente	Amostras somente lascadas com golpe de martelo

Fonte: Adaptada de ISRM (1981).

O grau de alteração na rocha tem relação com o somatório de procedimentos causados pelo intemperismo com o passar do tempo no maciço. Conforme Jaques

(2014), a alteração visível em um maciço pode ter ligação com fatores exógenos (intemperismo) e endógenos (metamorfismo em geral). Os agentes exógenos causam a redução na capacidade do maciço em suportar esforços e alterações em níveis de porosidade e/ou permeabilidade, parâmetros que caracterizam o intemperismo. Na Tabela (2) se encontram a nomenclatura e simbologia aplicadas em campo para definição da alteração em maciços rochosos segundo a ISRM (1981).

Tabela 2 - Classificação do grau de alteração em maciços rochosos.

<b>Sigla</b>	<b>Denominação</b>	<b>Descrição</b>
W1	Sem alteração	Alteração mineralógica nula ou incipiente. Minerais preservam brilho original, cor e clivagem. Foliação visível e selada. Resistência original da rocha não afetada pela alteração
W2	Pouca alteração	Leve descoloração e oxidação na matriz e ao longo das descontinuidades. Foliação visível e selada. Juntas fechadas, paredes ligeiramente alteradas. Resistência original da rocha parcialmente afetada.
W3	Moderadamente alterada	Matriz descolorida, com evidências de oxidação. Juntas abertas (<1.00 mm) e oxidadas, podendo ocorrer material mais alterado ao longo das descontinuidades. Foliação realçada pelo intemperismo. Resistência afetada
W4	Muito alterada	Alteração acentuada, alguns materiais parcialmente decompostos. Matriz totalmente oxidadas e cores muito alteradas. Fraturas abertas (2 <e <5 mm) e oxidadas. Desplacamentos ao longo da foliação. Foliação realçada pelo intemperismo.
W5	Extremamente alterada	Material completamente alterado para solo estruturado. Extremamente descolorido, minerais resistentes quebrados e outros transformados em argilominerais. Foliação preservada. Juntas não discerníveis.
W6	Solo residual	Material transformado em solo

Fonte: Adaptada de ISRM (1981).

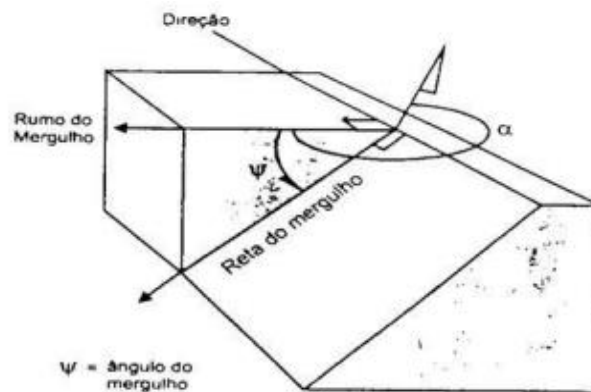
### 3.2.2 Parâmetros de descontinuidade

Segundo Oliveira e Brito (1998), existe uma relação em que a orientação preferencial depende que a natureza mecânica e os estados de tensões geológicas sejam existentes no momento de formação da estrutura. A orientação espacial de



uma descontinuidade é coletada por meio de uma bussola de geólogo (CELLA E MAGALHÃES, 1998). O mergulho é a reta de máximo declive, já a direção é coletada pelo ângulo resultante da interseção que o plano das descontinuidades e o plano horizontal faz com o Norte, conforme a Figura (2).

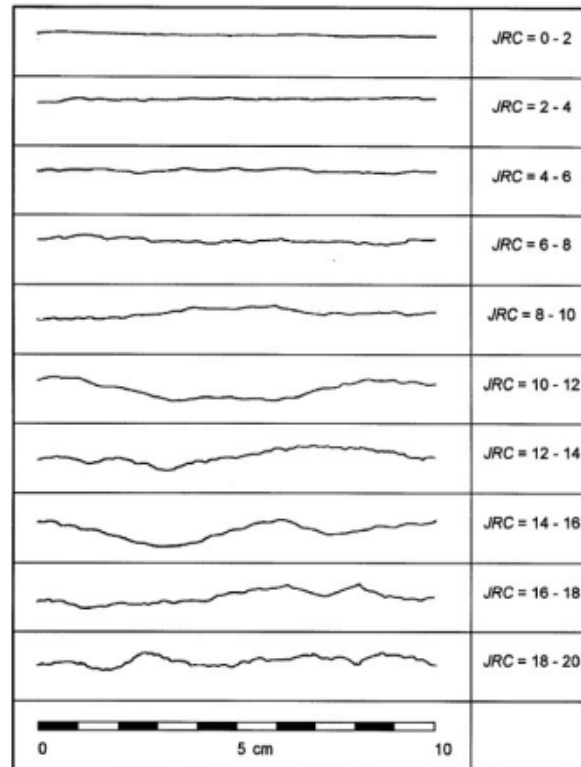
Figura 2- Orientação das descontinuidades.



Fonte: ISRM, 1981.

A rugosidade é uma propriedade que define o grau de aspereza, sendo as ondulações ou imperfeições da descontinuidade. A rugosidade influencia diretamente na resistência ao cisalhamento. De acordo com Barton & Choubey (1977) a rugosidade pode se correlacionar com o JRC (Coeficiente de rugosidade das juntas). Os mesmos autores propuseram um perfil relacionando o JCR e a rugosidade, apresentado na Figura (3).

Figura 3- Relação entre o grau de rugosidade e o JRC.



Fonte: Adaptado Barton & Choubey (1977).

De acordo com Silva (2018), a abertura consiste na distância ortogonal entre as paredes de uma descontinuidade. Para Oliveira e Brito (1998), o estudo das aberturas de descontinuidades é fundamental em análises sobre a percolação de águas em maciços rochosos. A Tabela (3) apresenta pontuações para classificação de aberturas.

Tabela 3- Pontuação para abertura das descontinuidades

	<b>Fechada</b>	<b>6</b>
<b>Aberturas</b>	<0,1mm	5
	0,1 – 1,0 mm	4
	1,0 – 5,0 mm	1
	>5 mm	0

Fonte: Adaptada de BIENIAWSKI, 1989.

Conforme Ojima e Júnior (1998), o espaçamento pode ser definido como a distância perpendicular média entre duas descontinuidades de mesma família. O espaçamento é uma propriedade de suma importância na análise do comportamento do maciço rochoso, uma vez que essa propriedade tem a função de expressar a

quantidade relativa de descontinuidades (OLIVEIRA E BRITO, 1998). A Tabela (4) proposta por Bieniawski (1989), define os critérios de classificação para o espaçamento médio das descontinuidades.

Tabela 4- Classificação das descontinuidades.

<b>Categoria</b>	<b>Espaçamento Médio</b>	<b>Definição</b>
L1	>200	Muito afastada
L2	200 – 60	Afastada
L3	60 – 20	Medianamente Afastada
L4	20 – 6	Próximas
L5	<6	Muito Próximas

Fonte: Adaptada de BIENIAWSKI, 1989.

O parâmetro de persistência representa o comprimento médio de uma descontinuidade. Segundo Cella e Magalhães (1998), a persistência permite o conhecimento em relação a ordem dos eventos tectônicos, as descontinuidades mais recentes na maioria das vezes se interrompem nas mais antigas. A Tabela (5) apresenta a condição de classificação das persistências. Silva (2018) afirma que uma descontinuidade acima de 10m é classificada como alta persistência e uma extensão menor que 10m é definida como pouco persistente.

Tabela 5- Valores para classificação da persistência.

<b>Persistência</b>	
<1m	6
1 – 3m	4
3 – 10m	2
10 – 20m	1

Fonte: Adaptada de BIENIAWSKI, 1989.

O grau de fraturamento do maciço rochoso é inversamente proporcional ao espaçamento. Oliveira e Brito (1998) afirmam que o grau de fraturamento do maciço pode ser encontrado utilizando o espaçamento, fazendo a equivalência do inverso da medida de todas as famílias analisadas. Segundo Guidicini e Nieble (1983), o grau de fraturamento pode ser definido realizando uma contagem de todas as fraturas presentes em uma direção, sendo o valor definido como quantidade de fraturas por

metro estudado, é importante se atentar em alguns casos para distâncias menores que um metro. Apresenta-se na Tabela (6) a classificação elaborada pela respectiva comissão da ISRM.

Tabela 6- Grau de fraturamento

<b>Siglas</b>	<b>Número de fraturas por metro</b>	<b>Denominação</b>
F1	<1	Ocasionalmente fraturado
F2	1-5	Pouco fraturado
F3	6-10	Medianamente fraturado
F4	11-20	Muito fraturado
F5	>20	Extremamente fraturado

Fonte: Adaptada de ISRM, 1978.

O preenchimento é o material que se encontra entre as aberturas das descontinuidades. De acordo com Oliveira e Brito (1998), o preenchimento influencia diretamente na resistência ao cisalhamento do maciço e a condutividade hidráulica. Na descrição do preenchimento é necessário relatar sobre a natureza dos componentes e sobre sua espessura. Na Tabela (7), Bieniawski (1989) apresenta descrições sobre as condições das descontinuidades.

