

## RAFAELLA RESENDE AMARAL

# CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS MARGINAIS À BR 262 ENTRE PARÁ DE MINAS E NOVA SERRANA

ARAXÁ/MG 2019

## **RAFAELLA RESENDE AMARAL**

# CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS MARGINAIS À BR 262 ENTRE PARÁ DE MINAS E NOVA SERRANA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Allan Erlikhman Medeiros Santos. Coorientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça.

ARAXÁ/MG 2019

## RAFAELLA RESENDE AMARAL

## CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS MARGINAS À BR 262 ENTRE PARÁ DE MINAS E NOVA SERRANA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 30 de novembro de 2019

Presidente e Orientador: Prof. Me. Allan Erlikhman Medeiros Santos Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Unidade Araxá

Membro Titular e Coorientador, Me. Guilherme Alzamora Mendonça

Junando Brandis

Membro Titular: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

desueva

Membro Titular: Eng." Me. Denise de Fátima Santos da Silva Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

## DEDICATÓRIA

## DEDICO ESTE TRABALHO

À Deus, aos meus familiares e a todos os amigos que estiveram comigo nesta caminhada.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as oportunidades que Ele me concedeu para que eu melhorasse como pessoa e profissionalmente. Quanto mais o tempo passa, mais vejo o quanto Deus é incrível com cada um de nós e agradeço a Ele e a Jesus profundamente por estarem ao meu lado em toda e qualquer situação.

Agradeço aos meus pais por me apoiarem, por serem meu alicerce e, mesmo ainda tendo a proteção e amparo de ambos, agradeço pelos momentos em que deixaram que eu "batesse as asas" e descobrisse o melhor caminho para mim. Agradeço porque, enquanto muitas pessoas não permitem o filho nascer, meus pais permitiram que eu estivesse viva e construísse minha história. Devo todo meu respeito e gratidão a eles.

Agradeço as minhas amigas e aos meus amigos, assim como ao meu irmão. Não citarei nomes aqui para não correr o risco de cometer a injustiça de esquecer algum deles, sendo que todos tem seu valor único e especial para mim. Agradeço pela lealdade, pelos momentos de risos, pela cumplicidade, pelo apoio e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador Allan Santos, assim como ao coorientador Guilherme Mendonça, à geóloga Denise (esposa do Allan), e à Laura Adriele (graduanda em Engenharia de Minas). Cada ensinamento e instrução a mim passados por vocês serão levados por toda a vida.

Agradeço a cada um dos meus professores da Engenharia de Minas por ampliarem o meu conhecimento acerca da mineração e suas técnicas. Da mesma forma, também agradeço a cada um dos meus colegas de curso que participaram dos grupos comigo, sendo estes o Programa de Educação Tutorial, o Diretório Acadêmico da Engenharia de Minas e o Crea-Jr MG Núcleo Araxá. Foi muito bom trabalhar com cada um de vocês.

#### RESUMO

Os aspectos negativos relacionados a instabilidade em taludes são diretos, tais como riscos a exposição de funcionários e equipamentos a condições inseguras, e indiretos tais como a interdição da área afetada e no caso das minerações, soterramento das reservas minerais com significativa diluição das reservas, perdas na produção com a alocação de equipamentos para reestabelecimento das áreas, entre outros. Dentre os tipos de instabilidade em taludes rochosos, destacam-se as condicionadas pela presença de descontinuidades, tais como as rupturas planares, em cunha e tombamento de blocos. Posto isso, a presente pesquisa tem como objetivo o estudo geológico- geotécnico dos taludes rochosos marginais à Rodovia BR-262. As litologias do local objeto de estudo foram determinadas e correlacionadas com a geologia regional dos maciços rochosos. E em seguida houve levantamentos das descontinuidades e características do maciço rochoso com a determinação das classificações de maciço rochosos, realização da análise cinemática e de estabilidade dos taludes, finalizando com medidas de contenção para os mecanismos de instabilidade identificados. Dentro da metodologia, a determinação do RMR foi efetuada segundo Bieniawski (1976). O GSI foi determinado de acordo com os critérios de Hoek & Brown (1997). O Sistema-Q foi determinado segundo Barton et al. (1974). Os resultados obtidos para o RMR variam, no Talude 1, para os setores 2 e 3, de classes I (muito boa) a III (regular). Já para o setor 1 do Talude 1, o RMR varia entre as classes II (boa) e III. Para o Talude 2, o RMR variou entre as classes I a II. Para o Talude 3, no setor 1, o RMR variou entre as classes II e III. No setor 2 do Talude 3, as classes de RMR variaram entre II e III. No setor 3 do Talude 3, o RMR se encontrou apenas na classe II. Os valores de Q de Barton foram de classe IV (bom) para Taludes 1 e 3 e classe III (muito bom) para Talude 2. Os valores de GSI do Talude 1 foram 45 para o setor 1, 65 para o setor 2 e 60 para o setor 3, e para o Talude 2 foi de 65. Já para o Talude 3, os GSI obtidos foram de 55 para o setor 1, 60 para o setor 2 e 70 para o setor 3. O fator de segurança para ruptura planar do setor 2 do Talude 1 foi de 1,24; enquanto que para ruptura em cunha do setor 3 do Talude 1 foi de 1,76. Os métodos de contenção propostos foram de drenagem, retaludamento e uso de telas de contenção.

**Palavras-chave:** Caracterização geológica-geotécnica; Análise Cinemática; Fator de segurança; Classificação de maciços rochosos; BR262.

#### ABSTRACT

Aspects related to instability in securities are direct, such as risks in exposing employees and equipment in unsafe conditions, and indirect as interdiction of the affected area and in no case of mining, burial of mineral reserves with dilution of reserves, tests on production with allocation of equipment for restoration of areas, among others. Among the types of rock tone instability, highlighted as conditioned by the presence of discontinuities, such as planar, wedge and block toppling. That said, the present research has as objective the geological-geotechnical study of the marginal rocky volumes in the BR-262 Highway. How the lithologies of the local study object were correlated with a regional rock mass geology. And then there were increases in the discontinuities and characteristics of the rock mass with massive rock determination, kinematic analysis and talent stability, and containment measures for the instability mechanisms used. Within the methodology, the RMR determination was performed according to Bieniawski (1976). The GSI was determined according to the criteria of Hoek & Brown (1997). The Q-System was determined according to Barton et al. (1974). The results obtained for RMR defined in Slope 1 for sectors 2 and 3 of classes I (very good) to III (regular). For sector 1 of Slope 1, RMR varies between classes II (good) and III. For Slope 2, the RMR varied between classes I to II. For Slope 3, in sector 1, the RMR varied between classes II and III. In sector 2 of Slope 3, how RMR classes ranged from II to III. In sector 3 of Slope 3, RMR was found only in class II. Barton's Q values were class IV (good) for Slopes 1 and 3 and class III (very good) for Slope 2. The GSI values of Slope 1 were 45 for sector 1, 65 for sector 2 and 60 for sector 3, and for slope 2 was 65. For slope 3, GSI were captured from 55 for sector 1, 60 for sector 2 and 70 for sector 3. The safety factor for planar rupture sector 2 of slope 1 was 1.24; while for the breakdown in sector 3 of the embankment 1 was 1.76. The proposed containment methods were drainage, shredding and use of containment screens.

Keywords: Geological-geotechnical characterization; Kinematic analysis; Safety factor; Rock mass classification; BR262

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relação entre o grau de rugosidade e o JRC20
Figura 2: Metodologia de classificação do maciço rochoso através do GSI
Figura 3: Tipos de ruptura encontrados neste trabalho42
Figura 4: Tipos de rupturas representados em um esterograma43
Figura 5: Localização da Folha Pará de Minas46
Figura 6: Etapas realizadas para realizar este projeto48
Figura 7: Talude 1
Figura 8: Talude 2
Figura 9: Talude 3
Figura 10: Probabilidade de ocorrer ruptura planar
Figura 11: Probabilidade de ruptura em cunha quando o talude se encontra seco65
Figura 12: Probabilidade de ruptura em cunha considerando-se talude saturado
Figura 13: Probabilidade de tombamento de blocos direto
Figura 14: Probabilidade de Tombamento de blocos oblíquo considerando o talude como seco.
Figura 15: Probabilidade de Tombamento de blocos oblíquo considerando o talude como
saturado67
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 169
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
<ul> <li>Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1</li></ul>
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
<ul> <li>Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1</li></ul>
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1
Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1

Figura 26: Análise cinemática de ruptura planar para Talude 2 quando este se encontra saturado
de água
Figura 27: Análise cinemática para tombamento de blocos do Talude 283
Figura 28: Análise cinemática de ruptura planar para Talude 1, no setor 3, na porção superior,
quando este está sem presença de água84
Figura 29: Análise cinemática de ruptura em cunha para Talude 1 (setor 3 - superior) quando
este se encontra sem a presença de água
Figura 30: Análise cinemática de tombamento de blocos para Talude 1 (setor 3 - superior)
quando este se encontra sem a presença de água85
Figura 31: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 1 superior) quando este
se encontra completamente saturado com água91
Figura 32: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 1 superior ) quando
este se encontra saturado com água91
Figura 33: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 1 inferior) quando este se
encontra sem a presença de água92
Figura 34: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 1 inferior) quando este
se encontra sem a presença de água92
Figura 35: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 1 inferior) quando
este se encontra sem a presença de água93
Figura 36: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 2 (superior) quando este se encontra
sem a presença de água93
Figura 37: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 2 (superior) quando este se
encontra sem a presença de água94
Figura 38: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 2 (superior) quando este se
encontra seco
Figura 39: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 2 superior) quando
este se encontra saturado de água95
Figura 40: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 2 superior) quando este
se encontra saturado de água95
Figura 41: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 2 superior) quando este se
encontra saturado com água96

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Classificação do maciço rochoso mediante seu grau de alteração19
Tabela 2: Grau de resistência do maciço rochosos.    23
Tabela 3: Principais sistemas de classificações de maciço rochosos
Tabela 4: Relação entre o RQD e a qualidade da rocha.    26
Tabela 5: Quatro parâmetros com seus respectivos pesos para se obter os valores de RMR29
Tabela 6: Dois últimos parâmetros com seus respectivos pesos para classificação RMR30
Tabela 7: Classificação do maciço rochoso em classes do RMR
Tabela 8: Relação entre coesão do maciço rochoso, ângulo de atrito e classe de RMR30
Tabela 9: valores de Jn para o sistema de classificação Q
Tabela 10: Valores de Jr para o sistema de classificação Q32
Tabela 11: Valores de Ja para o sistema de classificação Q33
Tabela 12: Valores de Jw para o sistema de classificação Q
Tabela 13: Valores de SRF para o sistema de classificação Q34
Tabela 14: Definição de classes para o sistema Q35
Tabela 15: Classificação da estabilidade em relação ao fator de segurança44
Tabela 16: Parâmetros para cálculo do Q de Barton para Talude 1
Tabela 17: Valores utilizados para calcular o RMR no setor 1 do Talude 1 (porção superior).
Tabela 18: Valores utilizados para calcular o RMR no setor 1 do Talude 1 (porção inferior).
Tabela 19: Valores utilizados para calcular o RMR nos setores 2 e 3 do Talude 1 (porção inferior
de ambos)
Tabela 20: Valores utilizados para calcular o RMR nos setores 2 e 3 do Talude 1 (porção
superior de ambos)
Tabela 21: Resultado das classificações de maciços rochosos para o Talude 156
Tabela 22: Classes de RMR obtidas para os setores do Talude 1
Tabela 23: Parâmetros utilizados para cálculo de Q de Barton no Talude 258
Tabela 24: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR para Talude 258
Tabela 25: Valores das classificações de maciços rochosos utilizadas para o Talude 258
Tabela 26: Parâmetros para cálculo do Q de Barton para o Talude 3
Tabela 27: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR no setor 1 do Talude 359

Tabela 28: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR no setor 2 do Talude 359
Tabela 29: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR no setor 3 do Talude 360
Tabela 30: Valores das classificações de maciços rochosos para o Talude 360
Tabela 31: Classes de RMR e Q de Barton obtidas para o Talude 361
Tabela 32: Ângulo de atrito e coesão para o Talude 1 em condições de saturação e seca61
Tabela 33: Módulo de deformabilidade para o Talude 1 em condições seca e saturada61
Tabela 34: Ângulo de atrito, coesão e módulo de deformabilidade do Talude 2 quando este se
encontra seco
Tabela 35: Ângulo de atrito, coesão da massa rochosa e módulo de deformabilidade in situ do
Talude 2 quando este se encontra saturado.    62
Tabela 36: Ângulo de atrito, coesão e módulo de deformabilidade para o Talude 3 quando este
se encontra saturado
Tabela 37: Ângulo de atrito, coesão e módulo de deformabilidade para o Talude 3 quando este
se encontra saturado
Tabela 38: Probabilidade de ocorrência de uma ruptura mediante realização de análise
cinemática64
Tabela 39: Princípios de estabilização e métodos de contenção de blocos dos Taludes 1, 2 e 3.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- RQD Rock Quality Designation.
- Jv Índice volumétrico de juntas.
- $\lambda$  Quantidade de descontinuidades por unidade de metro.
- t Tamanho do fragmento da rocha intacta.
- Si Espaçamento entre as juntas em unidade de metro.
- Jn Número de família de juntas.
- Jr-Grau de rugosidade das paredes da descontinuidade.
- $J_w$  Índice do caudal afluente.
- SRF Condições de tensão do maciço rochoso.
- Ja Grau de alteração das paredes das descontinuidades.

RMR – Rock Mass Rating.

- Q Valor obtido com o sistema de classificação Q de Barton.
- $\varphi$  Ângulo de atrito.
- GSI Geological Strength Index.
- $au_p$  Resistência ao cisalhamento.
- JRC Coeficiente de rugosidade das juntas
- JCS Resistência à compressão das juntas.
- $Ø_r$  Ângulo de atrito residual.
- $\sigma_c$  Resistência à compressão uniaxial.
- $\propto$  Ângulo do mergulho do talude.
- FS Fator de segurança do talude.
- $\phi b$  Ângulo de atrito entre duas superfícies que foram cortadas ou serradas.
- r Resistência à compressão superficial presente na descontinuidade alterada.
- R Resistência presente na descontinuidade alterada.
- $\sigma ns$  Tensão normal.
- M<sub>r</sub> Momento relativo às forças atuantes.
- Ma-Momento relativo às forças instabilizadoras.

## SUMÁRIO

1 I	NTRODUÇÃO	15
2 F	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MACIÇOS ROCHOSOS	17
2.2	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	17
2	2.2.1 ORIENTAÇÃO ESPACIAL DAS DESCONTINUIDADES	18
2	2.2.3 RUGOSIDADE	20
2	2.2.4 PREENCHIMENTO	21
2	2.2.5 PERSISTÊNCIA	21
2	2.2.6 ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES	21
2	2.2.7 ABERTURA	22
2	2.2.8 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DA ROCHA INTACTA	22
2	2.2.9 GRAU DE FRATURAMENTO	23
2.3	CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS	24
2	2.3.1 ROCK MASS RATING – RMR	25
2	2.3.2 Q DE BARTON	31
2	2.3.3 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX – GSI	35
2.4	CRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	39
2	2.4.1 CRITÉRIO DE BARTON E BANDIS (1982)	39
2.5	TIPOS DE RUPTURA EM TALUDES ROCHOSOS	40
3 N	METODOLOGIA	48
3.1	MATERIAIS	48
4 F	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	DESCRIÇÃO DOS TALUDES	52
4.2	DADOS OBSERVADOS EM CAMPO	53
4.3	SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DO TALUDE 1	54
4.4	SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DO TALUDE 2	57
4.5	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DO TALUDE 3	59
4.6	ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	61
4.7	ANÁLISE CINEMÁTICA	63
5 (	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	76

6	REFERÊNCIAS	.78
APÉ	ÊNDICE – ANÁLISES CINEMÁTICAS	.82

### 1 INTRODUÇÃO

A caracterização geológica-geotécnica de maciços rochosos contempla os estudos relacionados à descrição geológica do maciço além do levantamento de parâmetros referentes à rocha intacta e às descontinuidades presente no maciço, caracterizando-os. O objetivo de um estudo de caracterização geológica-geotécnica está relacionado com a determinação dos parâmetros de resistência do maciço, seguido do estudo dos mecanismos de ruptura presentes, e, posteriormente, a realização de análises de estabilidade para os mecanismos de ruptura obtidos. Assim a caracterização geológica-geotécnica contribui em projetos de engenharia na garantia de níveis de segurança adequados aos ambientes onde os taludes em maciços rochosos se encontram. Destacando, que a depender do projeto de um talude, os níveis de segurança podem variar.