Tabela 7- Condições das descontinuidades

<b>Preenchimento</b>	
Nenhum	6
Duro, <5mm	4
Duro, >5mm	2
Macio, <5mm	2
Macio, >5mm	0

Fonte: Adaptada de BIENIAWSKI, 1989.

### 3.3 Critérios de resistência

#### 3.3.1 Critério de Barton & Bandis

Conforme Azevedo e Marques (2002), o critério de Barton- Bandis (1982) foi desenvolvido de forma empírica e com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento de discontinuidades. Sendo descrito pela Equação (1)

$$\tau = \sigma' \tan \left[ JRC \left( \frac{JCS}{\sigma'} \right) + \phi \right] \quad (1)$$

Onde  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento, JRC corresponde ao coeficiente de rugosidade da junta, JCS é a resistência a compressão uniaxial das paredes das juntas,  $\phi$  é o ângulo de atrito e  $\sigma'$  representa o parâmetro de resistência. Os valores de JRC e JCS sofrem diretamente com a influência do efeito escala, à medida que o grau de descontinuidade aumenta, os valores do JRC e do JCS diminuem. A razão para esta relação é que a rugosidade em escalas menores se torna menos importante em comparação com a dimensão da descontinuidade.

De acordo com Giusepone (2011), o JRC pode ser obtido através da Equação (2), onde  $\alpha$  corresponde ao ângulo do talude,  $\sigma_n$  é a tensão normal.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi}{\frac{JCS}{\sigma_n}} \quad (2)$$

#### 3.3.2 Critério de Hoek-Brown Generalizado

Hoek et al. (2002) apresentaram um critério para estimar parâmetros de resistências dos maciços rochosos. O método ficou conhecido como “Critério de Hoek-Brown Generalizado” apresentado na Equação (3)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( mb * \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (3)$$

No qual  $\sigma_1$  representa a tensão principal maior de ruptura,  $\sigma_3$  é a tensão principal menor aplicada,  $\sigma_c$  representa a resistência a compressão uniaxial da rocha intacta, mb e s são constantes que caracterizam as propriedades do maciço rochoso. Os valores de mb, s e a são obtidos através das Equações (4),(5) e (6) , com base em

parâmetros do GSI. Quando se trata de uma rocha intacta os valores de  $m_b$  são análogos a  $m_i$ .

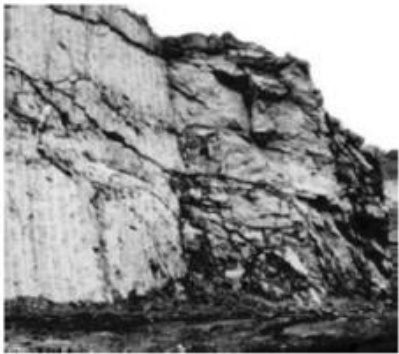

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI-100}{28-4D}\right) \quad (4)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (5)$$

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

Onde o GSI é o índice geológico de resistência adotado por Hoek (1944), D é uma propriedade dependente da perturbação sofrida pelo maciço no desmonte, os valores de D podem variar de 0 a 1, sendo 0 para um maciço que não sofreu perturbação e 1 para maciços com altos níveis de perturbação. A Figura (4) contém os valores D para maciços (HOEK et al., 2002).

Figura 4- Valores de D para taludes rochosos.

Aparência do maciço rochoso	Descrição do maciço rochoso	Valor D sugerido
	Detonação em escala de talude, utilizada em obras civis, que resultam em modestos danos ao maciço rochoso, principalmente se a detonação for controlada, conforme fotografia ao lado. Entretanto, os alívios de tensão podem causar alguma perturbação.	D= 0,7 - Detonação boa D= 1,0 - Detonação pobre
	Encostas muito grandes, em minas a céu aberto, que sofrem perturbação significativa devido à produção por detonação, e devido ao alívio de tensão resultante da remoção de sobrecarga.	D= 1,0 - Produção por detonação
	Em rochas mais moles, a escavação pode ser realizada por escavação mecânica e o grau de dano às encostas é menor.	D= 0,7 - Escavação mecânica

Fonte: Adaptado de HOEK et al. (2002).

Os valores de  $m_i$ , são obtidos através de ensaios triaxiais. Hoek (2000) propôs valores para  $m_i$  com base em litologias de rochas intactas, esses valores são

recomentados apenas para casos em que não é possível a realização de ensaios.  
Tabela (8).

Tabela 8-Valores da constante  $m_i$  para rocha intacta.

Tipo de rocha		Nome da rocha e valores de $m_i$			
Ígneas	Intrusiva	Granito $32 \pm 3$	Diorito $25 \pm 5$	Gabro	Peridotito
		Granodiorito	Dolerito	$27 \pm 3$	$(25 \pm 5)$
		$29 \pm 3$	$(16 \pm 5)$	Norito	$22 \pm 5$
Sedimentares	Extrusiva	Riolito $(16 \pm 5)$	Andesito	Basalto	Pórferos
			$25 \pm 5$	$16 \pm 5$	$(20 \pm 5)$
				Diabásio	$(16 \pm 5)$
Sedimentares	Vulcânica		Aglomerado	Tufos	
			$(19 \pm 3)$	$(13 \pm 5)$	
Sedimentares	Clástica	Conglomerado	Arenito $17 \pm 4$	Siltito $7 \pm 2$	Argelito
		$(4 \pm 18)$		Margas	$4 \pm 2$
		Brechas $(4 \pm 16)$		$(7 \pm 2)$	Folhelho
Sedimentares	Carbonática	Calcário	Calcário	Calcário	Dolomito
		crystalino $(12 \pm 3)$	esparítico	micrítico	$(9 \pm 3)$
			$(10 \pm 2)$	$(9 \pm 2)$	
Sedimentares	Química		Gipso $8 \pm 2$		
			Anidrido $12 \pm 2$		
Metamórficas	Orgânica			Carvão	Giz $7 \pm 2$
				$(8 \pm 12)$	
Metamórficas	Foliada	Gnaisse $25 \pm 5$	Xisto $12 \pm 3$	Filito $(7 \pm 3)$	Ardósia
					$7 \pm 4$
Metamórficas	Levemente foliada	Migmatito $(29 \pm 3)$	Anfibolito		
			$26 \pm 6$		
Metamórficas	Sem foliação	Quartzito $20 \pm 3$	Metarenito	Hornfels	Mármore
			$(19 \pm 3)$	$(19 \pm 4)$	$9 \pm 3$

Fonte: Adaptada de Hoek, 2002.

Segundo Hoek et al. (2002), os valores para ângulo de atrito e coesão são possíveis de estimar através das constantes  $mb, s$  e  $a$ , da compressão uniaxial e com o valor de  $\sigma_3$  máximo, conforme as Equações (7) e (8).

$$\phi = \left[ \frac{6*a*mb(s+mb*\sigma_3)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6*a*mb(s+mb*\sigma_3)^{a-1}} \right] \quad (7)$$

$$c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s(1-a)mb*\sigma_3](s+mb*\sigma_3)^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{\frac{1+[6a*mb(s+mb*\sigma_3)^{a-1}]}{[(1+a)(2+a)]}}} \quad (8)$$

$\sigma_3$  máximo é encontrado pela equação 9, sendo  $y$  o peso específico do maciço e  $H$  a altura do talude

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_c} = 0,47 \left( \frac{\sigma_c}{yH} \right)^{-0,94} \quad (9)$$

### 3.4 Classificação dos maciços rochosos

De acordo com Bieniawski, (1989), foram elaborados diversos sistemas de classificação para maciços rochosos no mundo, cada um se adequando a várias aplicações e diferentes critérios propostos. Para Bieniawski, (1989), existem diversos objetivos quando se trata de classificação dos maciços rochosos, sendo esses: Identificar os principais parâmetros que influenciam no comportamento do maciço; agrupar o maciço rochoso em classes de comportamento semelhante; fornece uma fonte de compreensão para cada classe; relaciona a experiência das condições rochosas em um local com a experiência em outros locais; obter dados quantitativos e orientação para projetos de engenharia e fornece uma base comum para comunicação entre os envolvidos no projeto. A seguir serão descritos três dos sistemas mais aplicados na literatura atual, sendo eles: RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawsky (1973, revisado em 1989), sistema Q de Barton, Barton, Lien and Lunde (1974), o GSI (Geological Strength Index) proposto por Hoek et. al. (1995).

#### 3.4.1 RMR

De acordo com Azevedo e Marques (2002), o RMR (Rock Mass Rating) foi desenvolvido por Bieniawsky em 1973, representa uma ferramenta crucial na análise geotécnica para avaliação da qualidade e estabilidade de um maciço rochoso. O RMR



sofreu inúmeras modificações com o passar dos anos, se adequando a padrões internacionais e ampliando a aplicabilidade do sistema. Bieniawsky (1989) afirma que o sistema se manteve o mesmo, todas as modificações surgem como ajustes e não devem ser consideradas como um novo método.

A classificação dos maciços pelo RMR é gerada através do somatório dos valores obtidos em cada um dos parâmetros analisados, sendo eles: Resistência a compressão uniaxial da rocha; RDQ; espaçamento das descontinuidades; condição das descontinuidades; grau de alteração e condição de saturação do maciço. Os valores associados aos parâmetros utilizados no RMR estão agrupados na Tabela (9).

Tabela 9- Parâmetros associados no cálculo de RMR e seus respectivos pesos.

Parâmetros		Coeficientes						
Resistência da Rocha intacta	Índice de carga (Mpa)	>10	4 a 10	2 a 4	1 a 2	Não aplicável		
	Compressão uniaxial (Mpa)	>250	100 a 200	50 a 100	25 a 50	5 a 25	1	< 1
	Peso	15	12	7	4	2	1	0
RQD	%	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
	Peso	20	17	13	8	3		
Persistência	Descrição	< 1m	1 - 3m	3 - 10m	10 - 20m	<25m		
	Peso	6	4	2	1	0		
Abertura	Descrição	0	< 0,1mm	0,1 - 1 mm	1 - 5mm	> 5 mm		
	Peso	6	5	4	1	0		
Rugosidade	Descrição	Muito Rugosa	Rugosa	Levemente Rugosa	Lisa	Estriada		
	Peso	6	5	3	1	0		
Preenchimento	Descrição	Sem Preenchimento	Duro <5mm	Duro >5mm	Macio <5mm	Macio >5mm		
	Peso	6	4	2	2	0		
Espaçamento	Espaçamento (cm)	> 200	60 - 200	20 - 60	6 - 20	< 6		
	Peso	20	15	10	8	5		
Intemperismo da parede	Descrição	Sem Alteração	Ligeiramente Alterada	Moderadamente Alterada	Muito Alterada	Decomposto		
			Alterada	Ligeiramente rugosas	Ligeiramente rugosas			
			Ligeiramente rugosas	Ligeiramente rugosas	Ligeiramente rugosas			

			nte rugosas		nte rugosas	
	Peso	6	5	3	1	0
Condições de saturação	Descrição	Seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluxo abundant e
	Peso	15	10	7	4	0

Fonte: Adaptada BIENIAWSKI, 1989.

O RQD é um dos parâmetros utilizados no cálculo do RMR, foi desenvolvido por Deere et al. (1967). O RQD pode ser utilizado como um sistema de classificação único Deere et al. (1967), mas é indicado a aplicação junto a parâmetros de outro sistema. A Tabela (10) apresenta valores para qualidade do maciço.

Tabela 10 - Correlação entre o índice RQD e a qualidade da rocha.

RQD (%)	Qualidade a rocha
<25	A- Muito ruim
25-50	B- Ruim
50-75	C- Razoável
75-90	D- Bom
90-100	E- Excelente

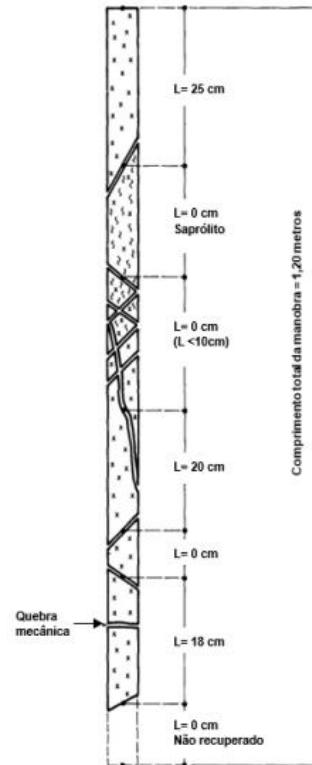
Fonte: Adaptada Deere et al. (1967)

O RDQ tem como objetivo classificar a qualidade do maciço por meio do comprimento de testemunhos de sondagens recuperados. A equação que determina o valor de RQD em percentual e apresentada pela Equação 10 (BRADY e BROWN, 2006).

$$RQD (\%) = 100 * \frac{\sum \text{Comprimento dos pedaços } > 10 \text{ centímetros}}{\text{Comprimento da manobra}} \quad (10)$$

Vale ressaltar que as quebras mecânicas dos pedaços são desconsideradas, na Figura (5) é apresentado um exemplo de cálculo de RQD utilizando o testemunho de sondagem

Figura 5- Exemplo de cálculo de RQD utilizando testemunho de sondagem.



$$RQD = \frac{25 + 20 + 18}{1,20} * 100 = 52,5\%$$

Fonte: Adaptado de DEERE e DEERE (1989).

Hudson & Harrison (1997) e Palmström (1982) a fim de determinar o valor do RQD, para situações em que não é possível a utilização de testemunho de sondagem desenvolveram então as Equações (11) e (12).

$$RQD = 100(\lambda t + 1)e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$RQD = 115 - 3,3Jv \quad (12)$$

Onde,  $\lambda$  refere-se à quantidade de descontinuidades por metro,  $t$  representa o tamanho do fragmento de rocha analisada e o  $Jv$  corresponde ao contador volumétrico das juntas, obtido através da Equação (13). Sendo  $S_i$  o espaçamento entre as juntas por metro para a família analisada.

$$Jv = \sum \frac{1}{S_i} \quad (13)$$

Após a análise e somatório dos parâmetros necessários para o cálculo do RMR é feita a classificação do maciço. A Tabela (11) apresenta a faixa de valores para

classificação do RMR, junto a classe e descrição a partir do valor obtido, além de valores propostos para coesão e ângulo de atrito para o maciço.

Tabela 11- Parâmetros das descontinuidades

Valores de RMR	Descrição	Classe do maciço	Coesão (Kpa)	Ângulo de Atrito (°)
100 – 81	Muito Bom	I	>400	>45
80 – 61	Bom	II	300 – 400	35 – 45
60 – 41	Regular	III	200 – 300	25 – 35
40 – 21	Ruim	IV	100 – 200	15 – 25
<21	Muito Ruim	V	<100	< 15

Fonte: Adaptada BIENIAWSKI (1989)

### 3.4.2 Sistema Q

O sistema Q, foi proposto por Barton et al. (1974). O método de classificação busca definir a qualidade do maciço rochoso (BARTON et al., 1974). Com base em diversos estudos de túneis e escavações subterrâneas definiram a Equação (14) como a representação do valor da classificação.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (14)$$

Onde, Q é o índice de qualidade do maciço rochoso; RQD; J<sub>n</sub> representa o número de famílias de descontinuidade; J<sub>r</sub> expressa a rugosidade da parede; J<sub>a</sub> corresponde ao índice de alteração das paredes; J<sub>w</sub> Índice de influência de Ação da água subterrânea e SRF (*Stress Reduction Factor*) indica o estado de tensão do maciço. Os parâmetros utilizados para classificação por meio do Q de Barton são obtidos em campo, as Tabelas (12) a (16) apresentam pesos para esses parâmetros.

Tabela 12-Número de famílias de descontinuidades – J<sub>n</sub>.

Número de famílias de juntas	
Descrição	J <sub>n</sub>
A. Fraturas ausentes	0,5 - 1
B. Uma família de fraturas	2

C. Uma família de fratura mais fraturas aleatórias	3
D. Duas famílias de fraturas	4
E. Duas famílias de fraturas mais fraturas aleatórias	6
F. Três famílias de fraturas	9
G. Três famílias de fraturas mais fraturas aleatórias	12
H. Quatro ou mais famílias, aleatórias, fortemente fraturadas	15
I. Pedra britada, similar a solo	20

Fonte: Adaptada BARTON et al., (1974).

Tabela 13-Rugosidade das paredes – Jr.

<b>a- Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas e</b>	
b- fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm).	
Condições de rugosidade das paredes	Jr
A. Fraturas não-persistentes	4
B. Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
C. Fraturas lisas, onduladas	2
D. Fraturas polidas, onduladas	1,5
E. Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
F. Fraturas lisas, planas	1
G. Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5
c- fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
H. Fraturas com minerais argilosos	1
I. Zonas esmagadas	1

Fonte: Adaptada BARTON et al., (1974).

Tabela 14-Alteração das paredes – Ja.

<b>Condição de alteração das paredes</b>	<b>Ja</b>
a-Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre paredes das fraturas	
A. Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis	0,75
B. Paredes sem alteração, somente leve descoloração	1
C. Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não argilosas	2
D. Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas	3
E. Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito e pequena quantidade de minerais expansivos	4
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
F. Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila	
G. Fraturas com preenchimento argiloso sobreconsolidado	6

H. Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado	8
I. Fraturas com preenchimento argiloso expansivo	8 a 12
c- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
J.K.L. Zonas com rochas trituradas ou esmagadas, com argila	6 a 8 ou 8 a 12
M. Zonas siltsas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila	5
N.O.P. Zonas ou bandas contínuas de argila	10 a 13 ou 13 a 20

Fonte: Adaptada BARTON et al., (1974).

Tabela 15- Ação da água subterrânea – Jw.

Descrição	Jw	Pressão de água (Mpa)
A. Escavações a seco, ou mínimas afluências de água	1	<0,1
B. Afluências ou pressões médias, lavagem dos preenchimentos, ocasionalmente	0,66	0,1 – 0,25
C. Afluências elevadas ou pressões elevadas em rocha competente com fraturas sem preenchimentos	0,5	0,25 – 1
D. Afluências elevadas ou pressões elevadas com lavagens consideráveis dos preenchimentos	0,33	0,25 – 1
E. Afluências excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas" decaindo com o tempo	0,2 – 0,1	>1
F. Afluências excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", contínuas sem diminuição com o tempo	0,1 – 0,005	>1

Fonte: Adaptada BARTON et al., (1974).