Nesse contexto, o estudo de estabilidade de taludes abrange diversas áreas, nas quais os projetos de taludes estão inseridos, tais como as minerações (taludes de bancada, inter-rampa, talude global, barragens de rejeitos, taludes de pilha de estéril), obras civis (taludes rodoviários, ferroviários, construção de taludes de usinas hidrelétricas). Assim sendo, a presente pesquisa apresenta um estudo de estabilidade de taludes em maciços rochosos marginais à BR 262, estando eles localizados entre Nova Serrana e Pará de Minas, em Minas Gerais.

Estudos de estabilidade de taludes em maciços rochosos em rodovias têm um caráter de grande importância no Brasil, haja visto que no território brasileiro, o transporte rodoviário é o amplamente utilizado, para usos sociais e econômicos, principalmente em rodovias que interligam grandes centros comerciais. Posto isso, a instabilização de taludes rodoviários pode ocasionar interdição da via, culminando na diminuição do tráfego, além de possíveis danos a estruturas, bens materiais e perdas de vidas.

A rodovia na qual a área de estudo está localizada percorre quatro estados brasileiros, sendo eles Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Mato Grosso. Ela interliga a fronteira da Bolívia até a capital do Espírito Santo. Além disso, esta rodovia também é conhecida como uma das mais perigosas do Brasil.

O objetivo geral deste trabalho foi a caracterização geológica geotécnica de maciços rochosos marginais à BR-262 entre os municípios de Pará de Minas e Nova Serrana. Os taludes

analisados estão localizados nas coordenadas 19°53'34" S e 44° 52' 47" W (Talude 1), 19°53'24" S e 44°48'15" W (Talude 2) e 19° 53' 35" S e 44°39'09" W (Talude 3). Para alcançar o objeto geral, alguns objetivos específicos foram considerados, tais como a realização da revisão bibliográfica, realização do trabalho de campo com levantamento das características do maciço rochoso, determinação das classificações do maciço rochoso, determinação dos parâmetros de resistência, realização da análise cinemática e posterior análise de estabilidade, proposição de sistemas de prevenção e mitigação de impactos para as instabilidades.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 MACIÇOS ROCHOSOS

Segundo Oliveira e Brito (1998), maciço rochoso pode ser definido como a matriz rochosa (sendo um material heterogêneo, embora a premissa sobre homogeneidade é aceita) em conjunto com as descontinuidades que estão presentes nelas. Jacques (2014) inclui ao conceito de "maciço rochoso" o fato de ele também compreender a água e o estado de tensões.

Jacques (2014) afirma que descontinuidades consistem em várias estruturas capazes de cortar e delimitar a matriz rochosa, levando-se em consideração que a maioria das descontinuidades possuem origem geológica. Exemplos disto são fraturas, falhas, juntas de alívio, dentre outros. Entretanto, também existem as que têm origem de processos de formação e evolução de rochas, assim como, por exemplo, os acamamentos, contatos geológicos. Também existem descontinuidades cuja origem é a epigênese de rochas de acordo com o intemperismo e com a erosão diferencial.

Um conceito relacionado à descontinuidade é o de família, apresentado por Jacques (2014). Este conceito diz que existe uma família de descontinuidades quando várias descontinuidades que possuem a mesma origem também apresentam as mesmas atitudes sendo, desta maneira, paralelas, e possuindo também, na maioria das vezes, semelhanças em suas características.

## 2.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os parâmetros geotécnicos observados estão diretamente relacionados às descontinuidades presentes no maciço rochoso. Além disso, estão também diretamente relacionados às características do maciço rochoso.

De acordo com Oliveira e Brito (1998), as estruturas contidas em um maciço rochoso que são interessantes para uma investigação aplicada são as descontinuidades. Jaques (2014) afirma que as descontinuidades influenciam de forma direta na resistência e no comportamento geomecânico dos maciços rochosos, afinal boa parte das rupturas acontece ao longo destes referidos planos de fraqueza. Oliveira e Brito (1998) também afirmam que as propriedades de maior relevância são orientação espacial (mergulho da descontinuidade, direção da

descontinuidade, dentre outros), persistência da estrutura, quantidade volumétrica das descontinuidades, morfologia presente na superfície de cada descontinuidade, características dos preenchimentos e das aberturas, e, por fim, a conectividade entre as aberturas.

Os parâmetros geotécnicos analisados neste trabalho são: orientação espacial; grau de alteração do maciço rochoso; grau de rugosidade da descontinuidade; preenchimento da descontinuidade; persistência da descontinuidade; espaçamento entre descontinuidades; abertura da descontinuidade e grau de resistência do maciço rochoso. Estes parâmetros serão descritos mais adiante, tornando possível perceber a importância de cada um deles como parâmetros geotécnicos que servem como dados eficientes para se realizar análise de estabilidade dos taludes rodoviários que foram estudados.

## 2.2.1 ORIENTAÇÃO ESPACIAL DAS DESCONTINUIDADES

Para Oliveira e Brito (1998), a orientação preferencial depende da relação existente entre a natureza mecânica e os estados de tensões geológicas que atuavam no momento em que as estruturas estavam se formando. Estes autores afirmam que o posicionamento espacial de uma estrutura planar pode ser definido por meio da direção (consiste no ângulo em que o local em que o plano da descontinuidade e o plano horizontal se interceptam faz com o norte) e do ângulo de mergulho da camada (consiste no ângulo que a inclinação do plano da camada faz com o plano horizontal). A reta que representa o mergulho é perpendicular à reta que representa a direção. Estes autores defendem que a orientação espacial característica das descontinuidades influencia a estabilidade de uma encosta rochosa ou pode ocasionar deslocamentos excessivos.

#### 2.2.2 GRAU DE ALTERAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO.

O grau de alteração do maciço rochoso, quando analisado em campo, pode ser um dos fatores que determinam a setorização ou não do maciço rochoso. "A alterabilidade das rochas diz respeito à maior ou menor capacidade dos minerais constituintes de resistirem às transformações de suas propriedades físicas, químicas e estruturais quando expostos a ambientes diferentes daqueles em que foram formados" (JAQUES, 2014).

De acordo com Jaques (2014), a alteração visível nas rochas pode ser referida aos agentes endógenos (com dependência dos fenômenos magmáticos) e exógenos (com predominância dos

agentes do intemperismo). É para a alteração referida aos agentes exógenos que se atribui a redução da resistência mecânica do maciço rochoso, a variação crescente da deformabilidade e variações da porosidade/permeabilidade nos vários níveis do perfil que caracteriza o intemperismo. A Tabela 1 refere-se aos símbolos utilizados em campo para se definir qual era o grau de alteração das rochas observadas.

SIGLA	INTITULAÇÃO	EXPLICAÇÃO		
W1	Sem alteração (rocha sã).	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 alteração na matriz e ao longo das descontinuidades. Foliação visível e selada. Juntas fechadas, paredes ligeiramente alteradas. Resistência original da rocha parcialmente.		
W3	Alteração moderada.	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	Muita alteração.	Alteração acentuada, alguns materiais parcialmente decompostos. Matriz totalmente oxidadas e cores muito alteradas. Fraturas abertas (2 <e <5="" e="" foliação<br="" mm)="" oxidadas.="">realçada pelo intemperismo. Desplacamentos ao longo da foliação.</e>		
W5	Alteração extrema.	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 totalmente transformado em solo.		

Tabela 1: Classificação do maciço rochoso mediante seu grau de alteração.

Fonte: Adaptada de ISRM (1981).

Guidicini e Nieble (1983) concluem que o enfraquecimento presente no maciço rochoso ou terroso se deve à ação do intemperismo. Este enfraquecimento tem como consequência uma redução dos parâmetros de resistência, considerando-se a coesão e o ângulo de atrito interno.

Silveira (2017) afirma que para se analisar qualitativamente o grau de alteração sofrido pelo maciço rochoso, deve-se estar atento às questões mineralógicas. Para isto, é preciso dar importância à cor e ao brilho que os minerais possuem, assim como a textura e a existência de descontinuidades no local analisado.

Além disso, alterações também podem ser perceptíveis nas descontinuidades, além da rocha intacta. Essas alterações são causadas pela ação do intemperismo, pela ação da percolação da água, dentre outros. Quanto mais alterada é a descontinuidade, menor é sua resistência mecânica e, consequentemente, mais susceptível a rupturas o maciço rochoso está.

## 2.2.3 RUGOSIDADE

Rugosidade é a propriedade que indica a irregularidade ou aspereza da parede da descontinuidade. Ela pode ser correlacionada com o JRC (coeficiente de rugosidade das juntas, dado em graus e que varia de 0 até 20), de acordo com a Figura 1. A rugosidade também deve ser analisada em um estudo geológico – geotécnico do local. Ela representa o quanto a parede da descontinuidade possui aspecto liso e uniforme ou o quanto sua superfície se desvia em relação a esse aspecto. O ângulo da rugosidade é chamado de dilatância.

	JRC = 0 - 2
	JRC = 2 - 4
	<i>JRC</i> = 4 - 6
	JRC = 6 - 8
	JRC = 8 - 10
	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20
0 5 cm 10	

Figura 1: Relação entre o grau de rugosidade e o JRC. Fonte: Adaptado Barton & Choubey (1977).

#### 2.2.4 PREENCHIMENTO

Preenchimento é o termo utilizado para quando é possível notar algum tipo de material ocupando as aberturas entre as paredes de uma mesma descontinuidade. O preenchimento pode ser da mesma origem da rocha ou pode ser de fluxo de material diferente. Para Guidicini e Nieble (1983), descontinuidades existentes no interior de um maciço rochoso, originadas de processo de alteração diferencial, ou falhamento com posterior alteração da caixa de falha, são elementos estruturais que possuem enorme controle sobre as condições de estabilidade de maciços e encostas. Quando a rocha é apoiada sobre o material de preenchimento, sem haver contato rocha-rocha, a resistência ao cisalhamento da descontinuidade passa a ser controlada pelo material de preenchimento, tanto em termos de ângulo de atrito como em termos de coesão. Oliveira e Brito (1998) afirmam que os preenchimentos que podem estar nas aberturas são importantes porque eles conseguem afetar a resistência ao cisalhamento das descontinuidades, assim como sua condutividade hidráulica.

## 2.2.5 PERSISTÊNCIA

A Persistência de uma descontinuidade, seria o comprimento que esta possui. Deve-se, neste caso, estar atento para problemas de escala, afinal, isto influencia na análise de estabilidade do maciço rochoso. Oliveira e Brito (1998) acreditam que a característica de persistência de uma fratura é influenciada pela ordem de aparecimento que apresenta em processos eventuais de fraturamento.

Oliveira e Brito (1998) afirmam que a persistência de uma descontinuidade corresponde a um parâmetro relacionado ao tamanho e à geometria estrutural do ambiente analisado. Logo, este parâmetro é bastante influenciado pela orientação espacial e pela dimensão superficial da rocha onde a persistência está exposta. Existe a possibilidade da forma, assim como a dimensão de uma descontinuidade, serem controladas por determinadas características da geometria do maciço rochoso analisado.

#### 2.2.6 ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES

O espaçamento entre as descontinuidades se refere à distância perpendicular, geralmente em centímetros ou metros, entre duas descontinuidades da mesma família. O espaçamento entre

descontinuidades é considerado importante porque quanto maior o espaçamento existente, maior o tamanho dos blocos e indica ter menos descontinuidades se comparado a um ambiente com valor de espaçamento menor entre descontinuidades.

O espaçamento, segundo Oliveira e Brito (1998), consiste em um parâmetro bastante significativo quando se trata de analisar o comportamento geomecânico do maciço rochoso, afinal, este parâmetro tem a finalidade de exprimir a quantidade relativa encontrada de descontinuidades. Assim sendo, espaçamento consiste no número de descontinuidades tomando-se como base uma unidade de medida, podendo ser em comprimento linear, mas também área e até volume. Espaçamento pequeno entre as descontinuidades presentes no maciço rochoso representa, de certa forma, menor qualidade deste, afinal o maciço rochoso se encontra mais fraturado e sua resistência ao cisalhamento se encontra mais reduzida. Menor espaçamento das descontinuidades no maciço rochoso também indica que este terá um aumento de permeabilidade (afinal, o espaço em que a água pode percolar, que seria a abertura das descontinuidades, aumenta)).

O espaçamento pode ser obtido medindo-se a distância perpendicular entre duas descontinuidades de uma mesma família ou pela técnica de scanline. Nesta técnica, introduzse uma linha contida na superfície do maciço, em que os valores de espaçamento obtidos na superfície desse maciço irão interceptar a scanline durante o seu comprimento.

## 2.2.7 ABERTURA

Abertura consiste na distância, geralmente em milímetros ou centímetros entre as paredes de uma descontinuidade. Quanto maior a abertura, maior será a captação de água em tempos de chuva. Oliveira e Brito (1998) afirmam que analisar a aberturadas descontinuidades é primordial para o estudo da percolação de fluidos (como a água) dentro dos maciços rochosos.

## 2.2.8 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DA ROCHA INTACTA

A resistência a compressão da rocha intacta é um parâmetro geotécnico de extrema importância para analisar a estabilidade dos taludes. Afinal, quanto maior a resistência do maciço rochoso, mais eficientemente ele suporta as tensões que a ele são aplicadas. Desta forma, o talude se comporta de maneira mais estável. Para Guidicini e Nieble (1983), pode-se definir a resistência

mecânica do maciço no campo por meio de ensaio de compressão puntiforme, utilizando-se ferramentas portáteis, capazes de fragmentar o maciço rochoso em estudo. De acordo com Santos (2015), a resistência do maciço rochoso pode ser obtida utilizando-se martelo de geólogo, ensaios de resistência (como o de compressão puntiforme, triaxial, por exemplo), e o esclerômetro de Schmidt. A Tabela 2 apresenta os aspectos observados durante o teste de martelo para estimativa da resistência do maciço rochoso.

Grau	Resistência (Mpa)	Descrição	Aspectos observados
R0	0,25 - 1,00	Extremamente branda	Marcada pela unha
R1	1,00 - 5,00	Muito branda	Esmigalha-se com um golpe de martelo.
			Raspada com canivete.
R2	5,00 - 25,0	Branda	Marcada com a ponta do martelo em golpe
			firme.
			Raspada com dificuldade com o canivete.
R3	25,0-50,0	Resistência média	Amostras fraturadas com único golpe de
			martelo.
			Não risca com canivete.
R4	50,0 - 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 golpes de
			martelo.