Tabela 16-Estado de tensões no maciço – SRF

Estado das tensões dos maciços	SRF
a- Zonas alteradas	
A. Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada	10
B. Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada	5
C. Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação > 50m)	2,5
D. Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila	7,5
E. - Zona esmagada em rocha competente, sem argila	5
F. Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação > 50m)	2,5
G. Fraturas abertas, fraturamento muito intenso (profundidade qualquer)	5
b- Rocha competente, problemas de tensões de rochas	
H. Tensões baixas, próximas à superfície	2,5
I. Tensões médias	1
J. Tensões altas	0,5 a 2,0
K. Explosões moderadas de rochas	5 a 10

L. Explosões intensas de rochas	10 a 20
c- Rochas incompetentes	
M. Tensões moderadas	5 a 10
N. Tensões elevadas	10 a 20
d- Rochas expansivas	
O. Pressão de expansão moderada	5 a 10
P. Pressão de expansão elevada	10 a 15

Fonte: Adaptada BARTON et al., (1974).

A Equação (14) pode ser subdivida em parcelas, sendo cada uma dessas parcelas uma característica do maciço rochoso

$\frac{RQD}{J_n}$  - Geometria dos blocos.







$\frac{J_r}{J_a}$  - Resistência ao cisalhamento entre blocos.

$\frac{J_w}{SRF}$  - Tensões no maciço.

### 3.4.3 GSI

O GSI (Geological Strength Index), foi desenvolvido por Hoek et al. em 1994, tem como função principal estimar parâmetros importantes para o Hoek-Brown generalizado (item 3.3.2) como por exemplo parâmetros de resistência e avaliar o comportamento do maciço rochoso devido a influência de descontinuidades. O GSI trata-se de um sistema de classificação para maciços rochosos considerado subjetivo, tendo em vista que o método utiliza de ábacos e observações feitas em campo para determinar a qualidade do maciço. A Figura (6) apresenta um ábaco de campo para classificação de maciços através do GSI.

Figura 6- Ábaco de campo para classificação de maciços através do GSI

<p>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICO PARA ROCHAS FRATURADAS (Hoek e Marinos, 2000)</p> <p>Para a litologia, estrutura e condição de superfície das descontinuidades, estime o valor médio do GSI. Não tente ser muito preciso. Cotar um intervalo de 33 a 37 é mais realista do que estabelecer GSI = 35. Note que a tabela não se aplica a rupturas controladas estruturalmente. Onde estruturas planares de baixa resistência estiverem presentes em uma orientação desfavorável em relação à face da escavação, estas dominarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento das superfícies em rochas propensas a se deteriorarem como resultado da umidade será reduzida se tiver presença de água. Quando trabalhar com rochas nas categorias regular a muito pobre, um deslocamento para a direita deve ser feito em condições úmidas. A pressão da água é tratada com uma análise dos esforços efetivos.</p>		<p>CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE</p>				
ESTRUTURA		MUITO BOA	BOA	REGULAR	POBRE	MUITO POBRE
		Superfície muito rugosa, não intemperizada, fresca	Superfície rugosidade, levemente intemperizada, com manchas ferruginosas	Superfície lisa, moderadamente intemperizada e alterada	Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada com cobertura compacta ou preenchimento de fragmentos angulares	Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada, com cobertura ou preenchimento argiloso
		DIMINUI A QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →				
	INTACTA OU MACIÇA - Rocha intacta ou maciça, in situ, com poucas descontinuidades amplamente espaçadas	90	80		N/A	N/A
	FRATURADA - Maciço rochoso não perturbado com blocos interconectados e cúbicos, formados por três famílias de descontinuidades		70			
	MUITO FRATURADA - Maciço rochoso parcialmente perturbado, com blocos interconectados angulares e multifacetados formados por quatro ou mais famílias de juntas		60			
	FRATURADA/PERTURBADA/DEFORMADA - Maciço rochoso dobrado, com blocos angulares formados por várias famílias de descontinuidades que se interceptam. Estratificação ou xistosidade persistentes		50	40		
	DESINTEGRADA - Maciço rochoso pobremente interconectado, altamente fraturado, com fragmentos de rochas angulares e arredondadas			30	20	
	FOLIADA/CISALHADA - Ausência de blocos devido a pouco espaçamento de xistosidades de baixa resistência ou planos de cisalhamento	N/A	N/A			10
		↑ DIMINUI OS BLOCOS DE ROCHA INTERCONECTADOS				

Fonte: Adaptado de Marinos e Hoek (2000).



### 3.5 Relação entre os sistemas de classificação

Buscando uma relação entre os sistemas de classificação diversos autores desenvolveram equações para relacionar o RMR e o Q de Barton. Bieniawski (1984), após a análise de casos reais em diferentes continentes do planeta, projetou a Equação (15) correlaciona o RMR e sistema Q.

$$RMR = 9 \ln \ln Q + 44 \quad (15)$$

Abad et al. (1983) propuseram para tuneis de mineração, após analisarem diversas minas de carvão a Equação (16)

$$RMR = 10,5 \ln \ln Q + 42 \quad (16)$$

De acordo com Bieniawski (1989), o GSI se associa com o RMR, segundo a Equação (17)

$$GSI = RMR - 5 \quad (17)$$

Segundo Hoek et al. (2013), o GSI se relaciona com os parâmetros do RMR e do Sistema Q, para o RMR o GSI pode ser associado junto ao JCond89 e no Q de Barton o GSI se correlaciona aos parâmetros Jr e Ja, segundo as Equações (18) e (19), respectivamente.

$$GSI = 1,5 JCond + \frac{RQD}{2} \quad (18)$$

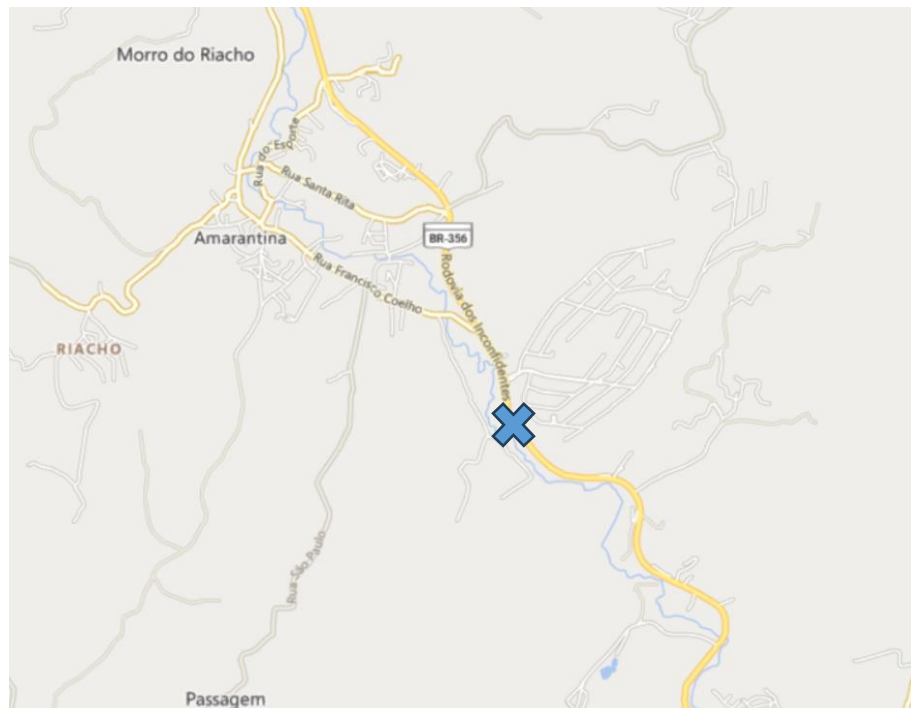
$$GSI = \frac{52 Jv/Ja}{(1 + \frac{Jr}{ja})} + \frac{RQD}{2} \quad (19)$$

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Localização do talude estudado

O maciço rochoso utilizado nesse estudo se localiza em Amarantina, distrito do município de Ouro Preto- MG, situado na BR-356 na coordenada  $20^{\circ}19'27''S$   $43^{\circ}41'31''W$ , conforme as Figuras (7) e (8).

Figura 7- Localização da área de estudo indicada pelo “X”



Fonte: Google Earth (2023).

Figura 8- Maciço rochoso analisado.



Fonte: Do Autor (2023).

#### 4.2 Levantamento geológico- geotécnico

A atividade de campo foi realizada no dia 27 de outubro de 2023. O maciço apresenta aproximadamente 5 metros de altura, uma direção de mergulho equivalente a  $86^\circ$ , a rocha predominante é um gnaiss pertencente ao complexo do Bação, Figura (9).

Figura 9-Altura do Maciço rochoso.



Fonte: Do Autor (2023).

Os parâmetros tomados durante o levantamento de campo foram os seguintes: A orientação das descontinuidades; condições das descontinuidades (abertura, persistência, espaçamento, rugosidade, grau de alteração e preenchimento) e o grau de alteração do maciço e a resistência da rocha.

A orientação das descontinuidades foi tomada com a utilização da bússola do tipo Clar e com o aplicativo “Clino”, a Figura (10) representa o modelo de bússola utilizado. As condições das descontinuidades como espaçamento, abertura e persistência foram obtidos com o uso de trena e régua, já o preenchimento e grau de alteração foi registrado por meio de uma análise visual, com auxílio das Tabelas (2) e (6). Por fim, a rugosidade foi estimada através do pente de Barton de 20 centímetros, junto ao ábaco do perfil de rugosidades (Figura 3), na Figura (11) representa uma das aplicações do pente de Barton.