Tabela 2: Grau de resistência do maciço rochosos.

Fonte: Adaptado do ISRM (1981).

## 2.2.9 GRAU DE FRATURAMENTO

O grau de fraturamento está relacionado à persistência da descontinuidade observada em campo, assim como associa-se ao espaçamento da mesma. Sendo assim, grau de faturamento é inversamente proporcional ao espaçamento e diretamente proporcional à persistência. Guidicini e Nieble (1983) afirma que normalmente é possível definir o grau de fraturamento fazendo o levantamento de quantas fraturas existem em uma certa direção, sendo que o valor pode ser expresso como número de fraturas encontradas por metro estudado (mas o trecho em estudo pode ter qualquer valor, não necessariamente um metro). Porém, deve-se ter o cuidado de, posteriormente, extrapolar o valor obtido para um metro. Para Oliveira e Brito (1998), o grau de fraturamento do maciço rochoso é obtido através do espaçamento, equivalendo ao inverso da medida deste (incluindo todas as famílias presentes).

#### 2.3 CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS

A classificação de maciços rochosos teve início com os estudos para melhor escolher os tipos de suportes a serem utilizados para garantir estabilidade nas escavações de estruturas subterrâneas. Terzaghi (1946) influenciou bastante as classificações de maciços rochosos na área da mineração ao estudar meios de aberturas de túneis.

De acordo com Azevedo e Marques (2002), houve muitos tipos de classificações de maciços rochosos desenvolvidos, principalmente na década de 70, visando guiar o julgamento da condição de estabilidade em que se encontra o maciço rochoso. Entretanto, quatro sistemas são mais bem aplicados na literatura atual, sendo eles o RMR de Bieniawsky (1973, revisado em 1984), sistema Q de Barton, Lien and Lunde (1974), o Geological Strenght Index (proposto por Hoek *et. al.* em 1995) e o RMi de Palmström (1996).

Para Bieniawski (1989), os objetivos da classificação de maciços rochosos são vários. Dentre eles é possível citar: identificar quais são os parâmetros que mais influenciam o comportamento relativo a um maciço; distinguir e classificar formações encontradas no maciço rochoso por conjuntos ou famílias cujo comportamento é semelhante; ter uma boa interpretação do que representa cada classe em que o maciço se encontra; dentre outros.

Assim sendo, ao longo da história, vários sistemas de classificação de maciços rochosos foram criados ou modificados. A Tabela 3 indica qual é o sistema de classificação criado ou modificado, quem fez a alteração ou criação, em qual ano isto foi realizado e com qual finalidade.

Nome da classificação	Autor e data	País de origem	Aplicações
1. Rock load	Terzaghi (1946)	USA	Túneis
2. Stand-up time	Lauffer (1958)	Austrália	Túneis
3. NATM	Pacher et al. (1964)	Áustria	Túneis
4. Rock quality designation	Deere <i>et al.</i> (1967)	USA	Furos de sondagem, Túneis
5. RSR concept	Wickham <i>et al.</i> (1972)	USA	Túneis
6. RMR system	Bieniawski (1973)	África do Sul	Geral
7. Q-system	Barton et al. (1974)	Noruega	Geral
8. Strength-size	Franklin (1976)	Canadá	Túneis
9. Basic geotechnical description	ISRM (1981)	Internacional	Geral
10.Unified classification	Williamson (1984)	USA	Geral
11. M – RMR	Ünal e Özkan (1990)	Turquia	Mineração
12. RMS	Stille et al. (1982)	Suécia	Mineração de metais
13. WCS	Singh (1986)	Índia	Mineração de carvão
14. RMi	Palmström (1996)	Suécia	Túneis
15. GSI	Hoek e Brown (1997)	Canadá	Escavações subterrâneas
16. BQ (Basic Quality Rock Mass)	Diversos autores	China	Geral

Tabela 3: Principais sistemas de classificações de maciço rochosos.

Fonte: (Modificado de Bieniawski, 1989).

#### 2.3.1 ROCK MASS RATING – RMR

Azevedo e Marques (2002) informa que a classificação conhecida como RMR (*Rock Mass Rating*) foi desenvolvida por Bieniawsky no ano de 1973. Este possuía bastante conhecimento com projetos anteriores envolvendo escavações subterrâneas no país da África do Sul. O valor do RMR é dado pela somatória dos valores obtidos em cada um dos parâmetros atribuídos, sendo eles condições das descontinuidades, espaçamento das descontinuidades, o RQD (*Rock Quality Designation*), condições de saturação do maciço rochoso, resistência à compressão uniaxial e orientação relativa entre a descontinuidade e a escavação. Quanto maior for a qualidade do maciço rochoso, maior é o valor atribuído ao seu RMR.

De acordo com Azevedo e Marques (2002), Bieniawsky definiu o RMR de maneira que esta classificação pudesse isolar o maciço em agrupamentos cujo comportamento seja semelhante; proporcionar uma base confiável para o entendimento dos aspectos principais do maciço rochoso; tornar mais fácil o planejamento, assim como os projetos de estruturas em rochas, através de informações quantitativas e proporcionar uma maneira mais eficiente par a comunicação entre os responsáveis pelo trabalho geomecânico realizado.

Segundo Singh e Goel (1999), para se utilizar o sistema RMR responsável pela classificação geomecânica do maciço rochoso, a localidade analisada deve ser delimitada em definidas unidades estruturais no conceito geológico, de forma que cada classe de maciço rochoso possa ser representado por meio de uma única unidade estrutural geológica.

Para se determinar o valor do RMR, um dos fatores a ser obtido é a resistência à compressão da rocha intacta. De acordo com Azevedo e Marques (2002), o valor máximo que pode ser atribuído para a resistência à compressão da rocha intacta é 15 e o mínimo é 0.

Um dos parâmetros analisados pelo RMR é o RQD. Logo, dependendo do valor deste, um peso é atribuido para se realizar a classificação do maciço.O RQD, de acordo com Azevedo e Marques (2002), é bastante utilizado como parâmetro único para se classificar maciços rochosos, mas é aconselhável utilizá-lo em conjunto com outros parâmetros. A Tabela 4 também demonstra outra maneira de se classificar a qualidade do maciço rochoso.

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

Tabela 4: Relação entre o RQD e a qualidade da rocha.

Fonte: Deere et al. (1967).

Marques e Azevedo (2002) informa que o RQD é obtido após ser realizada sondagem, afinal, serão analisados os comprimentos dos testemunhos de sondagem recuperados. A Equação para se determinar o valor do RQD em porcentagem é representada pela Equação 1:

$$RQD (\%) = 100 \times \frac{comprimento \ dos \ pedaços>10 \ centímetros}{comprimento \ da \ manobra} (1)$$

Em relação ao espaçamento de juntas e fraturas, por sua vez, segundo Azevedo e Marques (2002), o máximo valor atribuído a este parâmetro é 30. Além disso, é avaliado a partir de um testemunho de sondagem quando este se encontra disponível. Entretanto, nem sempre este testemunho está disponível, devendo-se então considerar as Equações 2 e 3, criadas por Hudson & Harrison (1997) e Palmström (1982), a fim de se determinar o valor de RQD. Nestas equações deve-se considerar que o símbolo  $\lambda$  refere-se à quantidade de descontinuidades por unidade de

metro, assim como t corresponde ao tamanho do fragmento de rocha intacta analisada, e, por fim, Jv é definido como medidor volumétrico das juntas.

$$RQD = 100(\lambda t + 1)e^{-\lambda t} \qquad (2)$$

$$RQD = 115 - 3,3$$
Jv (3)

As juntas, além de estarem presentes nos testemunhos de sondagens recuperados, também estão presentes nos afloramentos mapeados. Logo, quando não há testemunho de sondagem disponível, o espaçamento de juntas e fraturas pode ser determinado em campo.

O Jv corresponde a um parâmetro que reflete a quantidade juntas por determinada unidade volumétrica referente ao maciço rochoso analisado, demonstrado por meio da Equação 4, em que S<sub>i</sub> é entendido como sendo o espaçamento entre as juntas em unidade de metros para a mencionada família analisada de juntas.

$$Jv = \sum 1/s_i$$
 (4)

Os autores Azevedo e Marques (2002) aconselham a realizar uma média aritmética quando for encontrada, em campo, família de fraturas cujos espaçamentos apresentam valores variados. Caso o maciço rochoso apresentar mais de uma família de descontinuidades, deve ser considerada para fins de cálculos aquela que for mais crítica, isto é, cujo valor de espaçamento for menor.

Em relação às características das juntas ou descontinuidades, "este parâmetro pode atingir um valor máximo de 25 pontos. Levam-se em conta a abertura (ou largura), a persistência, a rugosidade, a condição das paredes, a presença e o tipo de material de preenchimento das descontinuidades". (Azevedo e Marques, 2002).

O último fator analisado neste trabalho para se determinar o RMR é a condição de percolação da água. Segundo Azevedo e Marques (2002), o parâmetro da percolação da água pode atingir 10 pontos no máximo, podendo ter muita relevância na estabilidade do maciço rochoso. É considerada a velocidade atribuída ao fluxo da água ou, também, a razão existente entre a

pressão verificada no fluxo de água e a maior tensão principal. Além disso, também pode-se considerar as condições do fluxo de maneira qualitativa.

Entretanto, também existe um sexto fator no RMR que não foi utilizado na somatória deste trabalho. Este fator é um parâmetro de ajuste ou correção. Ele considera a orientação das descontinuidades em relação à orientação da encosta ou obra civil. Desta forma, apesar do RMR considerar os 6 parâmetros, neste trabalho foi considerado apenas os 4 primeiros. A Tabela 5 indica quatro parâmetros com seus respectivos pesos na classificação RMR, mostrando o procedimento para se realizar a somatória dos pesos. A Tabela 6 indica outros dois parâmetros com seus respectivos pesos para a classificação RMR. Esta divisão de tabelas foi realizada apenas para melhor formatação dos dados neste documento, salientando que na literatura estes parâmetros são apresentados por tabelas de forma diferente. A Tabela 7 representa as classes em que o valor do RMR obtido melhor se enquadra.

	Parâmetros			Coeficient	tes			
a intacta	Point load	>10Mpa	4-10Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Ver compressão		
Resistência da roch	Compressão Uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 Mpa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0
	R.Q.D	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos	20	17	13	8	3		
. Esj	paçamento médio	>2mm	2-0,6m	0,6-0,2m	0,2-0,06m	<0,06m		n
	Pesos	20	15	10	8	5		
	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas.	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1- 5mm.	Enchimento mole con espessura > 5mm ou juntas contínuas com separação >5mm.		
Pesos		30	25	20	10		0	

Tabela 5: Quatro parâmetros com seus respectivos pesos para se obter os valores de RMR.

Fonte: Bieniawsky (1989).

		Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0 <10		10 -25	25-125	>125	
Água su	ıbterrânea	Pressão da água na fratura/ tensão principal	0	<0,1		0,1-0,2	0,2 - 0,5	>0,5
		Condições gerais	Seco	Umidecido		Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante
Pesos			15	10		7	4	0
		Aju	ste para ori	ientação da	as d	escontinuidade	s	
Direção e mergulho das descontinuidades		D Muito favorável		Favorável		ceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
	Túneis 0 -2 -5		-10	-12				
Peso	Fundações	0		-2	-7		-15	-25
	Taludes	0		-5		-25	-50	-60

Tabela 6: Dois últimos parâmetros com seus respectivos pesos para classificação RMR.

Tabela 7: Classificação do maciço rochoso em classes do RMR.

Classificação do maciço rochoso de acordo com o RMR									
Valor	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21				
Classe	Ι	II	III	IV	V				
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre				

Fonte: Bieniawski (1989)

Uma das aplicações do RMR é para se determinar as propriedades mecânicas pertencentes aos maciços rochosos. Isto ajuda em casos de precisar estabilizar um talude de mina ou rodoviário e também auxilia a encontrar os valores de coesão e módulo de deformabilidade. A Tabela 8 demonstra a forma correta de se obter a coesão e o ângulo de atrito do maciço rochoso por meio do RMR. A Equação 5 indica como o módulo de deformabilidade foi obtido. Nesta equação E representa o módulo de deformabilidade e RMR representa o valor obtido na classificação *Rock Mass Rating* (1976). Esta equação foi idealizada por Bieniawksi (1978).

 $E (GPa) = 2 \times RMR - 100 \quad (5)$ 

russiu of riengus entre coesus us muergo roenoso, ungulo de unito e clusse de rivira									
Classe nº	Ι	II	III	IV	V				
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				

Tabela 8: Relação entre coesão do maciço rochoso, ângulo de atrito e classe de RMR

Fonte: Bieniawsky (1989).

Fonte: Bieniawsky (1989).

Guidicini e Nieble (1983) afirmam que as propriedades mais relevantes a serem analisadas são o ângulo de atrito e a coesão pertencente às rochas. Estes autores defendem que os menores valores obtidos para coesão estarão nas descontinuidades preexistentes da rocha, sendo, desta maneira, o parâmetro de principal interesse na análise de instabilidade.

O grau de coerência, segundo Guidicini e Nieble (1983) é baseado em algumas características da rocha, como, por exemplo, a tenacidade, a dureza e a friabilidade. Desta forma, a coerência da rocha pode ser dividida em quatro categorias qualitativas (muito coerente, coerente, pouco coerente e friável), dependendo do comportamento do maciço rochosos às variadas solicitações.

#### 2.3.2 Q DE BARTON

De acordo com Singh e Goel (1999), no ano de 1974, Barton, Lien e Lunde, no Instituto Norueguês de Geotecnia (NGI), propôs o sistema Q de classificação do maciço rochoso baseado em cerca de 200 estudos de casos de túneis e cavernas. Eles definiram a Equação 6 como sendo a que determina o valor da classificação em questão.

$$Q = \left[\frac{RQD}{Jn}\right] \left[\frac{Jr}{Ja}\right] \left[\frac{Jw}{SRF}\right]$$
(6)

Sendo que, para Singh e Goel (1999), RQD significa designação da qualidade da rocha; Jn significa número de família de juntas; Jr significa grau de rugosidade das paredes da descontinuidade e Ja significa grau de alteração das paredes da descontinuidade. Azevedo e Marques (2002) afirmam que Jw significa fator de redução da água e SRF indica o índice das condições de tensões do maciço. As Tabelas de 9 a 13 indicam os valores de cada um desses parâmetros significativos para o sistema Q de Barton.

### Tabela 9: valores de Jn para o sistema de classificação Q.

Condições de compartimentação do maciço	Valores de Jn
Fraturas esparsas ou ausentes	0,5-1,0
Uma família de fraturas	2
Uma família, mais fraturas esparsas	3
Duas famílias de fraturas	4
Duas famílias, mais fraturas esparsas	6
Três famílias de fraturas	9
Três famílias, mais fraturas esparsas	12
Quatro ou mais famílias de fraturas	15
Rocha triturada (completamente fragmentada)	20
Fonte: Barton et. al. 1974.	

Tabela 10: Valores de Jr para o sistema de classificação Q.

a-Fraturas sem deslocamento relativo. Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas						
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas						
Condições de rugosidade das paredes	Valores de 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					
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: Barton et. al. 1974.