Figura 10- Bússola utilizada.



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 11-Aplicação do pente de Barton.



Fonte: Do Autor (2023).

A resistência da rocha foi obtida através do teste do martelo de geólogo. No teste do martelo de geólogo (Figura 12) foram observadas as características do maciço segundo a tabela da ISRM (1981) e foi classificado respeitando a faixa de  $R_0$  até  $R_6$ . Com a classificação em mãos foi possível obter uma faixa significativa de valores representativos para compressão uniaxial, conforme a Tabela (1).

Figura 12-Martelo de Geólogo.



Fonte: Do Autor (2023).

Os sistemas de classificação aplicados nesse trabalho foram o RMR, Sistema Q e GSI. Foram então obtidos os parâmetros requeridos para a classificação de cada um dos sistemas. Em conforme com Bieniaswky (1973), os parâmetros coletados para a classificação do RMR, foram o espaçamento entre descontinuidades, a persistência das descontinuidades, o grau de alteração do maciço e o grau de resistência. Para a classificação do sistema Q, foram coletados o  $J_n$ ,  $J_r$  e  $J_a$ , que representam o número de famílias de descontinuidade, a rugosidade da parede e o índice de alteração das paredes, respectivamente. Por fim, as informações necessárias para a classificação do GSI, foram coletados os dados relevantes para a classificação do critério pelo ábaco proposto por Hoek et al. (1994).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados todos os resultados e parâmetros obtidos no trabalho. Os dados levantados em campo foram importantes para a classificação do maciço nos respectivos métodos de classificação considerados importantes para o presente trabalho, métodos já descritos no capítulo 3.4.

### **5.1 Caracterização**

O Maciço rochoso estudado possui aproximadamente 5 metros de altura, é composto por gnaiss sendo pertencente ao complexo cristalino do Bação, onde é atribuído o nome de gnaiss do funil. O talude apresenta grau de alteração constante em toda sua extensão, sendo pouco alterado (W2), mas foi necessária uma divisão em setores, visto que o corpo rochoso apresentava variações consideráveis em certos parâmetros de estudo, sendo esses parâmetros a persistência, rugosidade, grau de fraturamento e espaçamento das descontinuidades, além de diferentes resistências para rocha intacta. Na Figura (13), esta apresentada a setorização proposta.

Figura 13-Setorização proposta para o talude.



Fonte: Do Autor (2023).

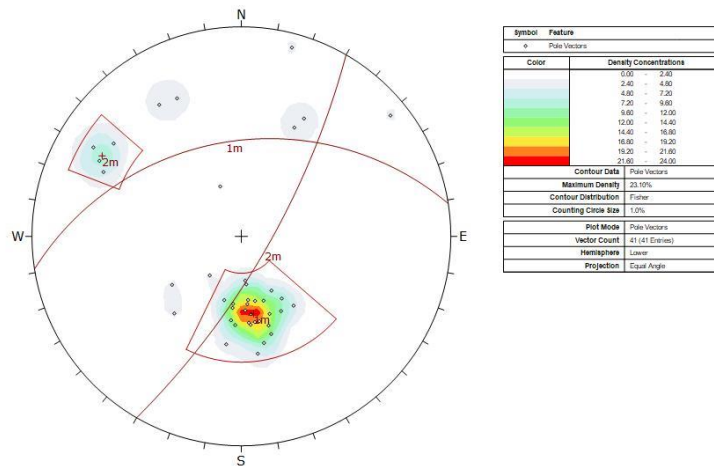
No decorrer da coleta de dados em campo foram determinadas duas famílias de descontinuidade, sendo uma família fratura e uma família foliação, o talude apresenta orientação média de 86/85. Com base nas medidas tomadas em campo foram definidas as famílias, com o auxílio do *software Dips*, foram realizadas as definições de orientação média das famílias de descontinuidades, Tabela (17), na Figura (14) é apresentado o estereograma.

Tabela 17-Orientação média das famílias de descontinuidades.

Família de descontinuidade	Orientação média
A. Foliação	248/42
B. Fratura	162/70

Fonte: Do Autor (2023).

Figura 14-Estereograma das famílias de descontinuidade

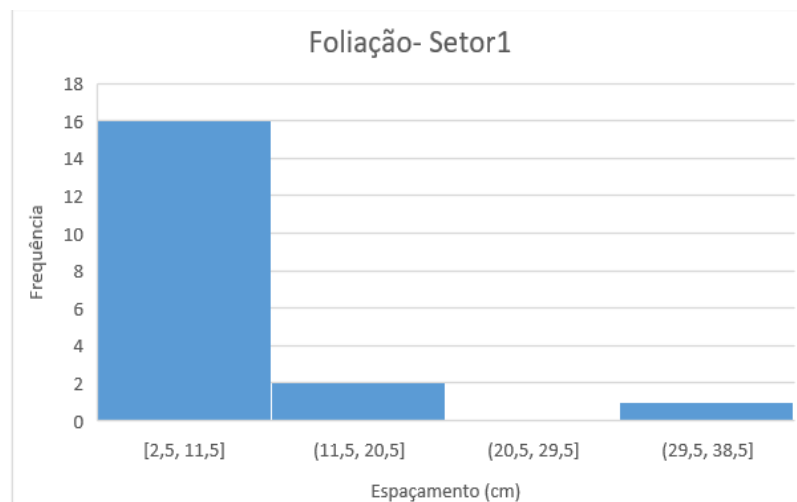


Fonte: Do Autor (2023).

### 5.1.1 Critérios das descontinuidades

Devido a existência de características ligeiramente distintas na extensão do maciço rochoso, foram escolhidas algumas ferramentas com o intuito de simplificar a exposição dos dados coletados em campo. Os valores obtidos para o espaçamento das descontinuidades estão apresentados nos histogramas das Figuras (15) a (18), sendo feita uma classificação por famílias das descontinuidades (foliação e fratura) junto a seus respectivos setores. Por conta da aleatoriedade nos valores de espaçamento, foi considerada a média por família nos futuros cálculos de RQD e RMR.

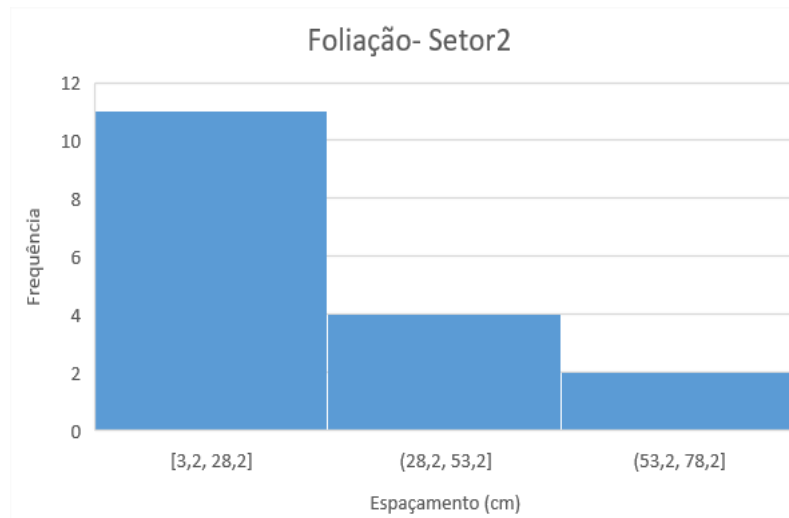
Figura 15- Histograma com as medidas de espaçamento da foliação no setor 1.



Fonte: Do Autor (2023).

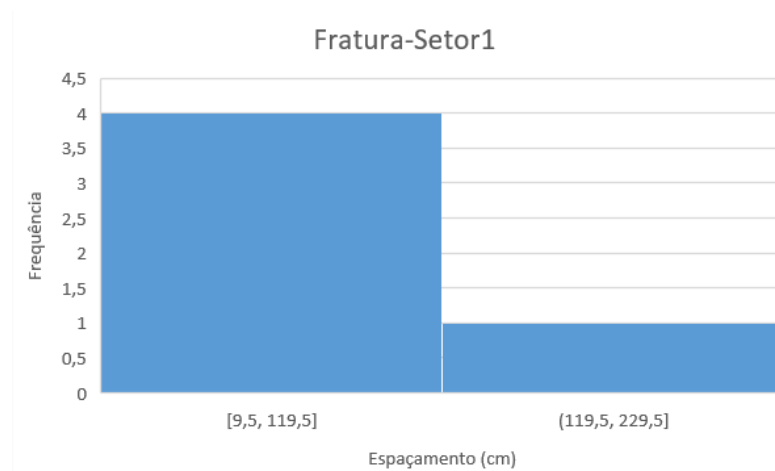


Figura 16-Histograma com as medidas de espaçamento da foliação no setor 2.



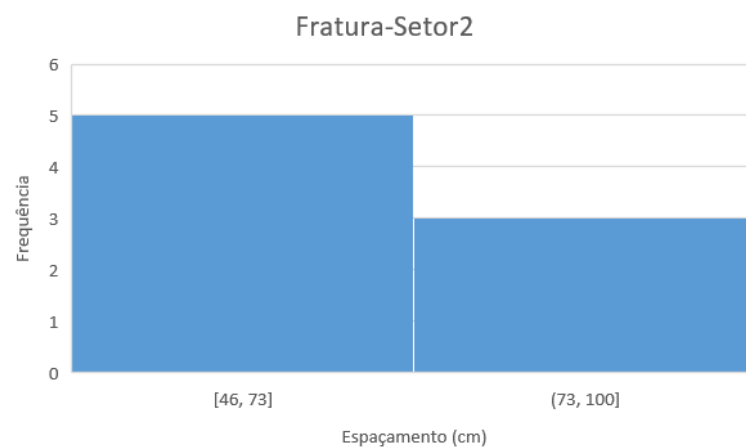
Fonte: Do Autor (2023).

Figura 17- Histograma com as medidas de espaçamento da fratura no setor 1.



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 18- Histograma com as medidas de espaçamento da fratura no setor 2.



Fonte: Do Autor (2023).

Foram considerados os parâmetros de cada uma das famílias (foliação e fratura) dentro do seu respectivo setor pertencente ao talude (Tabela 18). Em geral, apenas a persistência se mostrou uma variável que apresentou mudanças bruscas entre os setores, indo da faixa de 1 a 3m no setor 1 até a uma escala proporcional à altura do talude, faixa essa que se enquadra na classificação de 3 a 10m.

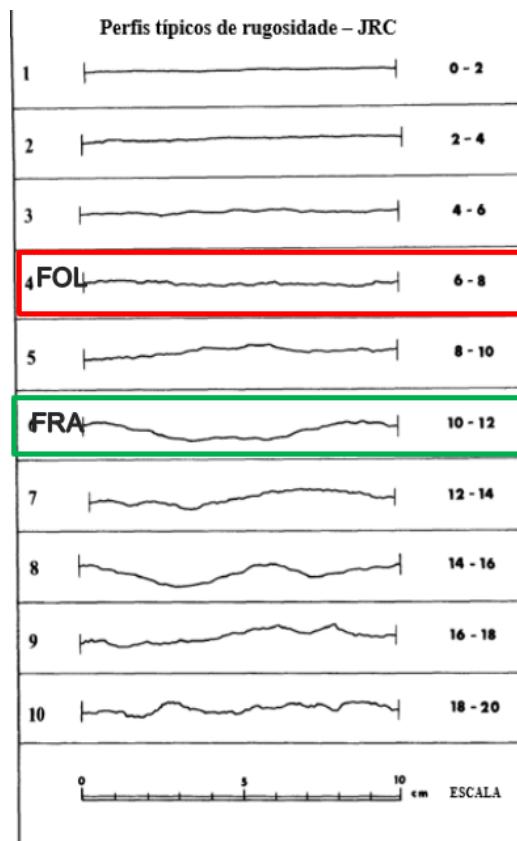
Tabela 18-Parâmetros das famílias de descontinuidade.

	<b>Foliação-setor 1</b>	<b>Foliação-setor 2</b>	<b>Fratura-setor 1</b>	<b>Fratura-setor 2</b>
Abertura	Sem Abertura	Sem Abertura	Sem Abertura	Sem Abertura
Rugosidade	Levemente rugosa	Levemente rugosa	Rugosa	Rugosa
Preenchimento	Sem	Sem	Sem	Sem
	Preenchimento	Preenchimento	Preenchimento	Preenchimento
Alteração	Pouca Alteração	Pouca Alteração	Pouca Alteração	Pouca Alteração

Fonte: Do Autor (2023).

A rugosidade foi avaliada utilizando o pente de Barton de 20cm em todas as famílias e com o auxílio do ábaco dos perfis típicos de rugosidade (Figura 19), foram determinados valores representativos para cada uma das famílias.

Figura 19-Ábaco dos perfis típicos de rugosidade.



Fonte: Do Autor (2023).

Na Tabela (19), apresenta um resumo dos valores relacionados aos critérios analisados em campo, ressaltando que em todos os casos foi considerada uma postura conservadora na projeção de resultados.

Tabela 19-Resumo dos valores para critérios analisados.

Parâmetros	Foliação Setor1	Foliação Setor2	Fratura Setor1	Fratura Setor2
Espaçamento (cm)	8,96	25,66	58,25	66,25
Abertura	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Preenchimento	Sem	Sem	Sem	Sem
Rugosidade	8	8	10	10
Alteração	Pouca Alteração	Pouca Alteração	Pouca Alteração	Pouca Alteração

Fonte: Do Autor (2023).

## 5.2 Resistência a compressão uniaxial

### 5.2.1 Ensaio com o martelo de geólogo

O ensaio foi realizado no maciço gnáissico e avaliado conforme a Tabela 1, o setor 1 apresentou o resultado referente a uma rocha resistente (R4), já o setor 2 se classifica como uma rocha muito resistente (R5), sendo a estimativa de UCS 50 – 100 MPa e 100-250 MPa para cada setor respectivamente.

## 5.3 Classificação geomecânica

### 5.3.1 RQD

O valor do RQD foi estimado através da equação proposta por Palmström (1982), devido a inexistência de testemunhos de sondagem. Foi utilizado o Jv conforme descrito nas Equações (12) e (13), utilizando os valores médios dos espaçamentos das famílias de descontinuidade e levando em consideração a setorização proposta, foram encontrados valores de RQD para cada setor. Segue os resultados nas Tabelas (20) e (21)

Tabela 20-Resultados para o Jv.

<b>Setores</b>	<b>Jv</b>
Setor1	13,16
Setor2	5,81

Fonte: Do Autor (2023).

Tabela 21-Resultados para o RQD.

<b>Setores</b>	<b>RQD (%)</b>
Setor1	71,57
Setor2	95,83

Fonte: Do Autor (2023).

Na Tabela (22) estão apresentados os valores adjacentes de sua classificação.

Tabela 22-Classificação do RQD para os valores encontrados

<b>Setores</b>	<b>RQD (%)</b>	<b>Classificação</b>
Setor1	71,57	Razoável
Setor2	95,83	Excelente

Fonte: Do Autor (2023).

### 5.3.2 RMR

No cálculo do RMR, foi considerado o valor de RQD para cada um dos setores, já o valor da resistência da rocha intacta considerado foi de 50 MPa, para o setor 1 e de 100 MPa para o setor2, valores esses obtidos através do Martelo de geólogo e pela relação apresentada na Tabela (1), sendo aplicada sempre uma medida conservadora na consideração dos valores. Os valores encontrados para RMR foram de 67 e 81 para cada setor, valores esses que segundo Bieniawski (1989) se classificam como “Boa” e “Muito boa”, sendo pertencentes as classes II e I, respectivamente. Na Tabela (23), estão os parâmetros considerados junto ao peso associado para fins de cálculo do RMR.

Tabela 23- Pesos para cálculo do RMR.

	<b>Setor 1</b>	<b>Peso RMR</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Peso RMR</b>
RQD (%)	71,57	13	95,83	20
UCS (MPa)	50	7	100	12
Água	Seco	15	Seco	15
Persistência (m)	1 – 3m	4	3 – 10m	2
Espaçamento(mm)	145,55	8	483,68	10
Abertura (mm)	Sem	6	Sem	6
Preenchimento (mm)	Sem	6	Sem	6
Rugosidade	Levemente Rugosa	3	Rugosa	5
Alteração	Ligeiramente Alterada	5	Ligeiramente Alterada	5
<b>RMR</b>	<b>67</b>		<b>81</b>	
	<b>(Boa)</b>		<b>(Muito Boa)</b>	

Fonte: Do Autor (2023).

### 5.3.3 Sistema Q

Com os valores de RQD obtidos e discutidos no item 5.3.1 e as condições das descontinuidades já determinadas, foram determinados os parâmetros para cálculo do sistema Q presentes na Tabela (24), que conforme o padrão utilizado no RMR apresenta o valor de Q por setor. Os valores de Q, foram obtidos através de uma adaptação da equação 14, os valores de Q encontrados são classificados como Bom (35,79) e muito bom (47,92), para cada setor respectivamente.

Tabela 24-Parâmetros e cálculo do sistema Q.







	<b>Setor 1</b>	<b>Peso Q</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Peso Q</b>
RQD (%)	71,57	71,57	95,83	95,83
Jn	Uma família de fraturas	3	Uma família de fraturas	3
Jr	Fraturas rugosas ou irregulares, planas.	1,5	Fraturas rugosas ou irregulares, planas.	1,5
Ja	Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\varphi=25-30^\circ$	1	Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\varphi=25-30^\circ$	1
<b>Valores de Q</b>	<b>35,79</b>		<b>47,92</b>	
	<b>(Bom)</b>		<b>(Muito Bom)</b>	

Fonte: Do Autor (2023).

5.3.4 GSI

Por se tratar de um método de análise qualitativo, o GSI foi classificado através do ábaco proposto por Hoek et al (2000) (Figura 20), obtendo valores para cada um dos setores, sendo eles 55 e 65 respectivamente.

Figura 20- Ábaco GSI proposto por Hoek et al.