Tabela 11: Valores de Ja para o sistema de classificação Q.

a-Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre paredes das fraturas					
Condição de alteração das paredes	Valores de J <sub>a</sub>				
A- Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto)	0,75				
B- Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\varphi r=25-30^{\circ}$	1				
C- Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não argilosas $\phi{=}20{\text{-}}25^\circ$					
D- Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas $\varphi$ =20-25°	3				
E- Paredes com películas de materias moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc) e pequena quantidade de minerais expansivos $\varphi$ =8-16°	4				
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Há contato rocha-rocha entre a fraturas					
F- Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila $\varphi$ =25-35°	4				
G- Fraturas com preenchimento argiloso sobre consolidado (espessura < 5 mm) $\phi$ =16-24°	6				
H- Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5 mm $\phi$ =12-16°	8				
I- Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5 mm) $\phi$ =12-16°	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 (ver G, H, I para condições do material argiloso) $\phi{=}6{-}24^\circ$	6 a 8 ou 8 a 12				
M- Zonas siltosas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila	5				
N, O, P- Zonas ou bandas contínuas de argila (ver g, h, i para condições de material argiloso) $\phi r{=}6{-}24^\circ$	10 a 13 ou 13 a 20				

Fonte: Barton et. al. 1974.

Tabela 12: Valores de Jw para o sistema de classificação Q.

Condição de água	Jw	Pressão de água (Kg/cm <sup>2</sup> )
A-Escavação a seco ou com pequena afluência de água (<51/m)	1,0	<1
B-Afluência média da água com lavagem ocasional do	0,66	1,0-2,5
preenchimento das fraturas		
C-Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento	0,5	2,5-10
das descontinuidades		
D-Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento	0,33	2,5-10
das fraturas		
E-Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão),	0,2-0,1	>10
decaindo com o tempo		
F-Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem	0,1-0,05	>10
decaimento com o tempo		

Fonte: Barton et. al. 1974.

Tab	ela	13:	Valores	de SRF	para	0	sistema	de	classificaç	ção	Q.	•
		_										

a- Zonas alteradas						
Condições das tensões dos maciços	SRF					
A- Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer)	10					
B- Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação <= 50m)	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 (profundidade qualquer)	7,5					
E- Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação <= 50m)	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. Tongãos hoixos, próximos à superfície ( $\sigma/\sigma < 200$ )	2,5					
$11$ - relisões barxas, proximas a superficie ( $0_{c'}0_1 > 200$ )	)-					
I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_l = 200$ a 10)	1					
I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ )	<u> </u>					
I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J-Tensões altas ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ )	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5-2,0 \\       5-10     \end{array} $					
I-Tensões baixas, proximas a superficie ( $\sigma_c/\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$ )	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20     \end{array} $					
I-Tensões baixas, proximas a superficie ( $\sigma_c/\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$ ) c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deform	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       nações)     \end{array} $					
I-Tensões baixas, proximas a superficie ( $\sigma_0/\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_0/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_0/\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_0/\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_0/\sigma_1 < 2,5$ ) c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deform M- Tensões moderadas	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       nações) \\       5 - 10   \end{array} $					
II- Tensões baixas, proximas a superincie ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_{c'}\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 2,5$ ) c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deform M- Tensões moderadas N- Tensões elevadas	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       1ações) \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\     \end{array} $					
II- Tensões baixas, proximas a superincie ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_{c'}\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_{c'}\sigma_1 < 2,5$ ) c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deform M- Tensões moderadas N- Tensões elevadas d- Rochas expansivas (atividade expansiva na presença de água)	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       ações) \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       \hline     \end{array} $					
II- Tensões baixas, proximas a superincie ( $\sigma_c/\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$ ) c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deform M- Tensões moderadas N- Tensões elevadas d- Rochas expansivas (atividade expansiva na presença de água) O- Pressão de expansão moderada	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       mações) \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       5 - 10 \\       5 $					
II- Tensões baixas, proximas a superficie ( $\sigma_c/\sigma_1 < 200$ ) I-Tensões médias ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200 \text{ a } 10$ ) J- Tensões altas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 10 \text{ a } 5$ ) K- Explosões moderadas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 5 \text{ a } 2,5$ ) L- Explosões intensas de rochas ( $\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$ ) c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deform M- Tensões moderadas N- Tensões elevadas d- Rochas expansivas (atividade expansiva na presença de água) O- Pressão de expansão moderada P- Pressão de expansão elevada	$     \begin{array}{r}       1 \\       0,5 - 2,0 \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       mações) \\       5 - 10 \\       10 - 20 \\       5 - 10 \\       10 - 15 \\     \end{array} $					

Fonte: Barton et. al. 1974.

Singh e Goel (1999) também afirmam que Jn é a sigla que representa o número do conjunto de juntas ou falhas existentes no maciço rochoso analisado. O parâmetro Jn é geralmente correlacionado ao número de foliação, xistosidade, clivagem ou acamamentos, dentre outros, existentes no maciço rochoso.

Singh e Goel (1999) dizem que se bastantes desenvolvidas, as descontinuidades paralelas entre si devem ser consideradas como um conjunto completo de descontinuidades. Caso tenha poucas descontinuidades visíveis ou somente rupturas ocasionais, então deve-se considerá-las como "um conjunto de junções aleatórias".

Singh e Goel (1999) dizem que o Jr e o Ja indicam, respectivamente, o grau de rugosidade da descontinuidade e o grau de alteração das paredes da mesma. Os parâmetros Jr e Ja são obtidos para o conjunto crítico mais fraco ou para a descontinuidade preenchida com argila em uma determinada região. Caso o conjunto de descontinuidades ou a descontinuidade com o valor mínimo de (Jr / Ja) for orientado favoravelmente para estabilidade, então um segundo conjunto

de descontinuidades ou descontinuidade orientado de forma não favorável à estabilidade pode ser de maior importância, e seu valor de (Jr / Ja) deve ser utilizado ao avaliar Q.

Para Azevedo e Marques (2002), RQD divido por Jn representa o tamanho dos blocos; Jr divido por Ja representa a resistência ao cisalhamento e, por fim, Jw / SRF representa o estado de tensões. Singh e Goel (1999) dizem que Bieniawski, em 1976, propôs uma relação, descrita na Equação 7, entre o sistema RMR e o sistema Q.

$$RMR = 9\ln Q + 44 \quad (7)$$

Assim como o sistema de classificação RMR, o sistema de classificação Q de Barton também pode ser definido por meio de classes. A Tabela 14 indica como esta definição ocorre.

içuo de clusses pula		
Classe	Padrão geomecânico do maciço	Valores de Q
IX	Péssimo	0,0001 a 0,01
VIII	Extremamente ruim	0,01 a 0,1
VII	Muito ruim	0,1 a 1,0
VI	Ruim	1,0 a 4,0
V	Regular	4,0 a 10,0
IV	Bom	10,0 a 40,0
III	Muito Bom	40,0 a 100,0
II	Ótimo	100,0 a 400,0
Ι	Excelente	>400,0
	Fonte:Barton et. al., 1974	

Tabela 14: Definição de classes para o sistema Q.

O sistema Q de Barton pode ser aplicado de diversas formas, dentre elas como meio de estimar o módulo de deformabilidade pertencente ao maciço rochoso, assim como meio de se obter o ângulo de atrito pertencente à descontinuidade. Assim como ensina Palmström (2001), que o ângulo de atrito da descontinuidade ( $\phi$ ) é uma relação entre Jr, Ja e pode ser definido segundo a Equação 8.

$$\tan \varphi = \frac{Jr}{Ja} \qquad (8)$$

## 2.3.3 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX – GSI

O GSI é um sistema de classificação de maciços rochosos considerado subjetivo e pode assumir valores entre 5 e 100. *"Em 1995, Hoek introduziu o Índice de Resistência Geológica que é um* 

sistema para estimar a resistência de um maciço rochoso, sujeito a diferentes condições geológicas." (Maia, 2011).

De maneira empírica, de acordo com Maia (2011), o valor de 25 atribuído ao GSI representa a transição existente para os critérios classificados como original e modificado. Quando o maciço tem boa qualidade, o valor é superior a 25, além de poder ser estimado de maneira mais direta por meio do RMR de Bieniawski (1976). Apesar disso, para os maciços rochosos com baixa qualidade, é complicado realizar a determinação do valor e, por consequência, da classe do RMR. Assim, relacionar o RMR com o GSI, nesses casos, não se torna mais tão confiável. As Equações 9 e 10 indicam como o GSI pode ser correlacionado com o RMR e com o Q de Barton.

$$GSI = RMR - 5 (para RMR \ge 23)$$
(9)

$$GSI = lnQ + 44 (para RMR < 23)$$
(10)

Maia (2011) também afirma que o GSI não é um parâmetro exato ou mesmo preciso. Assim sendo, pode-se calcular as características que o maciço rochoso possui pelas equações 11 a 15. Se, por acaso, o valor de GSI for superior a 25, deve ser utilizado o critério (original) de Hoek-Brown, expresso nas equações 11 e 12. Por outro lado, caso o GSI assuma valores menores que 25, indicando uma fraca qualidade do maciço rochoso, o critério modificado é o utilizado, sendo expresso nas Equações 13 e 14.

$$mb = mi * e \frac{(GSI - 100)}{28}$$
 (11)

$$s = e \frac{(GSI - 100)}{9}$$
 (12)

$$a = 0,5$$
 (13)

s = 0 (14)
$$a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (15)$$

O GSI é um método de classificar a rocha de maneira mais prática e ao mesmo tempo pouco precisa porque é subjetiva, ou seja, depende da opinião a respeito do maciço da pessoa que estiver analisando. A Figura 2 indica a maneira como é determinado o GSI. Pode-se perceber que seus parâmetros são a qualidade superficial do maciço, assim como o grau de fraturamento.



Figura 2: Metodologia de classificação do maciço rochoso através do GSI. Modificado de Hoek & Brown (1997).

# 2.4 CRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Azevedo e Marques (2002) afirmam que critérios de ruptura podem ser considerados como relações que regem as tensões ligadas ao modo de ruptura de certo material. Muitas vezes, quando o material se trata de rocha, associa-se o estado de ruptura às tensões encontradas no pico da curva de tensão – deformação.

Muitos critérios para se determinar os parâmetros de resistência de um material são utilizados, sendo que o mais conhecido é o de Mohr-Coulomb. Neste critério, existe uma envoltória de ruptura linear em relação a todos os círculos de Mohr que indicam combinações críticas ligadas às tensões principais. Existem, entretanto, outros critérios para determinação de parâmetros de resistência do material, como o de Jaeger e Cook (1976) e Hoek e Brown (1980), sendo que estes são mais empíricos e precisos. Também existe o critério de Griffith (1921), sendo que este é mais teórico e indica o que ocorre com o material em termos microscópicos, mas, como desvantagem, não leva muito em conta a sua resistência. O critério que melhor se ajustou aos objetivos deste trabalho foi o de Barton e Bandis (1982), portanto, este será descrito com maior detalhes.

# 2.4.1 CRITÉRIO DE BARTON E BANDIS (1982)

Segundo Azevedo e Marques (2002), o critério de Barton e Bandis (1982) refere-se a uma equação obtida empiricamente visando obter a resistência ao cisalhamento de picos das descontinuidades (juntas). Logo, a equação empírica está descrita pela Equação 16.

$$|\tau_p| = \sigma \tan\left(JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma}\right) + \phi_r\right)$$
 (16)

De acordo com Azevedo e Marques (2002), JRC representa o coeficiente de rugosidade das juntas (dado em graus e variando de 0 até 20); JCS corresponde à resistência à compressão das juntas;  $\phi_r$  corresponde ao ângulo de atrito residual; e  $\sigma_c$  corresponde à resistência à compressão uniaxial.

Existem diversos tipos de rupturas, sendo elas planar, em cunha ou tombamento de blocos. Giusepone (2011) indica que o fator de segurança obtido utilizando o Critério de Barton e Bandis em se tratando de análise de ruptura planar corresponde à Equação 17. Nesta equação, a letra W indica o peso da rocha em tf/m;  $\propto$  representa o ângulo do talude em graus; Ør indica ângulo de atrito residual; JRC consiste no coeficiente ou índice de rugosidade encontrada nas descontinuidades; JCS corresponde ao coeficiente ou índice da resistência da rocha à compressão superficial dado em MPa;  $\sigma_n$  indica resistência à compressão uniaxial expressada em MPa;

$$F.S. = \frac{W \times cos \propto \left[ tan \left( JRC \times \log_{10} \frac{JCS}{\sigma n} \right) + \phi r \right]}{W \times sen \propto}$$
(17)

Ainda considerando os ensinamentos transmitidos pelo trabalho realizado por Giusepone (2011), é possível reconhecer que o ângulo de atrito residual pode ser interpretado como o atrito gerado depois de ocorrer a ruptura por cisalhamento. A Equação 18 indica de que maneira o ângulo de atrito residual pode ser obtido em laboratório, em que Øb corresponde ao ângulo de atrito existente entre duas superfícies que foram serradas ou cortadas, a letra r representa a resistência à compressão superfícial presente na descontinuidade alterada enquanto que R representa a resistência presente na superfície serrada.

$$\phi r = (\phi b - 20) + 20 \times \left(\frac{r}{R}\right) \tag{18}$$

O JRC pode ser obtido pela Equação 19, segundo Giusepone (2011). Nesta equação,  $\propto \acute{e}$  o ângulo do talude,  $\sigma ns$  corresponde à tensão normal.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi r}{\log_{10} \frac{JCS}{\sigma ns}} \qquad (19)$$

#### 2.5 TIPOS DE RUPTURA EM TALUDES ROCHOSOS

Em taludes rochosos podem ocorrer diversos tipos de ruptura, dependendo dos fatores observado em campo presentes no maciço. Rupturas ocorrem devido à instabilidade do maciço, podendo ocasionar danos materiais imensos em se tratando de ruptura de maciços rochosos de taludes rodoviários, assim como causar perdas de vidas também. Logo, é importante ser analisada a estabilidade do maciço rochoso.

"O conceito de estabilidade de um talude é indeterminado, já que taludes feitos sobre ou de rochas ou solos não fornecem garantia de estabilidade por muitos anos". (Azevedo e Marques, 2002). Assim sendo, não se deve analisar a estabilidade do talude apenas uma vez e considerála sempre independentemente do tempo decorrido da análise, mas deve-se realizar um monitoramento contínuo. Estes autores também afirmam que tanto a gravidade, como o intemperismo e a erosão atuantes no maciço rochoso podem influenciar seu estado de estabilidade.

#### 2.5.1 Determinação dos mecanismos de ruptura – Análise Cinemática

Os tipos de rupturas existentes -embora nem todos são abordados neste trabalho- devido ao grau de instabilidade do talude rochoso e das condições geológicas e geotécnicas são: ruptura planar, em cunha, circular, tombamento de blocos e tombamento flexural. Nesta revisão bibliográfica serão explicados os tipos de rupturas que foram observados em campo.

A ruptura planar é aquela em que a ruptura ocorre em apenas um plano da superfície. De acordo com Guidicini e Nieble (1983), a ruptura planar raramente ocorre em um talude rochoso, afinal, é dificilmente encontrada uma superfície plana de ruptura nestes casos. Para eles, os requisitos precisos para que ocorra escorregamento em apenas um plano são, primeiramente, o plano apresentar direção considerada paralela ou subparalela em relação à face do talude; a direção de mergulho apresentada pelo plano de ruptura precisa ser menor que a direção de mergulho apresentada pela face do talude; a direção de mergulho do plano onde ocorre ruptura precisa ser superior em relação ao ângulo de atrito obtido no plano e, por fim, as superfícies de alívio precisam conter de maneira desprezível as resistências laterais em relação ao escorregamento, mas, também, há a possibilidade de não existirem.