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICO PARA ROCHAS FRATURADAS (Hoek e Marinos, 2000) Para a litologia, estrutura e condição de superfície das descontinuidades, estime o valor médio do GSI. Não tente ser muito preciso. Cotar um intervalo de 33 a 37 é mais realista do que estabelecer GSI = 35. Note que a tabela não se aplica a rupturas controladas estruturalmente. Onde estruturas planares de baixa resistência estiverem presentes em uma orientação desfavorável em relação à face da escavação, estas dominarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento das superfícies em rochas propensas a se deteriorarem como resultado da umidade será reduzida se tiver presença de água. Quando trabalhar com rochas nas categorias regular a muito pobre, um deslocamento para a direita deve ser feito em condições úmidas. A pressão da água é tratada com uma análise dos esforços efetivos.		CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE		QUALIDADE DA SUPERFÍCIE	
ESTRUTURA	DIMINUI A			→	
 <b>INTACTA OU MACIÇA</b> - Rocha intacta ou maciça, in situ, com poucas descontinuidades amplamente espaçadas	90 80			N/A	N/A
 <b>FRATURADA</b> - Maciço rochoso não perturbado com blocos interconectados e cúbicos, formados por três famílias de descontinuidades	70				
 <b>MUITO FRATURADA</b> - Maciço rochoso parcialmente perturbado, com blocos interconectados angulares e multifacetados formados por quatro ou mais famílias de juntas	60				
 <b>FRATURADA/PERTURBADA/DEFORMADA</b> - Maciço rochoso dobrado, com blocos angulares formados por várias famílias de descontinuidades que se interceptam. Estratificação ou xistossidade persistentes	50		40		
 <b>DESINTEGRADA</b> - Maciço rochoso pobremente interconectado, altamente fraturado, com fragmentos de rochas angulares e arredondadas	40		30		20
 <b>FOLIADA/CISALHADA</b> - Ausência de blocos devido a pouco espaçamento de xistossidades de baixa resistência ou planos de cisalhamento	30		20		10

Fonte: Adaptado de MARINOS e HOEK (2000).

#### 5.4 Parâmetros dos critérios de resistência

Na Tabela (25), estão apresentados os valores dos parâmetros pertencentes ao critério de Hoek e Brown (2002), tais parâmetros foram obtidos através das Equações 4, 5 e 6. O valor considerado para o parâmetro D foi de 0,7, com base na perturbação sofrida pelo maciço no desmonte e o valor de mi considerado foi de 28, visto que a rocha predominante ao maciço é um gnaiss. Seguem os resultados.

Tabela 25-Parâmetros do critério de Hoek e Brown (2002).

	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>
D	0,7	0,7
Mb	2,3624	4,0924
A	0,0015	0,0063
S	0,5040	0,5020

Fonte: Do Autor (2023).

O ângulo de atrito básico das discontinuidades pode ser obtido através da equação proposta por Barton (2002). Onde o valor encontrado foi de  $56^\circ$ , valor esse muito alto, sendo totalmente fora da realidade e tornando então inviável a sua utilização, isso acontece devido ao fato que a equação proposta por Barton (2002), superestima os valores para o ângulo de atrito, ou seja, apresenta uma estimativa de valores que são considerados muito altos, sendo assim o valor utilizado foi o valor de  $25^\circ$ , que é o valor conservador sugerido pelo  $J_a=1$ . Segue o cálculo.

$$\phi_r = \tan^{-1} ( J_r / J_a ) = \tan^{-1} ( 1.5 / 1 ) = 56^\circ$$

#### 5.5 Relação entre os sistemas de classificação

Na Tabela (26), estão exibidos os valores para as classificações que foram obtidos através de equações de relação entre parâmetros. Salientando que, o valor para um sistema de classificação não deve ser obtido através do valor de outro sistema, visto que nem sempre os valores obtidos serão os mesmos que os valores reais.

Tabela 26- Valores obtidos através das equações de correlação entre parâmetros.

<b>Setor</b>	<b>Equações</b>	<b>Resultado</b>	<b>Valor Estimado</b>
1	$RMR = 9 \ln Q + 44$	76,2	67
	$RMR = 10,5 \ln Q + 42$	79,5	
	$GSI = RMR - 5$	57	55
2	$RMR = 9 \ln Q + 44$	77,8	81
	$RMR = 10,5 \ln Q + 42$	82,6	
	$GSI = RMR - 5$	66	65

Fonte: Do Autor (2023).

Os valores obtidos através das equações de correlação entre os parâmetros, foram no geral valores aceitáveis, apenas o setor 1 que apresentou uma maior discrepância entre os valores de RMR, já os valores de RMR para o setor 2, foram consideravelmente próximos. Por fim, os valores de GSI para ambos os setores apresentaram os melhores resultados quando comparados os valores das equações e os valores estimados.

## 5.6 Análise cinemática

As análises cinemáticas foram realizadas com auxílio do *software Dips v.5 da Rocscience Inc.* Os parâmetros encontrados na classificação geomecânica foram utilizados na realização das análises cinemáticas. Em resumo, os tipos de ruptura analisados foram planar, em cunha e tombamento de blocos, os resultados das probabilidades encontrados foram 0%, 36,71% e 15,61, respectivamente. Nas Figuras (21) a (23) estão apresentadas as análises probabilísticas dos tipos de ruptura averiguados.

Figura 21-Análise probabilística- Ruptura planar.

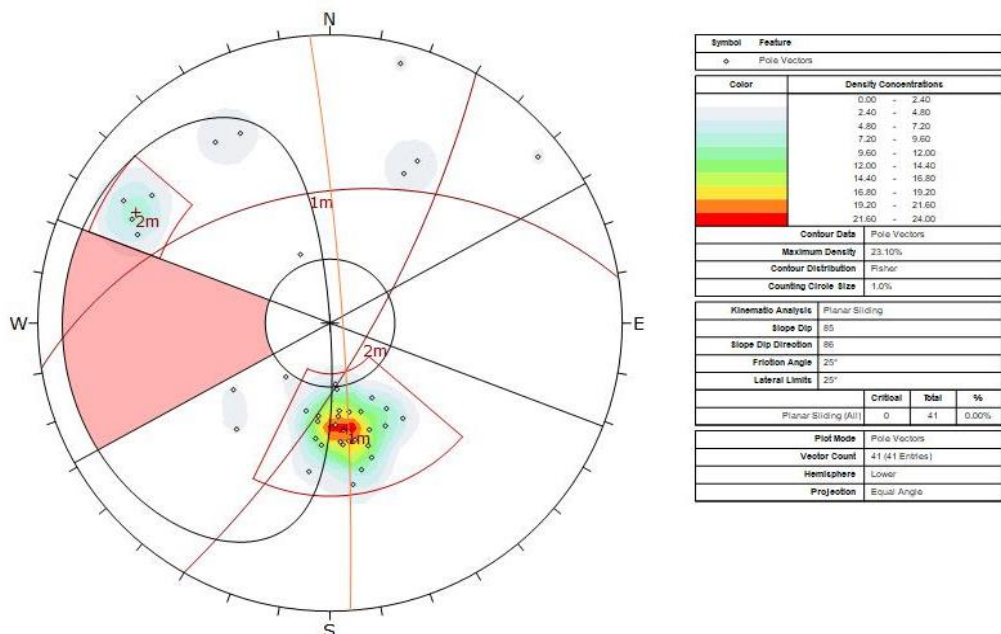


Figura 22-Análise probabilística- Ruptura em cunha.



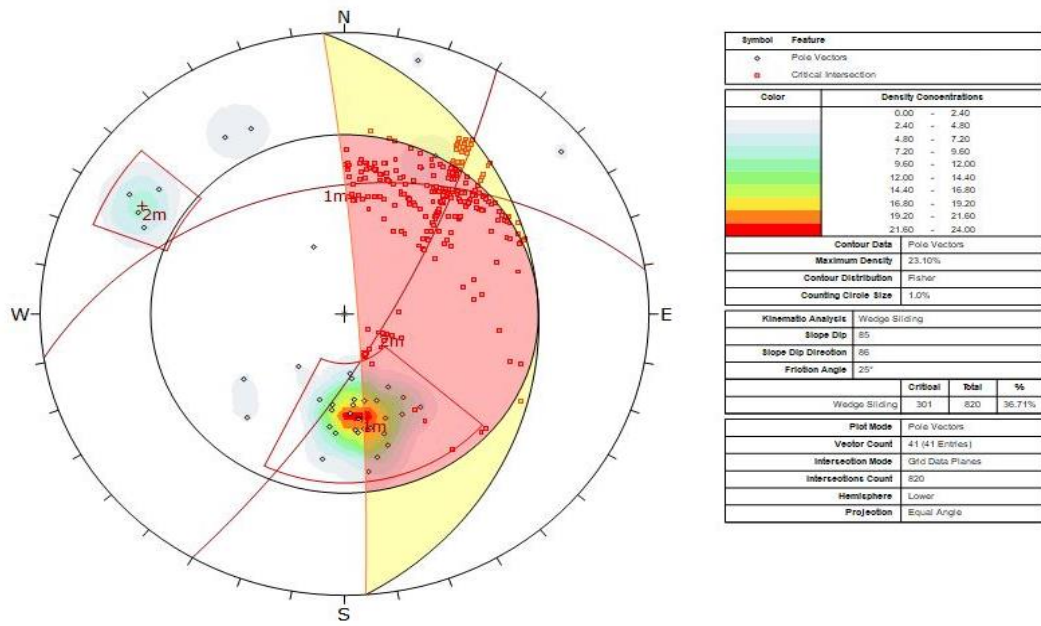
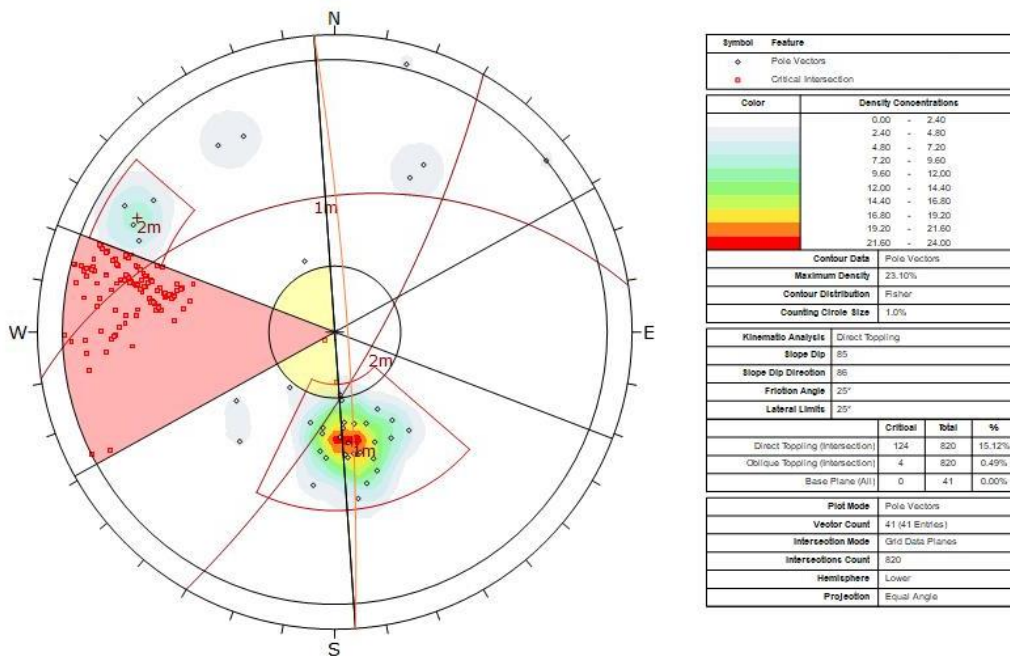


Figura 23-Análise probabilística- Tombamento de blocos.



## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização geológica – geotécnica de um talude localizado na BR-356 em Amarantina, distrito do município de Ouro Preto -MG, onde todos os objetivos foram alcançados. A atividade de campo possibilitou a coleta de parâmetros para a rocha intacta, descontinuidades e do maciço rochoso, além de uma definição previa do número de famílias de descontinuidades presentes no maciço. Junto a isso, foi possível classificar o maciço rochoso e coletar parâmetros iniciais utilizados e no RMR e no sistema Q, além do GSI.

Com os dados de campo em mãos, foram realizados estereogramas, onde foram definidas duas famílias de descontinuidades. As análises cinemáticas foram geradas com o intuito de descobrir os possíveis modelos de ruptura para o talude, onde apontaram como modelos mais críticos a ruptura em cunha e o tombamento de blocos.

A partir dos dados provenientes da análise de campo, foi possível estimar o RQD para o maciço e calcular os valores para os sistemas de classificação RMR, Sistema Q e GSI.

Na literatura estão dispostas diversas equações que correlacionam os sistemas de classificação e as propriedades do maciço. Essas equações foram testadas para os setores do talude estudado e forneceram valores diferentes quando comparados com os estimados pelos parâmetros. Salienta-se que essas variações existem pelo fato das equações serem desenvolvidas de forma empírica e em maciços diferentes.

Sendo assim, o presente trabalho realça a importância da classificação geomecânica como ferramenta na estimação de parâmetros, quando não é possível a realização de ensaios laboratoriais. Ressalvasse a necessidade de uma prática cuidadosa, a fim de evitar erros com alto grau de significância, que serão prejudiciais para uma classificação com a maior taxa de êxito.

## REFERÊNCIAS

ABAD, J. CELADA, B. CHACON, E. GUTIERREZ V. and HIDALGO, E. **Application of Geomechanical Classification to Predict the Convergence of Coal Mine Galleries and to Design Their Supports**. Proc. 5th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Melbourne, vol. 2, 1983, pp. E15-E19.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). **Rochas e Solos: NBR 6502**. Rio de Janeiro. 18p.

AZEVEDO; MARQUES. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Viçosa: UFV, 2002. 363p.

BACELLAR, L.A.P. **CONDICIONANTES GEOLÓGICOS, GEOMORFOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DOS MECANISMOS DE VOÇOROCAMENTO NA BACIA DO RIO MARACUJÁ, OURO PRETO, MG**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2000. 226p. (Tese de Doutorado).

BARTON, Nicholas; LIEN, Reidar; LUNDE, J. J. R. M. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock mechanics**, v. 6, p. 189-236, 1974.

BARTON, N., MCHOUBEYV. (1977). **The shear strength of rock joints in theory and practice**. Rock mechanics, 10p.1-54.

BARTON, NICK & BANDIS, STAVROS. (1982). **Effect of block size on the shear behavior of jointed rocks**. Proceedings - Symposium on Rock Mechanics. 739-760.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. **Trans. S. Afr. Inst.Civ. Eng.**, v. 15, p. 335 – 344, 1973.

BIENIAWSKI, Z.T. (1984). **Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling**. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 97-133.

BIENIAWSKY Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering.** John Wiley & Sons, 1989.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). **Engineering rock mass classification.** New York: John Wiley

BRADY, Barry HG; BROWN, Edwin T. **Rock mechanics: for underground mining.** Springer science & business media, 2006.

CELLA, P. R. C., MAGALHÃES, F. S. (1998). **Estrutura dos Maciços Rochosos.** In: OLIVEIRA E BRITO (1998). Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE. p. 39- 55.

DEERE, D.U., HENDRON, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. (1967). **Design of surface and near surface construction in rock.** Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. Rock mech., (ed. C. Fairhurst), p. 237-302.

DEERE, D. U; Deere, D. W. **Rock quality designation (RQD) after twenty years.** US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1989.

DOS SANTOS, Tatiana Barreto. **APLICABILIDADE DAS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS E RETROANÁLISES PARA ESTIMAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MACIÇOS ROCHOSOS.** 2015. 147 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

GIUSEPONE, F. **Critérios recentes de ruptura na estabilidade de lavra a céu aberto.** 2011.

GUIDICINI, G.; Nieble, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** São Paulo: Blucher, 1983. 196 p.

HOEK, E. Strength of rock and rock masse. **Mechanics and Mining Sciences**, v. 15, p. 319-368. 1994

HOEK, E.P.K. KAISER, W.F. BAWDEN. **Support of underground excavations in hard rock**. A.A. Balkema, Rotterdam (1995)

HOEK, E.; KAISER P. K.; BAWDEN W. F. Support of Underground Excavations in Hard Rock. **CRC Press**. Rotterdam, Balkema, 2000

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. Hoek–Brown failure criterion—2002 edition. **Proc. North Am. Rock Mech. Soc. Meeting**, Toronto, Canada, p. 267–73. 2002.

HOEK, E.; CARTER, T. G.; DIEDERICHS, M. S. Quantification of the geological strength index chart. In: US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 47., 2013, São Francisco. **Proc. [...]**. São Francisco: ARMA, 2013.

HUDSON, J.A.; HARRISON J.P. (1997). **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles**. ELSEVIER SCIENCE Ltd Oxford,UK.

ISRM - International Society for Rock Mechanics. Suggested methods for the quantitative descriptions of discontinuities in rock masses. Intl. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. V.15, p.319-388,1978.

ISRM - International Society for Rock Mechanics. **Rock Characterization, Testing and Monitoring** – ISRM Suggested methods, Pergamon Press, Oxford, E.T. Brown (ed), 1981, p. 211.

JQUES, D. S. **Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de volta grande, nazareno, minas gerais**. 2014. Tese (Magister Scientiae) – Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2014. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3841/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15/10/2023.

MARINOS V., MARINOS P., HOEK E. (2007). **The geological strength index: applications and limitations**. Bull Eng Geol Environ, eds. Springer, p. 55–65.

OJIMA, L. M., JÚNIOR, E. S. (1998). **Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. ABGE. São Paulo. 211-226 p.

OLIVEIRA; BRITO. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.

PALMSTRÖM, A. (1982). **The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing**. Proc. IV Int. Congr. IAEG, New Delhi, pp.221-228.

SALAROLI, I.S. **MAPEAMENTO LITOESTRUTURAL DA REGIÃO DE SANTO ANTÔNIO DO LEITE - OURO PRETO**. Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 1999 (Relatório do Trabalho Geológico de Graduação em Geologia).

SILVA, M. A. (2018). **Definição das famílias de descontinuidades com base em análise de agrupamentos. Estudo de caso: Morro da Mina**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia de Minas. 53 p.

VILELA, R.A. **GEOLOGIA DE UM SEGMENTO DO COMPLEXO MATAMÓRFICO BAÇÃO: ÁREA ENTRE GLAURA E CACHOEIRA DO CAMPO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS**. Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto. 1999 (Relatório do Trabalho Geológico de Graduação em Geologia).