Goodman (1989) estabeleceu um critério que afirmava que uma ruptura planar acontecia em situações em que havia determinado plano de fratura cuja orientação espacial era considerada semelhante à da face do talude analisado, ou seja, quando mergulha no mesmo sentido da face do talude, entretanto apresenta inclinação inferior. A Figura 3 indica três tipos de rupturas de taludes, sendo elas planar (à esquerda), em cunha (a do meio) e tombamento de blocos (à direita).



Figura 3: Tipos de ruptura encontrados neste trabalho. Fonte: Adaptado de Goodman (1989).

A ruptura em cunha ocorre, de acordo com Guidicini e Nieble (1983), quando pelo menos duas famílias de descontinuidades se interceptam, formando cunhas. Goodman (1989) não apenas concorda com Guidicini e Nieble, como também complementa afirmando que a ruptura em cunha ocorre quando a linha da interseção formada pelos dois planos está mergulhando no sentido semelhante ao da face do talude contendo um ângulo inferior que a mesma. Logo, para que a ruptura em cunha aconteça, o ângulo de mergulho da face do talude deve ser maior do que o da interseção das descontinuidades, assim como este deve ser maior que o ângulo de atrito.

Goodman (1989) afirma que o tombamento de blocos ocorre quando um plano da descontinuidade é orientado no sentido para "dentro da face do talude". Entretanto, a inclinação é forte. Contudo, deve-se levar em consideração que tanto a ruptura em cunha, quanto planar, quanto tombamento de blocos apenas acontecerão se o ângulo atribuído à inclinação da fratura for superior ao ângulo de atrito atribuído à rocha. A Figura 4 representa, no formato de estereograma, alguns dos tipos de rupturas.



Figura 4: Tipos de rupturas representados em um esterograma. Modificado Hoek & Bray, 1981.

## 2.5.2 Análise de estabilidade de taludes

Segundo Santos (2015), as análises de estabilidade possuem resultados considerados como muito confiáveis, afinal, representam de forma satisfatória o que de fato acontece com o maciço rochoso analisado. Apesar disso, estas análises dependem de alguns parâmetros medidos e calculados no maciço para servirem como dados, como o de resistência e de deformabilidade.

Para Fritscher (2016), geralmente se utiliza o método do equilíbrio limite para se realizar uma análise de estabilidade. Assim sendo, baseando-se nos parâmetros de resistência do talude e em suas medidas, é obtido um valor de fator de segurança. Este é capaz de transmitir o quanto o talude se encontra estável ou não.

Das (2013) e Gerscovich (2012) afirmam que o fator de segurança pode ser definido como sendo o resultado obtido com a divisão da resistência ao cisalhamento e da tensão cisalhante.

Isso é demonstrado na Equação 20. Nesta equação, FS representa o fator de segurança, o  $\tau_r$  representa a resistência ao cisalhamento e  $\tau_c$  representa a tensão cisalhante. A Tabela 15 indica o que representa cada valor obtido para o fator de segurança.

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_c} \quad (20)$$

Tabela 15: Classificação da estabilidade em relação ao fator de segurança.

Fator de Segurança (FS)	Estabilidade Relativa	
FS < 1	Instável	
FS = 1	Equilíbrio limite	
1 <fs<1,5< td=""><td>Estabilidade Incerta</td></fs<1,5<>	Estabilidade Incerta	
FS > 1,5	Estável	

Fonte: Ferreira (2012).

#### 2.5.3 Princípios de estabilização e obras de contenção

Primeiramente, para estabilizar um talude, deve ser analisada a situação ou contexto em que ele se encontra. Guidicini e Nieble (1983) afirmam que é importante avaliar as condições de contorno, ou seja, se é talude de ferrovia ou talude de mina a céu aberto, por exemplo. Pelo fato de que a situação de contorno dos taludes direcionará às soluções, podendo ser distintas.

Azevedo e Marques (2002) afirmam que para todos os projetos que visam estabilizar um maciço rochoso, precisa-se levar em consideração duas possibilidades: preservar o maciço rochoso na região chamada de pós-pico ou então deixar que o maciço rochoso exceda a região denominada de pós pico e use a resistência residual.

É possível saber se o método de estabilização de talude foi eficaz quantitativamente, segundo Azevedo e Marques (2002), se o fator de segurança do talude variou positivamente. Para se estabilizar taludes, segundo Guidicini e Nieble (1983), os processos podem ser preventivos ou corretivos e ainda se classificarem de acordo com o seu objetivo ou de acordo com o meio.

De acordo com Guidicini e Nieble (1983), alguns métodos de estabilidade de taludes são agrupados em mudança na geometria do talude, realizar drenagem da água subterrânea, realizar reforço do maciço, e, por fim, realizar o controle de desmonte. Os três primeiros métodos citados também são válidos para estabilização de taludes terrosos. Entretanto, segundo Azevedo e Marques (2002), os principais métodos utilizados para estabilização de taludes são o reforço e o suporte.

Quando se trata de reforço, cabos assim como barras de aço atirantadas em furos são empregados de modo a minimizar os deslocamentos que podem acontecer no decorrer de descontinuidades consideradas preexistentes, de modo que a rocha consiga se auto-suportar. Quando se utiliza suporte, os elementos estruturais (externos em relação ao maciço, conseguindo aumentar a capacidade da carga, de maneira que a rocha não consiga se auto suportar completamente, embora seja suportada) vão ser inseridos de modo a inibir o desvio ou deslocamento da rocha na fronteira da escavação. Logo, desta maneira, o suporte não consegue aumentar a resistência inerente do maciço, mas, contudo, consegue alterar as condições-limite.

## 2.6 GEOLOGIA REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

O substrato do território brasileiro se encontra inserido no assoalho continental e é classificado em dois tipos de terrenos, sendo que os antigos consistem de rochas pré-cambrianas, enquanto os novos formam uma cobertura rochosa de idades Fanerozóicas. Rochas de origem metamórficas ou ígneas são, geralmente, são encontradas nos terrenos mais antigos (Almeida, 1967; Almeida *et al.*, 1981).

O estado de Minas Gerais se localiza em partes de terrenos Pré-Cambrianos, além de em bacias sedimentares intercontinentais. A porção Pré-Cambriana está inclusa no escudo Atlântico enquanto que a porção sedimentar está inclusa nos terrenos Fanerozóicos. A Folha Pará de Minas está localizada entre o Quadrilátero Ferrífero e a bacia do rio São Francisco, em porções de rochas do Pré-Cambriano.

Os taludes marginais à BR 262, compreendidos entre as cidades de Nova Serrana e Pará de Minas, estão inseridos sobre a Folha Pará de Minas. Esta abrange a área de, aproximadamente, 2.900 Km<sup>2</sup>. Esta área é demarcada pelas seguintes coordenadas: latitude 19°30'– 20°00' e longitude 44°30'– 45°00'. A Figura 5 indica onde está localizada a Folha Pará de Minas.



Figura 5: Localização da Folha Pará de Minas. Fonte: Romano (2006).

Romano (2006) afirma que sob a ótica histórica, a área conhecida como Folha Pará de Minas, embora esteja localizada no limite ocidental do Quadrilátero Ferrífero, não obteve dos geólogos e profissionais da área algum interesse de estudo. Esta área não foi objeto de estudo por um tempo bastante grande, embora esteja situada onde, no começo do século XVIII, era a trilha dos bandeirantes. Esta partia de Sabará e Ouro Preto e seguia para Goiás e Paracatu a procura de bens minerais de valor.

A Folha Pará de Minas, segundo Romano (2006), está situada no Cráton São Francisco. Este se conceitua como parte estável da litosfera continental de formação antiga. Sua litologia está separada em três domínios litológicos pertencentes ao Pré-Cambriano.

A Folha pode ser separada em três grandes domínios litológicos précambrianos: embasamento cratônico meso a neo arqueano englobando gnaisses e migmatitos e correspondendo a cerca de 35-40% da folha; sequência greenstone belt neoarqueana do Supergrupo Rio das Velhas ocupando aproximadamente a 30-35% do terreno mapeado; intrusões de granitóides ocupando cerca de 20-25% da folha. (Romano, 2006).

Ainda segundo Romano (2006), a coluna estratigráfica proposta para a Folha Pará de Minas apresenta rochas do Supergrupo Rio das Velhas, separando-se em grupo Nova Lima e grupo Maquiné, além de rochas do grupo Bambuí formadas no Arqueano e Proterozóico, respectivamente, e ainda terraços aluvionares do Fanerozóico. A hidrologia da região está associada entre a bacia do rio São Francisco e as bacias do rio Pará e Paraopeba.

O acidente tectônico mais relevante seria o lineamento Pitangui. "A direção do lineamento é francamente noroeste sudeste, tem uma largura máxima de mais de 20Km e materializa pelo menos três zonas principais de cisalhamento." (Romano, 2006).

A Folha Pará de Minas comporta afloramentos diversos, como aponta os estudos de Romano (2006). São eles afloramentos de rochas de posicionamento intermediário, do complexo Divinópolis, complexo Belo Horizonte, Supergrupo Rio das Velhas, grupo Nova Lima, diques básicos e o grupo Bambuí.

Dentre os recursos mineráveis inseridos na folha Pará de Minas está o conceituado agalmatolito. "Desde os anos 30, a região de Pará de Minas já era conhecida por causa de uma rocha muito peculiar que até então só era ocorrente em grandes volumes na Carolina do Norte nos Estados Unidos. Tratava-se do agalmatolito, uma rocha peraluminosa, material de grande importância para a indústria cerâmica fina" (Romano, 2006).

A explotação de agalmatolito está ativa até os dias atuais. Apresentando diversificados usos, outros estudos foram feitos na área em busca de Urânio, mas os resultados não foram lançados a público (Romano,2006).

#### **3 METODOLOGIA**

## 3.1 MATERIAIS

A primeira parte do trabalho foi a realização dos trabalhos de campo nos taludes em estudo e, assim, os materiais básicos para campo foram utilizados, tais como a bússola para se obter a atitude da face do talude e das descontinuidades; martelo de geólogo para estimativa da resistência do maciço rochoso; trenas, a fim de se obter o valor do espaçamento e da persistência das descontinuidades.

Os *softwares* utilizados foram o Dips, versão 7.016, o RocPlane versão 4.001, o Swedge, versão 7.001 e o RocTopple versão 2.001. Todos os *softwares* são de domínio da Rocscience.

## **3.2 MÉTODOS OU PROCEDIMENTOS**

A metodologia geral da presente pesquisa está apresentada, por meio de um fluxograma, na Figura 6. No fluxograma é possível observar as etapas da pesquisa em sequência.



Figura 6: Etapas realizadas para realizar este projeto. Fonte: Autoria própria, 2019.

Inicialmente, o trabalho foi realizado em campo, avaliando as características geológicas e geotécnicas dos taludes. Devido aos diferentes graus de fraturamento, assim como os diferentes graus de alteração do maciço rochosos observado no mesmo talude, os Taludes 1 e 3 precisaram ser setorizados. Isso foi necessário com a finalidade de se analisar cada caso especificamente, de maneira a representar bem o que pode ocorrer em se tratando de tipos de rupturas em cada trecho do talude. Na Figura 7 está indicado o Talude 1, cuja foto foi retirada do Google Earth. Na Figura 8 está sendo apresentado o Talude 2 e na Figura 9 está sendo apresentado o Talude 3.



Figura 7: Talude 1. Fonte: Google Earth, 2019.



Figura 8: Talude 2. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 9: Talude 3. Fonte: Autoria própria, 2019.

Obteve-se cada parâmetro requerido pela classificação geomecânica RMR, de acordo com Bieniaswky (1973) sendo eles, espaçamento entre descontinuidades, a persistência das descontinuidades, o grau de alteração do maciço rochoso e o grau de resistência do maciço rochoso. Para fins de cálculos sobre a percolação de água, foram obtidos dois valores de RMR, considerando o talude totalmente seco e totalmente saturado.

As resistências foram estimadas por meio de testes de martelo de geólogo, de acordo com a ISRM (1981) sendo que a maneira com que a rocha se comportava a cada golpe indicava a faixa de resistência em que ela se encontrava. O espaçamento e persistência foram estimados utilizando-se trenas. Assim, de acordo com observações realizadas em campo, pôde-se obter os índices de GSI, os parâmetros de Q de Barton e do RMR e, portanto, calculá-los. A próxima etapa da pesquisa foi a análise cinemática, com objetivo de identificar os mecanismos de ruptura predominantes nos taludes.

Baseando-se nos resultados obtidos na análise cinemática, a próxima etapa foi a análise de estabilidade dos taludes. Para isto, quando resultou em chances de ocorrer ruptura planar, o *software* utilizado foi RocPlane; para rupturas em cunha, o *software* utilizado foi Swedge e para tombamento de blocos foi o RocTopple. O fator de perturbação considerado foi de 0.7, e o critério de resistência utilizado em todos os casos foi de Barton – Bandis. Este critério foi

escolhido porque, primeiramente, os programas da Rocscience utilizados não conseguiam fornecer resultados precisos com outros critérios de resistência sendo considerados na análise de estabilidade de taludes. Em segundo lugar, porque este critério de resistência precisava como dados de entrada as informações que já eram conhecidas no momento da análise. A análise de estabilidade realizada foi a determinística, considerando o conservadorismo em parâmetros seguida da aplicação de análise de sensibilidade para as variáveis grau de saturação de água, altura do talude e ângulo da face do talude.

Com o resultado da análise de sensibilidade, foi possível propor métodos de estabilização e contenção. Os métodos de estabilização e contenções foram baseados nas observações em campo, além de pesquisa bibliográficas.

## 4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### 4.1 Descrição dos Taludes

No Talude 1 havia a presença de gnaisse, cujo bandamento era centimétrico a métrico, além de algumas regiões milonitizadas. A ação do intermperismo foi mais intensa na parte superior deste talude. Com isto, neste talude há a presença de feldspato rosa, anfibólio e biotita. A granulação pode ser considerada de fina a grossa. A coloração deste talude era de cinza claro na porção não intemperizada (inferior) e avermelhada nas porções intemperizadas (superiores).

De acordo com o trajeto realizado no dia do trabalho de campo, o Talude 1 foi o primeiro a ser analisado e sua coordenada é 19°53'34" S e 44° 52' 47" W. Este é o Talude situado mais próximo a Nova Serrana. A altura deste talude variava entre 4,5 metros e 8 metros em toda sua extensão de estudo.

No Talude 2 foi possível observar a presença de gnaisses, com bandamentos de centimétricos a métricos. Também havia algumas regiões máficas e migmatíticas, contendo feldspato rosa, biotita, anfibólio e quartzo. A granulação era centimétrica nos feldspatos. A coloração deste talude era de cinza claro a branco.

O Talude 2 foi o segundo a ser analisado no dia do trabalho de campo e sua coordenada é 19°53'24" S e 44°48'15" W. Este talude foi o único que não precisou ser setorizado. A setorização ocorre quando as características do maciço rochoso não são uniformes em toda a sua extensão, como não ocorreu com o Talude 2, pois neste era uniforme. Este talude apresentava 8,5 metros de altura. A coloração deste talude era marrom.

No Talude 3, há a presença, assim como nos outros taludes, de gnaisse com bandamentos de centimétricos a métricos. Havia diques félsicos, regiões máficas, além de migmatitos (continha quartzo, feldspato, anfibólio e biotita). A granulação deste talude era fina, entretanto, era o talude que apresentava maior extensão dentre os três analisados.

O Talude 3 se encontra mais próximo a Pará de Minas. Sua coordenada é 19° 53' 35" S e 44°39'09" W. A altura deste talude variou entre 4,5 metros e 7,3 metros em toda a extensão de estudo.

#### 4.2 DADOS OBSERVADOS EM CAMPO

#### 4.2.1 Talude 1

A atitude obtida na face do Talude 1 foi de 170/80. Neste talude foi observada presença de famílias de descontinuidades. No setor 1, a família horizontal apresenta, em média, 4 metros de persistência, e 6 mm de abertura. O espaçamento da família vertical é de 25 cm, enquanto que o espaçamento da família horizontal é de 10 cm.

Levando-se em consideração o caminho entre os municípios de Araxá e de Belo Horizonte, o setor 3 está localizado no sentido de Araxá, enquanto que o setor 1 está localizado no sentido de Belo Horizonte. O setor 2 se encontra entre o setor 1 e o 3. Em relação ao Talude 1, setor 2, a resistência à compressão do maciço foi classificada como maior que 250 MPa. Em relação ao setor 3 do Talude 1, teve-se como observações de campo que o espaçamento da família vertical era de 10 cm a 01 metro; o espaçamento da família horizontal era de 0,5 metro e o espaçamento da família vertical 2 era de 0,15 a 01 metro.

No Talude 1, o setor 3 apresenta quatro famílias de descontinuidades. Uma dessas famílias apresentou persistência média de 64 cm, abertura de 1 cm, classificada como rugosa, sem preenchimento (índice 6) e sem alteração. A segunda família de descontinuidade apresentou, em média, 100 cm de persistência, ausência de abertura, foi classificada como rugosa, não apresentou preenchimento e nem alteração. A terceira família de descontinuidade apresentou 300 cm de persistência, ausência de abertura, foi classificada como rugosa, não apresentou preenchimento e nem alteração. Não existem esses dados específicos para a quarta família de descontinuidade, afinal, em campo ela não foi considerada como sendo uma família, mas a interpretação realizada utilizando-se o *software* Dips foi diferente porque a concentração de descontinuidades ficou mais clara com o auxílio desse *software*.

No setor 3 do Talude 1, o espaçamento de uma das famílias está entre 10 cm a 1 metro. Para a outra família, o espaçamento médio é de 0,5 metro. E, por fim, para a terceira família observada em campo espaçamento está entre 15 cm a 1 metro.

#### 4.2.2. Talude 2

A face do Talude 2 apresenta atitude de 010/90. Não houve setorização neste talude. Observouse em campo que o espaçamento da família horizontal era de 15 cm; o espaçamento da família vertical era de 1,24 cm e a medida da persistência da família vertical era de 1.54 m. A resistência mecânica do maciço rochoso foi classificada como R6, ou seja, esse maciço é considerado extremamente resistente, pois suas amostras apenas são retiradas com o auxílio do golpe de martelo de geólogo.

Além disso, não foram observadas alterações no maciço.

#### 4.2.3 Talude 3

Não foram extraídos dados referentes às descontinuidades para o Talude 3. Desta forma, não é possível realizar análise cinemática e de estabilidade para este talude.

## 4.3 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DO TALUDE 1

A Tabela 16 indica os valores dos parâmetros para cálculo de Q de Barton. A Tabela 17 indica os valores dos parâmetros para cálculo do RMR do setor 1 do Talude 1 na porção superior enquanto que a Tabela 18 apresenta estes valores para este mesmo setor na porção inferior. A Tabela 19 indica esses valores de cálculo de RMR para os setores 2 e 3 (porção inferior de ambos) do Talude 1, enquanto que estes valores da porção superior de ambos os setores (2 e 3) do Talude 1 são representados pela Tabela 20. Sabe-se que o RMR é um sistema de classificação que é obtido por meio de pesos, ou seja, ele atribui pesos a cada um dos parâmetros que o influenciam. Logo, pode-se perceber que a resistência mecânica recebe pesos diferentes quando o setor é analisado em sua parte superior e inferior. Este tipo de análise de parte superior e inferior não foi realizada para os sistemas de classificação de Q de Barton e GSI, afinal, para ambos, já foi diretamente considerado a pior condição observada em cada maciço a fim de se realizar os cálculos ou obter os valores. A parte superior recebe uma menor pontuação devido ao grau de alteração, afinal, ela se apresenta mais alterada do que a porção inferior. Além disso, percebe-se também como a água é capaz de influenciar na classificação de um maciço rochoso, afinal, o peso variou 15 unidades entre as situações de talude completamente seco para completamente saturado. Quanto menor o peso do parâmetro, pior a qualidade do maciço rochoso. Com isto, observa-se que quanto mais água está percolando no maciço, mais instável

ele fica. A Tabela 21 apresenta os resultados das classificações de maciços rochosos de RMR, Q de Barton e GSI de maneira conservadora, ou seja, apresenta os piores cenários ou resultados obtidos para cada local.

Parâmetros para cálculo do Q de Barton para Primeiro Talude	Setor 1	Setor 2	Setor 3
Jn	4.00	4.00	9.00
Jr	1.50	1.50	1.50
Já	2.00	0.75	0.75
Jv	14.00	18.67	18.67

Tabela 16: Parâmetros para cálculo do Q de Barton para Talude 1.

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 17: Valores utilizados para calcular o RMR no setor 1 do Talude 1 (porção superior).

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor
RQD	13	
Resistência Mecânica	2	
Espaçamento das	8	
descontinuidades		Setor 1 do Talude 1 (porção
Condições das descontinuidades	22	superior)
Presença de água (100%	0	
saturação)		
Ausência de água (0% saturação)	15	
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		60 (ausência de saturação)
		45 (máxima saturação)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Fabela 18: Valores utiliza	dos para calcular	o RMR no setor 1	do Talude 1 (	(porção inferior).
----------------------------	-------------------	------------------	---------------	--------------------

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor	
RQD	13		
Resistência Mecânica	15		
Espaçamento das	8		
descontinuidades		Setor 1 do Talude 1 (porção	
Condições das descontinuidades	25	inferior)	
Presença de água (100%	0		
saturação)			
Ausência de água (0% saturação)	15		
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		76 (ausência de saturação)	
		61 (máxima saturação)	

Fonte: Autoria própria, 2019

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor
RQD	13	
Resistência Mecânica	15	
Espaçamento das	15	
descontinuidades		Setor 2 porção inferior e Setor 3
Condições das descontinuidades	25	inferior
Presença de água (100%	0	
saturação)		
Ausência de água (0% saturação)	15	
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		83 (ausência de saturação)
		68 (máxima saturação)

Tabela 19: Valores utilizados para calcular o RMR nos setores 2 e 3 do Talude 1 (porção inferior de ambos).

Tabela 20: Valores utilizados para calcular o RMR nos setores 2 e 3 do Talude 1 (porção superior de ambos).

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor	
RQD	13		
Resistência Mecânica	2		
Espaçamento das	15		
descontinuidades		Setor 2 porção superior e Setor 3	
Condições das descontinuidades	22	superior	
Presença de água (100%	0		
saturação)			
Ausência de água (0% saturação)	15		
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		67 (ausência de saturação)	
		52 (máxima saturação)	

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 21: Resultado das classificações de maciços rochosos para o Talude 1.

	Setor 1	Setor 2	Setor 3
GSI	45.00	65.00	60.00
RMR (sem saturação)	60.00	67.00	67.00
RMR (condição saturada)	45.00	52.00	52.00
Q de Barton	12.90	26.70	11.87

Fonte: Autoria própria, 2019.

Pode-se perceber, ao analisar a Tabela 21, que os valores de RMR foram calculados tanto para situações em que o talude se encontra completamente seco, assim como para quando ele se encontra completamente saturado com água. Ao se realizar a análise desta maneira, consegue-se prever a qualidade do maciço rochoso em todas as situações climáticas possíveis (em tempos muito chuvosos, quando o talude estará saturado de água, se tornando mais instável, assim como em tempos muito secos, quando o talude estará praticamente completamente sem a presença de água em seu interior e mais estável). A Tabela 22 indica o resultado de RMR para cada setor do Talude 1.

Setores do Talude 1	Classe de RMR	Descrição da classe em que se encontram
1	II a III	(rocha boa a razoável)
2	I a III	(rocha muito boa até razoável)
3	I a III	(rocha muito boa até razoável)

Tabela 22: Classes de RMR obtidas para os setores do Talude 1

Os valores do sistema de classificação Q de Barton obtidos na Tabela 21 indicam que em todos os setores do Talude 1, o padrão geomecânico do maciço pode ser considerado bom, pois a classe obtida é a IV. Isto está de acordo com o que foi verificado com a classificação geomecânica do RMR, pois para este, a classificação vai de regular a muito bom. Levando-se em consideração que o GSI pode variar de 5 a 100, os valores obtidos de 45 para o setor 1, 65 para o setor 2 e 60 para o setor 3, concordam com a análise realizada com o RMR e com o Q de Barton. O valor de GSI de 45 indica que no setor 1 o maciço rochoso tem uma qualidade inferior aos demais, isso está de acordo com o que foi obtido com o RMR, afinal foi para este setor que o RMR não conseguiu atingir a classe I. Apesar de no setor 2 e 3, analisando-se com RMR, os valores serem idênticos e para o sistema Q de Barton a classe ser a mesma, os valores de GSI podem variar entre esses setores porque o sistema de classificação de maciços rochosos denominado GSI é muito subjetivo.

Em relação ao setor 1, o espaçamento entre as descontinuidades do setor 2 obteve peso maior na classificação RMR. Isso aconteceu porque o espaçamento entre as descontinuidades no setor 2 foi maior do que no setor 1; ou seja, o setor 1 é mais fraturado, o que leva a menor qualidade do maciço rochoso. Afinal, descontinuidades podem ocasionar rupturas. Quanto maior o número delas, maiores as chances de uma ruptura ocorrer.

## 4.4 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DO TALUDE 2

A Tabela 23 indica os parâmetros do Talude 2 para cálculo de Q de Barton. A Tabela 24 indica os parâmetros utilizados para calcular o RMR para o Talude 2. A Tabela 25 indica os resultados dos três sistemas de classificações de maciço rochoso para o Talude 2.

Parâmetros	Valores	
Jn	4.00	
Jr	1.50	
já	0.75	
Jv	4.67	
Fonte: Autoria própria, 2019.		

Tabela 23: Parâmetros utilizados para cálculo de Q de Barton no Talude 2.

Tabela 24: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR para Talude 2.

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Talude
RQD	20	
Resistência Mecânica	15	
Espaçamento das descontinuidades	10	Taluda 2
Condições das descontinuidades	24	Talude 2
Presença de água (100%	0	
	15	•
Ausencia de agua (0% saturação)	15	
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		84 (ausência de saturação)
		69 (máxima saturação)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 25: Valores das classificações de maciços rochosos utilizadas para o Talude 2.

Parâmetros	Valores
Q de Barton	49.80
GSI	65.00
RMR sem presença de água	84.00
RMR com presença de água	69.00

Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Tabela 24, o RQD obteve um valor de peso muito alto, sendo que a qualidade da rocha foi então classificada como excelente. Da mesma maneira, foram consideradas as condições de total saturação de água até maciço completamente seco para fins de cálculos de RMR.

Percebe-se, na Tabela 25, que o valor de GSI visto em campo é de 65. Em relação à classificação Q de Barton, o maciço se encaixa na classe III. Isto quer dizer que o padrão geomecânico do maciço é muito bom. Aliás, este valor é maior do que o obtido para o Talude 1, o que indica que a qualidade do maciço rochoso do Talude 2 é melhor que do Talude 1. Isto ocorre porque, dentre outros motivos, não se observa alteração no Talude 2, mas no 1 sim. Além disso, outro fator que indica que este talude possui maciço rochoso de maior qualidade que o Talude 1 consiste no fato de que ao RQD foi atribuído um valor maior. O RMR variou entre as classes I e II, ou seja, de muito boa qualidade da rocha até boa qualidade da mesma.

# 4.5 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DO TALUDE 3

A Tabela 26 indica os valores de cada parâmetro utilizado para calcular o Q de Barton para o Talude 3. As Tabelas 27 a 29 indicam os valores utilizados para cálculo de RMR para os setores 1, 2 e 3, respectivamente.

Parâmetros	Valores
Jn (setor 1)	15
Jr (setor 1)	1.5
Ja (setor 1)	0.75
Jn (setor 2)	15
Jr (setor 2)	1,5
Ja (setor 2)	0,75
Jn (setor 3)	15
Jr (setor 3)	1,5
Ja (setor 3)	0,75
Jv	0

Tabela 26: Parâmetros para cálculo do Q de Barton para o Talude 3.

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 27: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR no setor 1 do Talude 3.

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor do Talude 3
RQD	13	
Resistência Mecânica	15	
Espaçamento das	8	
descontinuidades		Satan 1
Condições das descontinuidades	21	36101 1
Presença de água (100%	0	
saturação)		
Ausência de água (0% saturação)	15	
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		72 (ausência de saturação)
		57 (máxima saturação)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 28: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR no setor 2 do Talude 3.

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor do Talude 3
RQD	13	
Resistência Mecânica	15	
Espaçamento das	8	
descontinuidades		Satar 2
Condições das descontinuidades	19	Setor 2
Presença de água (100%	0	
saturação)		
Ausência de água (0% saturação)	15	
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		70 (ausência de saturação)
		55 (máxima saturação)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Parâmetros	Pesos na classificação RMR	Setor do Talude 3		
RQD	13			
Resistência Mecânica	15			
Espaçamento das	8			
descontinuidades		Satan 2		
Condições das descontinuidades	29	Selor 5		
Presença de água (100%	0			
saturação)				
Ausência de água (0% saturação)	15	]		
Valor da soma dos pesos (valor do RMR):		80 (ausência de saturação)		
		65 (máxima saturação)		

Tabela 29: Parâmetros e pesos utilizados para cálculo de RMR no setor 3 do Talude 3.

Como pode ser percebido, pela Tabela 30, o Talude 3 foi setorizado em 3 partes, sendo que os valores de GSI obtidos foram de 55 para o setor 1, 60 para o setor 2 e 70 para o setor 3. Todos os setores apresentarem o mesmo valor para o Q de Barton, sendo assim, todos se encaixam na classe IV (padrão geomecânico do maciço considerado como bom). No setor 1, as classes de RMR variaram entre II (boa) e III (razoável). No setor 2, as classes de RMR variaram entre II e III da mesma maneira. Já no setor 3, o RMR se encontrou apenas na classe II. Isso faz sentido se comparar o GSI com o RMR, afinal, o setor 3 obteve melhor resultado em ambas as classificações. Estes valores de classes de RMR e Q de Barton são demonstrados na Tabela 31.

GSI (sotor 1)	55
	55
GSI (setor 2)	60
GSI (setor 3)	70
Q de Barton (setor 1)	13.28
Q de Barton (setor 2)	13.28
Q de Barton (setor 3)	13.28
RMR (setor 1) sem presença de água	72
RMR (setor 1) com presença de água	57
RMR (setor 2) sem presença de água	70
RMR (setor 2) com presença de água	55
RMR (setor 3) sem presença de água	80
RMR (setor 3) com presença de água	65

Tabela 30: Valores das classificações de maciços rochosos para o Talude 3.

Fonte: Autoria própria, 2019.

Setores	Classe RMR	Classe Q de Barton
1 do Talude 3	ll e lll	
2 do Talude 3	ll e lll	IV
3 do Talude 3		

Tabela 31: Classes de RMR e Q de Barton obtidas para o Talude 3.

# 4.6 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

A Tabela 32 mostra as propriedades de coesão e ângulo de atrito obtidas por meio do RMR dos setores do Talude 1, tanto para condições de talude seco quanto saturado. É importante conhecer a coesão do maciço rochoso porque existem critérios de resistência, como o de Mohr-Coulomb, por exemplo, que a utiliza para se obter um fator de segurança do talude. Da mesma forma, o ângulo de atrito é útil para a análise de estabilidade de taludes, mas também é para a análise cinemática. A Tabela 33 indica quais foram os valores de módulo de deformabilidade encontrados para o Talude 1.

Tabela 32: Ângulo de atrito e coesão para o Talude 1 em condições de saturação e seca.

Propriedades do Talude 1	Setor 1	Setor 2	Setor 3
Ângulo de Atrito (talude seco)	25°	35°	35°
Ângulo de Atrito (talude com água)	25°	25°	25°
Coesão da massa rochosa (talude seco)	200 kPa	300 kPa	300 kPa
Coesão da massa rochosa (talude com água)	200 kPa	200 kPa	200 kPa
	0.1.0		

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 33: Módulo de deformabilidade para o Talude 1 em condições seca e saturada.

Valores do módulo de deformabilidade in situ	Setor 1	Setor 2	Setor 3
Talude seco	18 GPa	30 GPa	30 GPa
Talude saturado com água	10 GPa	15 GPa	15 GPa

Fonte: Autoria própria, 2019.

A Tabela 34 indica o ângulo de atrito, a coesão da massa rochosa e o módulo de deformabilidade *in situ* do Talude 2 quando este se encontra em condição de ausência de água em seu interior. Já a Tabela 35 indica os mesmos parâmetros da Tabela 34, mas com a condição de presença de saturação de água. Percebe-se que assim como no Talude 1, a presença de água diminuiu o módulo de deformabilidade *in situ* significativamente. Este resultado é esperado, afinal, quanto maior a quantidade de água, maiores são as chances do talude se romper mais depressa e facilmente, gerando menor módulo de deformabilidade.

Ângulo de Atrito (sem > 45° presença de água)	Propriedades do Talude 2	Valor da Propriedade
	Ângulo de Atrito (sem presença de água)	> 45°
Coesão da massa rochosa (sem > 400 kPa presença de água)	Coesão da massa rochosa (sem presença de água)	> 400 kPa
Módulo de deformabilidade in situ (sem presença de água)	Módulo de deformabilidade in situ (sem presença de água)	64 GPa

Tabela 34: Ângulo de atrito, coesão e módulo de deformabilidade do Talude 2 quando este se encontra seco.

Tabela 35: Ângulo de atrito, coesão da massa rochosa e módulo de deformabilidade in situ do Talude 2 quando este se encontra saturado.

Propriedades do Talude 2	Valor da propriedade
Ângulo de Atrito (com presença de água)	35°
Coesão da massa rochosa (com presença de água)	300 kPa
Módulo de deformabilidade <i>in situ</i> (com presença de água)	28 GPa

Fonte: Autoria própria, 2019.

A Tabela 36 indica as propriedades de ângulo de atrito, coesão da massa rochosa e módulo de deformabilidade *in situ* para os três setores do Talude 3 quando este se encontra saturado. Já a Tabela 37 indica os mesmos parâmetros da Tabela 36, mas quando o Talude 3 se encontra seco. Verifica-se que é tendência a coesão, o ângulo de atrito e o módulo de deformabilidade *in situ* reduzirem os seus valores quando o talude se encontra saturado. Isto é esperado, afinal, quanto maiores são a coesão, o ângulo de atrito e o módulo de deformabilidade mais dificilmente haverá rupturas no maciço rochoso. A água é um agente que contribui para a ruptura em maciços rochosos. Logo, quanto mais água houver no maciço, menor serão os valores de coesão, ângulo de atrito e módulo de deformabilidade.

Tabela 36: Ângulo de atrito, coesão e módulo de deformabilidade para o Talude 3 quando este se encontra saturado.

Setor 1	Setor 2	Setor 3
25°	25°	35°
200 kPa	200 kPa	300 kPa
14 GPa	14 GPa	21 GPa
	Setor 1   25°   200 kPa   14 GPa	Setor 1 Setor 2   25° 25°   200 kPa 200 kPa   14 GPa 14 GPa

Fonte: Autoria própria, 2019.

		1 1	
Propriedades do Talude 3	Setor 1	Setor 2	Setor 3
Ângulo de Atrito (seco)	35°	35°	35°
Coesão da massa rochosa (seco)	300 kPa	300 kPa	300 kPa
Módulo de deformabilidade <i>in</i> situ (seco)	28 GPa	29 GPa	55 GPa

Tabela 37: A	Angulo de atrito,	, coesão e módulo	de deformabilidade	para o Talude 3 c	juando este se encontra saturado
	- L				

Em presença de água (estado mais crítico de estabilidade), o Talude 2 e o setor 3 do Talude 3 apresentaram maiores módulos de deformabilidade em relação aos demais. Isso indica que o maciço consegue alterar sua forma por mais tempo em resposta às tensões atuantes do que os demais setores do Talude 3 e do Talude 1.

# 4.7 ANÁLISE CINEMÁTICA

Para se realizar a análise cinemática, a escolha do ângulo de atrito foi importante, afinal, eles variam de acordo com a condição de saturação do maciço rochoso. A escolha feita consiste em uma visão mais conservadora, ou seja, escolheu-se o ângulo de atrito cuja condição de saturação do maciço rochoso foi máxima. Com isto, sabe-se que esta escolha envolve a situação mais crítica para o talude em se tratando de riscos de ruptura. Se não houver probabilidades de rupturas no talude com este nível de saturação, com certeza para os outros níveis também não haverá.

Os resultados das análises cinemáticas são expostos na Tabela 38. Considerou-se a parte superior e inferior dos taludes para se realizar esta análise porque essas porções têm características diferentes, como o grau de alteração por exemplo. Com a Tabela 38, é possível notar que o setor 1 do Talude 1 apresenta maior risco de ruptura em cunha (9,67% em sua parte superior e 1,67% em sua parte inferior); o setor 2 do Talude 1 apresenta risco de ruptura planar (11,11%), por cunha (até 50% de chances) e tombamento de blocos (até 19,44%); o setor 3 do Talude 1 apresenta chances de sofrer uma ruptura planar (08% de chances), por cunha (até 31% de chances) e tombamento do blocos (até 11,33% de chances); o Talude 2 pode sofrer rupturas por cunha (até 12,86% de chances) e tombamento de blocos (até 36,67% de chances).

Existem mais tipos de rupturas, como a ruptura circular e o tombamento flexural. Entretanto, a característica da ruptura circular é possuir todos os polos das descontinuidades distribuídos aleatoriamente na rede esterográfica, além de ser mais comum em taludes cujo material é classificado como solos. Além disso, neste tipo de ruptura não se consegue definir família, além

da escala do problema. E tombamento flexural depende do tipo de material que compõe o maciço rochoso do talude. Como no caso deste trabalho o material trata-se de um gnaisse e as famílias foram definidas com facilidade, análises para ruptura circular e tombamento flexural não foram realizadas.

Taludes	Setores	Ruptura Planar		Ruptura em Cunha		Tombamento de Blocos Direto		Tombamento de Blocos Oblíquo	
Condição do talude:		Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Talude 1	1 superior	0.00%	0.00%	9.17%	9.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1 inferior	0.00%	0.00%	1.67%	1.67%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2 superior	11.11%	11.11%	47.22%	50.00%	2.78%	2.78%	13.89%	2.78%
	2 inferior	11.11%	11.11%	44.44%	47.22%	2.78%	2.78%	19.44%	13.89%
	3 superior	8.00%	8.00%	30.00%	31.00%	2.00%	2.00%	10.67%	8.33%
	3 inferior	8.00%	8.00%	27.33%	30.00%	2.00%	2.00%	11.33%	10.67%
Talude 2	1	0.00%	0.00%	11.90%	12.86%	36.67%	36.67%	2.38%	2.38%

Tabela 38: Probabilidade de ocorrência de uma ruptura mediante realização de análise cinemática.

Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 10 representa a probabilidade de ocorrer uma ruptura planar nos Taludes 1 e 2. Percebe-se que a maior probabilidade de ocorrer ruptura planar (11,11%) encontra-se no setor 2 do Talude 1. Mesmo com a presença de água, como pode ser observado na Tabela 38, a probabilidade de ruptura planar em todos os taludes continua a mesma.



Figura 10: Probabilidade de ocorrer ruptura planar. Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 11 indica a probabilidade de ruptura em cunha em cada um dos taludes quando estes se encontram na condição de secos. Assim como na ruptura planar, o setor 2 do Talude 1

apresenta maior probabilidade de ruptura (47,22% para a porção superior e 44,44% para a porção inferior). Quando estão saturados, existem variações das probabilidades de ruptura em cunha, mas elas não são significativas, assim como indica a Figura 12.



Figura 11: Probabilidade de ruptura em cunha quando o talude se encontra seco. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 12: Probabilidade de ruptura em cunha considerando-se talude saturado. Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 13, percebe-se que o Talude 2 apresenta maior probabilidade de sofrer ruptura por tombamento de blocos direto (36,67% de chances). Isso ocorre tanto quando ele está saturado completamente como quando ele está seco, mostrando que o grau de percolação da água não exerce influência significativa nesses casos.



Figura 13: Probabilidade de tombamento de blocos direto. Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 14 indica que, em condições em que o talude se encontra seco, o setor 2 do Talude 1 apresenta maiores chances de ter um tombamento de blocos oblíquo (13,89% de chances em sua porção superior e 19,44% de chances em sua porção inferior). A Figura 15 indica que ainda há probabilidade de ocorrência de tombamento de blocos oblíquo no setor 2 do Talude 1 quando o talude se encontra em condições de máxima saturação (13,89% de chances na porção inferior), entretanto, a porção superior deste setor reduziu bastante a probabilidade de ocorrência deste tipo de tombamento de blocos (2,78%).



Figura 14: Probabilidade de Tombamento de blocos oblíquo considerando o talude como seco. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 15: Probabilidade de Tombamento de blocos oblíquo considerando o talude como saturado. Fonte: Autoria própria, 2019.

A análise cinemática do Talude 3 não foi realizada, afinal, não foram estudadas, em campo, as características das descontinuidades e da rocha intacta deste talude. Como a análise cinemática não foi realizada para este talude, consequentemente a análise de estabilidade e os métodos de estabilização e contenção de blocos em casos de ruptura também não foram feitos neste caso.

## 4.7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS TALUDES

## 4.7.1 ANÁLISE DE RUPTURA PLANAR

A análise de ruptura planar foi realizada para o setor 2 do Talude 1 unicamente, afinal, o Talude 2 e o setor 1 do Talude 1 apresentaram resultado de 0% de probabilidade de ruptura planar ao se realizar a análise cinemática; no setor 3 do Talude 1 apenas 2 polos num total de 25 caíram na região de ruptura planar utilizando-se o *software* Dips, sendo assim considerados em número insuficiente para análise de estabilidade.

O critério para determinação de parâmetros de resistência foi o de Barton & Bandis (1982). O JRC utilizado foi de 8 devido às características das rugosidades analisadas nas descontinuidades. O ângulo de atrito foi de 35°, afinal, a análise adotada é conservadora (logo, escolheu-se o ângulo de atrito do talude em condição de máxima saturação). O JCS utilizado teve o valor de 250 MPa. Também como dados de entrada no *software* Rocplane, da Rocscience, o ângulo do talude é de 80°; a altura do talude é de 6 metros; o peso específico da rocha (gnaisse) é de 0,026 MN/m<sup>3</sup> e o ângulo do plano da falha é de 65°. O peso específico da água foi considerado como 0,00981 MN/m<sup>3</sup> e foi determinado que a porção do talude preenchida com água seria de 10%. Com isto, obteve-se como resultado um fator de segurança de 1,24 aproximadamente, indicando nível de estabilidade incerta.

A Figura 16 ilustra o processo de análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1, assim como mostra no canto direito algumas informações. É importante notar que, para este *software* e com o propósito desejado de obter o fator de segurança, a opção de análise escolhida foi a determinística. Caso fosse a probabilística, os resultados seriam dados em forma de probabilidades.



Figura 16: Análise de estabilidade do setor 2 do Talude 1. Fonte: Autoria própria, 2019.

Partindo-se desta análise, fez-se a análise de sensibilidade. A opção escolhida na Figura 17 é de se analisar o fator de segurança em relação à porcentagem de água presente no maciço rochoso (variando-se esta de 0% a 100%). Com a Figura 17 é possível perceber que o talude em questão consegue permanecer estável (fator de segurança igual a 1) até uma porcentagem preenchida de aproximadamente 25% de água. Acima de 25% de saturação, o talude se rompe.



Figura 17: Alteração do fator de segurança mediante a variação da porcentagem de água no talude. Fonte: Autoria própria, 2019.

## 4.7.2 ANÁLISE DE RUPTURA EM CUNHA

A análise de ruptura em cunha foi feita apenas com o setor 3 do Talude 1, afinal poucas interseções caíram na região que daria cunha no Talude 2, além de que nos setores 1 e 2 do Talude 1 foi definida apenas 1 família em cada. Para existir ruptura em cunha, precisa haver interseção entre famílias de descontinuidades. Apenas uma família de descontinuidade não provoca cunha. O que ocorreu para que na fase de análise cinemática para que resultasse em possibilidade de ter cunha nos setores 1 e 2 do Talude 2 foi que o *software* estava considerando as interseções entre as descontinuidades, e não entre as famílias de descontinuidades.

O *software* utilizado foi o Swegde, da Rocscience, e a análise foi determinística – afinal, o interesse era obter o fator de segurança do talude. O dip inserido no "Input Data" foi de  $80^{\circ}$ , o dip Direction foi de  $170^{\circ}$  e a altura do talude era de 4,5 metros. Além disso, como a rocha era gnaisse, o peso específico inserido foi de 2,55 t/m<sup>3</sup>.

Também é importante inserir os dados das famílias das descontinuidades que se interceptam. Uma delas possui o dip de 85° e o dip direction de 225°, enquanto que a outra possui o dip de 83° e o dip direction de 92°. O critério utilizado para determinação dos parâmetros de resistência, assim como na análise de estabilidade para ruptura planar, foi o de Barton e Bandis. O JRC escolhido para ambas as famílias de descontinuidades foi de 8, afinal, este valor é o mais adequado mediante as condições de rugosidade das descontinuidades observadas no campo. O ângulo de atrito escolhido para ambas as famílias de descontinuidades foi de 35° e o valor de JCS foi de 250000 tf/m<sup>2</sup>.

O peso específico da água utilizado foi de 0,981 t/m<sup>3</sup>. E, assim como na análise de estabilidade para ruptura planar, considerou-se o talude com 10% de saturação. Desta forma, obteve-se um fator de segurança de 1,76 aproximadamente, classificando o setor do talude em questão como estável. A Figura 18 ilustra esse processo e no canto direito são fornecidas algumas informações.



Figura 18: Análise de estabilidade de ruptura em cunha para o setor 3 do Talude 1. Fonte: Autoria própria, 2019.

Uma análise possível de ser realizada é a de sensibilidade variando o fator de segurança pela porcentagem de saturação do maciço rochoso, como indicado na Figura 19. Até 47% de saturação do maciço rochoso, pode-se afirmar que ele está estável, pois seu fator de segurança chega a 1. Mas caso o nível de saturação aumente, o talude sofrerá ruptura em cunha.



Factor of Safety vs. Water Percent Filled

Figura 19: Variação do fator de segurança em relação à porcentagem de água presente no Talude 1, setor 3. Fonte: Autoria própria, 2019.

## 4.7.3 ANÁLISE DE TOMBAMENTO DE BLOCOS

A análise de tombamento de blocos foi realizada para quase todos os setores objetos de estudo. Um dos setores estudados neste tipo de análise foi o setor 2 do Talude 1. Em relação a sua seção superior, o fator de segurança foi de aproximadamente 1.19, levando-se em consideração um overall base inclination de 45°. Isto é ilustrado na Figura 20. O tamanho do talude é de 06 metros, o espaçamento considerado foi de 0,6 metros, o mergulho da junta foi de 64° e o peso específico da rocha foi de 0,026 MN/m<sup>3</sup> (pois era um gnaisse). O modelo de resistência ao cisalhamento foi o Barton-Bandis para ambas as juntas, além do JRC foi de 8, JCS foi de 250 MPa e o ângulo de atrito foi de 25°. Considerou-se o talude com 30% de saturação.



Figura 20: análise do fator de segurança para tombamento de blocos do setor 2 Talude 1. Fonte: Autoria própria, 2019.

A variável "overall base inclination" interfere bastante no fator de segurança do talude. O "overall base inclination" é uma variável em que não é possível medi-la em campo, pois se trata da base de formação de blocos ao longo do talude. De acordo com a Figura 21, é possível perceber que apenas existe tombamento de blocos para um intervalo de "overall base inclination" entre  $27^{\circ}$  e  $79^{\circ}$ .
Factor of Safety vs. Overall Base Inclination (°)



Figura 21: Variação do fator de segurança mediante variação do overall base inclination para o setor 2 do Talude 1. Fonte: Autoria própria, 2019.

Para o setor 3 do Talude 1, percebe-se que os valores de "overall base inclination" coincide com os do setor 2 deste mesmo talude para não haver tombamento de blocos. A Figura 22 ilustra isto. Para um "overall base inclination" de 50°, o fator de segurança obtido foi de aproximadamente 1,26.



Factor of Safety vs. Overall Base Inclination (°)

Figura 22: Relação entre fator de segurança e overall base inclination para o setor 3 do Talude 1. Fonte: Autoria própria, 2019.

Já para o Talude 2, os dados de entrada para encontrar o fator de segurança na análise de tombamento de blocos consistem em um ângulo do talude de 89° (apesar de no campo ser de 90°, o programa não aceitou este valor, então colocou-se o valor mais próximo), altura de 08 metros, espaçamento entre juntas de 0,8 metros, mergulho das juntas de 84° e peso específico

da rocha de 0,026 MN/m<sup>3</sup>. Em relação às tensões, o critério adotado foi o de Barton-Bandis, com JRC de 8 para ambas as juntas, JCS de 250 Mpa e ângulo de atrito de 35°. Com isto, há tombamento de blocos para intervalos de 17° a 86° aproximadamente, como indica a Figura 23. Além disso, para um "overall base inclination" de 50°, o fator de segurança se aproxima de 1,30, como indica a Figura 24.

Factor of Safety vs. Overall Base Inclination (°) actor Overall Base Inclination (\*)

Figura 23: Fator de segurança obtido versus overall base inclination para Talude 2. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 24: Fator de segurança para um talude de 8 metros com 30% de saturação para Talude 2. Fonte: Autoria própria, 2019.

## 4.7.4 PRINCÍPIOS DE ESTABILIZAÇÃO E OBRAS DE CONTENÇÃO APLICADOS

No caso do setor 2 do Talude 1, o uso de drenagem seria viável, afinal, o talude suporta apenas 25% de saturação sem ocorrer rupturas. Com o uso de drenos, o talude conseguiria suportar períodos mais chuvosos, por exemplo. Já no caso do setor do setor 3 do Talude 1, sugere-se realizar um retaludamento, alterando o ângulo de mergulho de 80° para 75°. Em todos os casos, o ideal também é utilizar telas de proteção para que os blocos que por ventura se desprenderem do talude não alcancem a rodovia, ocasionando acidentes. A Tabela 39 indica cada método de estabilização ou de contenção de blocos para os taludes analisados neste projeto, além de justificar também cada escolha.

Talude	Princípio de estabilização/ obra de contenção	Justificativa
1	Drenagem e retaludamento	Pela análise de sensibilidade realizada na etapa de análise de estabilidade, pode-se perceber que quanto menor é a saturação do Talude 1, maior é o fator de segurança dele. Como o Talude 1 indicou as maiores chances d e ruptura em cunha e planar dentre os taludes analisados, caso haja um retaludamento nele, a condição de possibilidade de ruptura pode desaparecer desde que o ângulo de mergulho da face do talude seja menor que o ângulo de mergulho da descontinuidade.
2	Drenagem e tela	De acordo com análises de sensibilidade realizadas para este talude, quanto menor a saturação dele, maior o fator de segurança. E como este talude foi o que demonstrou maior chance de tombamento de blocos, o uso de tela é importante para impedir que blocos, que porventura se desprendam do maciço, atinjam a rodovia.
3	Drenagem e uso de telas.	Diminuindo a quantidade de água no talude, o fator de segurança aumenta. Por isso é importante se realizar a drenagem nele. Como não foram coletados dados de descontinuidades nele, não se pode afirmar se seria bom um retaludamento, pois o ângulo de mergulho das descontinuidades já pode ser maior que o ângulo de mergulho da face do talude. O uso de tela seria indicado para conter material de qualquer tipo de ruptura que vá em direção à rodovia.

Tabela 39: Princípios de estabilização e métodos de contenção de blocos dos Taludes 1, 2 e 3.

Fonte: Autoria própria, 2019.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando-se que um dos objetivos de se realizar uma análise de estabilidade é prever um possível tipo de ruptura no talude analisado, assim como propor métodos de estabilização e contenção de material em casos de ruptura, evitando acidentes e transtornos na rodovia, pode-se afirmar que este presente trabalho conseguiu atingir a finalidade em que se propôs.

Conclui-se que, estando em campo, deve-se atentar para a condição do maciço rochoso. Ou seja, se em um mesmo talude existirem diferentes níveis de alteração ou grau de fraturamento, o indicado é dividi-lo em setores. Em taludes que apresentam estas características de maneira semelhante, a setorização não se faz necessária, como é o caso do Talude 2.

Diversos estudiosos elaboraram vários sistemas de classificação de maciços rochosos. Cada um desses sistemas foi criado para uma aplicação diferente, como por exemplo, túneis, escavações subterrâneas, dentre outros. Por isto, conclui-se que é indicado escolher o tipo mais adequado de classificação do maciço rochoso, comparando o resultado com o resultado de outras classificações também. Neste trabalho foram escolhidos o GSI, o RMR e o Q de Barton e todos os resultados destes tipos de classificação de maciços rochosos foram condizentes um com o outro.

As classes de RMR no Talude 1, para os setores 2 e 3, variam de I a III. Já para o setor 1 do Talude 1, o RMR varia entre as classes II e III. Para o talude 2, o RMR variou entre as classes I a II. Para o Talude 3, no setor 1, o RMR variou entre as classes II e III. No setor 2 do Talude 3, as classes de RMR variaram entre II e III. No setor 3 do Talude 3, o RMR se encontrou apenas na classe II. Os valores de Q de Barton foram de classe IV para Talude 1 e 3 e classe III para Talude 2. Os valores de GSI do Talude 1 foram 45 para o setor 1, 65 para o setor 2 e 60 para o setor 3. Para o Talude 2 foi de 65. Já para o Talude 3, os GSI obtidos foram de 55 para o setor 1, 60 para o setor 2 e 70 para o setor 3.

O setor 1 do Talude 1 foi o que mais apresentou chances de ruptura planar, enquanto que o setor 2 deste mesmo talude foi o que mais apresentou chances de ruptura em cunha. O Talude 2 apresentou maiores chances de tombamento de blocos direto. Entretanto, considerando-se na análise de estabilidade um nível de saturação de 30%, pode-se perceber que todos os taludes se

apresentam estáveis. O fator de segurança para ruptura planar do setor 2 do Talude 1 foi de 1,24; enquanto que para ruptura em cunha do setor 3 do Talude 1 foi de 1,76.

Realizando-se as análises de sensibilidade e as interpretando, conclui-se também que os métodos de estabilização de taludes e contenção de material em casos de ruptura escolhidos em cada caso foram: drenagem e retaludamento para o Talude 1 e drenagem e tela para os Taludes 2 e 3.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA F. F. M. 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Boletim 241. DNPM – Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, Boletim, nº 241, 36 p.

ALMEIDA F.F.M., HASUI Y., BRITO NEVES B.B., FUCK R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. Earth Science Reviews, 17(1-2):1-21. doi: 10.1016/0012-8252(81)90003-9

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

BARTON, N. R. & CHOUBEY, V. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, vol 10, n. 1-2, 1977, pp 1-54.

BARTON, N.; BANDIS, S.; BAKHTAR, K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. **Int. J. Rock Mech, Min. Sci.**, v.3, p. 121-140, 1985.

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

BARTON, NICK & LIEN, R. & LUNDE, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. 6. 189-236. 10.1007/BF01239496.

BIENIAWSKI Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering". John Wiley & Sons, New York, 251. pp, 1989.

BIENIAWSKI, Z. T. (1978). Determining Rock Mass Deformability, Experience from Case Histories. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomech. Abstr., Pergamon, 15, pp. 237-247.

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

BIENIAWSKI, Z.T. (1976) Rock Mass Classification in Rock Engineering. In: Bieniawski, Z.T., Ed., Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, 97-106.

BRAJA M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. DEERE, D. U. AND DEERE, D. W. The rock quality designation (RQD) index in practice.

**Rock classification systems for engineering purposes**, Ed. L. Kirkaldie, ASTM Special. 1988.

DEERE, D. U., HENDRON, A. J., PATTON, F. D. AND CORDING, E. J. Design of surface and near surface construction in rock. In Failure and breakage of rock, proc. 8<sup>th</sup> U.S.

symp. Rock mech., 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs. 1967.

FERREIRA, M. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos Janbu e Spencer. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto: 2012. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf.

GERSCOVICH, Denise. M. S. Estabilidade de taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

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

Tese (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Mineral. Universidade de São Paulo, 2011.

GOODMAN, R. E., Introduction to Rock Mechanics. New York, Willey, 1989, 562 p.

GOOGLE EARTH. Disponível em:< <u>https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/</u>>. Acesso em: 12/10/2019.

GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. **Phil. Trans. R.Soc,** v. 221, p. 163-198. [s.d.]

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

HOEK, E., AND BRAY, J.W. 1981. Rock slope engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, Cambridge, London,

HOEK, E.; BROWN, E. T. Underground excavations in rock. London: Institution of Minning and Metallurgy, 1981. 527 p.

HOEK, E.; BROWN, E.t.. **Practical estimates of rock mass strength.** International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences, [s.l.], v. 34, n. 8, p.1165-1186, dez. 1997.

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

HUDSON, J. A. & HARRISON J. P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Elsevier Science Ltd Oxford, UK, 1997.

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

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. Fundamentals of rock mechanics. 3. ed. London: Chapman & Hall, 1979. 593p.

JAQUES, D. S. Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de volta grande, nazareno, minas gerais. 2014. Tese (MagisterScientiae) – 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: 20/05/2019.

MAIA. Sobre o uso do GSI na avaliação do efeito da variabilidade do maciço no dimensionamento de túneis. 2011 Tese (Mestrado) – Especialização em Geotecnia, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2011. Disponível em:< https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62040/1/000149350.pdf>. Acesso em: 20/05/2019

MIRANDA, T<sup>†</sup>., SOUSA, L. R. e. **Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Formações Rochosas e Maciços Heterogéneos.** 2011. Disponível em:< http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6314/1/n\_25\_pag\_17-40.pdf>. Acesso em: 20/05/2019.

OLIVEIRA; BRITO. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. 586 p.

PALMSTROM (1996). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnels and Underground Space Technology.

PALMSTRÖM A. SINGH R. The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunneling Underground Space Technol 2001; vol.16, 2001, pp.115-131.

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

ROCSCIENCE. Dips. Versão 7.016. [S.*l*.]: Rocscience, 2019. Disponível em:< https://www.rocscience.com/software/dips/program-updates>. Acesso em: 15/10/2019.

ROCSCIENCE. RocPlane. Versão 4.001. [S.*l*.]: Rocscience, 2019. Disponível em:< https://www.rocscience.com/software/rocplane/program-updates>. Acesso em: 15/10/2019.

ROCSCIENCE. RocTopple. Versão 2.001. [S.*l*.]: Rocscience, 2019. Disponível em:< http://downloads.rocscience.com/roctopple/rt2001n14s.zip>. Acesso em: 15/10/2019.

ROCSCIENCE. Swedge. Versão 7.001. [S.*l*.]: Rocscience, 2019. Disponível em:< http://downloads.rocscience.com/swedge/sw7002n26s.zip>. Acesso em: 15/10/2019.

ROMANO. Geologia da Folha Pará de Minas SE. 23 -Z -C -IV. Disponível em:<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/10765/nota.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>. Acesso em: 15/11/19.

SANTOS, T. B. Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos. 2015. Teses (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

SINGH; GOEL. **Rock Mass Classification:** a practical approach in civil engineering. Oxford, UK: Elsevier Science Ltda,1999. 267 p.

TERZAGHI, K. Introduction to tunnel geology. In Rock tunnelling with steel supports, by Proctor and White, 1946, pp 5-153.

## **APÊNDICE – ANÁLISES CINEMÁTICAS**



Figura 25: Projeção das famílias de descontinuidades e da face do Talude 2. Fonte: Autoria própria,2019.



Figura 26: Análise cinemática de ruptura planar para Talude 2 quando este se encontra saturado de água. Fonte: Autoria própria,2019.



Figura 27: Análise cinemática de ruptura em cunha para o Talude 2.

Fonte: Autoria própria,2019.



Figura 27: Análise cinemática para tombamento de blocos do Talude 2. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 28: Análise cinemática de ruptura planar para Talude 1, no setor 3, na porção superior, quando este está sem presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 29: Análise cinemática de ruptura em cunha para Talude 1 (setor 3 - superior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 30: Análise cinemática de tombamento de blocos para Talude 1 (setor 3 - superior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 32: Projeção das famílias de descontinuidades do setor 3 do Talude 1 e direção da face do mesmo talude. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 33: Análise cinemática de ruptura planar para Talude 1 (setor 03 - superior) quando este se encontra completamente saturado de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 34: Análise cinemática para ruptura em cunha do Talude 1 (setor 3 - superior) quando este se encontra saturado de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 35: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 3 - inferior) saturado com água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 36: Análise de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 3 - inferior) quando este se encontra saturado com água Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 37: Análise de tombamento de blocos para Talude 1 (setor 3 inferior) quando este se encontra saturado de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 38: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 3 inferior) quando este se encontra sem presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 39: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 3 inferior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 40: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 3 inferior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 41: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 1 superior) quando este se encontra completamente saturado com água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 31: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 1 superior) quando este se encontra completamente saturado com água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 32: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 1 superior ) quando este se encontra saturado com água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 33: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 1 inferior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 34: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 1 inferior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 35: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 1 inferior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 36: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 2 (superior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 37: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 2 (superior) quando este se encontra sem a presença de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 38: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 2 (superior) quando este se encontra seco Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 39: Análise cinemática de tombamento de blocos do Talude 1 (setor 2 superior) quando este se encontra saturado de água.

Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 40: Análise cinemática de ruptura em cunha do Talude 1 (setor 2 superior) quando este se encontra saturado de água. Fonte: Autoria própria, 2019.



Figura 41: Análise cinemática de ruptura planar do Talude 1 (setor 2 superior) quando este se encontra saturado com água.

Fonte: Autoria própria, 2019.