CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE DA SANTA HELENA MINERAÇÃO LTDA.

AUTOR: LUÍS FERNANDO DE LIMA WOLPP

ARAXÁ/MG

2018

LUÍS FERNANDO DE LIMA WOLPP

CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE DA SANTA HELENA MINERAÇÃO LTDA.

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 de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. M.e Guilherme Alzamora Mendonça

Araxá/Mg

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUÍS FERNANDO DE LIMA WOLPP

CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE DA SANTA HELENA MINERAÇÃO LTDA.

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.

Araxá, 29 de Junho de 2018.

Presidente e Orientador: Me. Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Membro Titular: Dr. Hildor José Seer
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Membro Titular: Me. Allan Erlikhman Medeiros Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Dedico este trabalho á minha família e aos meus amigos que me ajudaram e apoiaram na conclusão do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e por me manter focado em meus objetivos.

Agradeço á minha família, em especial meus pais, Leonel e Luz Eterna, e também ao meu irmão, Pedro, por me fornecerem apoio e propiciar tudo que vivo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Guilherme Alzamora pelo auxílio e paciência na realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Hildor Seer pela ajuda no trabalho de campo, sendo fundamental com todo seu conhecimento, e por compartilhá-lo.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio.

Agradeço a empresa Santa Helena Mineração Ltda. por abrir as portas para a confecção deste trabalho e pela receptividade, em especial ao Engenheiro Daniel Resende.

RESUMO

A investigação de campo para reconhecimento estrutural e geomecânico das rochas é imprescindível para qualquer projeto que envolva a construção de estruturas sobre a rocha ou maciço rochoso. Trata-se de uma série de etapas que englobam reconhecimento inicial e acompanhamento durante o projeto. Uma distinção de características do maciço rochoso irá determinar seu comportamento e tornar possível a análise de sua estabilidade. Além disso, os parâmetros de resistência da rocha também podem ser determinados, a partir desses dados. Métodos de classificação como o RQD, RMR, Q são utilizados neste trabalho como ferramenta de verificação de qualidade do maciço rochoso. Com isso, o estudo a ser realizado visa a coleta de dados em campo (informações sobre as rochas constituintes do maciço e das descontinuidades presentes) para caracterização e classificação do maciço rochoso da empresa Santa Helena Mineração LTDA. e, consecutivamente, efetuar a análise destas informações para determinação de suas propriedades geomecânicas - por meio de métodos analíticos. Assim, espera-se com esses resultados auxiliar as operações de lavra da empresa. Segundo o estudo, o maciço rochoso é formado por um granito deformado e ao todo foram determinadas 3 famílias de descontinuidades para o talude analisado. Quanto a qualidade do talude, o mesmo foi classificado como regular para todos os sistemas de classificações empregados.

Palavras-chaves: classificação geomecânica, maciço rochoso, talude.

ABSTRACT

A field investigation to structural and geomechanical recognition of rocks is indispensable for any project that involving building of structures over rock or rock mass. This is a serie of phases that includes the early recognition and follow up during all the project. A distinction of characteristics of the rock mass will define his behavior and will become possible to realize the stability analysis. Moreover, the rock strength parameters also can be determined. The rock mass classification schemes as RQD, RMR and Q are used in this research like tool of verification of the rock mass quality. Therefore, the study to be carried out is aimed in the field data collecting (information about the rock mass constituent and the present of discontinuities) for rock mass characterization of Santa Helena Mineração Ltda., and, consecutively, realize the analysis of this information to determine his geomechanical properties. So, we'll expected that this results help the company's mining operation. According to the study, the rock mass is formed by a deformed granite and in the whole have been determined 3 families of discontinuities to the slope. As for slope quality, it was classified as regular for all classification schemes employed.

Keywords: geomechanical classification, rock mass and slope.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama ilustrando o efeito escala..... 4
Figura 2 – Características das descontinuidades passíveis de observação. 5
Figura 3 - Diferentes descontinuidades formando blocos de rocha (Fonte: GEOLOGIA DE ENGENHARIA). 6
Figura 4 - Cálculo do RQD. 11
Figura 5 - Ábaco para obtenção dos valores de GSI. 20
Figura 6 - Localização da Santa Helena Mineração. 24
Figura 7 - Equipamentos utilizados: trena (A); smartphone, chapa e escalimetro (B) e martelo de geólogo (C)..... 26
Figura 8 - Teste do martelo de geólogo. 26
Figura 9 - Parte da tabela de dados de campo. 27
Figura 10 - Rocha formadora do maciço, Granito deformado. 28
Figura 11 - Diagrama de densidade das descontinuidades do TLD-01. 30
Figura 12- Blocos formados pelas descontinuidades. 32
Figura 13 - Classificação geomecânica pelo sistema GSI. 37
Figura 14 - Parâmetros inseridos no RocData. 38
Figura 15 - Envoltórias de resistência: (a) tensão principal menor x tensão principal maior e (b) tensão de cisalhamento x tensão normal 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição do espaçamento das descontinuidades. 7
Tabela 2 - Descrição da persistência. 7
Tabela 3 - Descrição das aberturas. 8
Tabela 4 - Grau de fraturamento. 8
Tabela 5 - Classes de classificação de qualidade do maciço rochoso a partir do RQD. 11
Tabela 6 - Classificação de maciços rochosos segundo o sistema RMR. 14
Tabela 7 - Valores de **Jn** 16
Tabela 8 - Valores de **Ja** no sistema Q. 16
Tabela 9 - Valores de **Jr** no sistema Q. 17
Tabela 10 - Valores de **Jw** no sistema Q. 18
Tabela 11 - Valores de SRF no sistema Q. 18
Tabela 12 - Classificação do maciço no sistema Q. 19
Tabela 13 - Grau de resistência das rochas. 23
Tabela 14 - Orientação e espaçamento das descontinuidades. 29
Tabela 15 - Espaçamento médio das descontinuidades do TLD-01. 30
Tabela 16 - Atitudes médias das famílias de descontinuidades do TLD-01. 30
Tabela 17 - Condições das descontinuidades do TLD-01. 31
Tabela 18 - Teste do martelo de geólogo do TLD-01. 32
Tabela 19 - Resultado obtido pelo método RMR. 34
Tabela 20 - Valores utilizados para o cálculo de Q. 35
Tabela 21 - Critério de Mohr-Coulomb. 38

LISTA DE SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
CBMR	Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas
Cm	Centímetros
ISRM	International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering
GSI	*Geological Stress Index*
M	Metros
Mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
m^3	Metro cúbico
RMR	*Rock Mass Rating*
RQD	*Rock Quality Designation*
SRF	Estado de tensão do maciço
TLD	Talude
Q	Tunneling Quality Index

LISTA DE SÍMBOLOS

J_a	Grau de alteração das descontinuidades
J_n	Número de famílias de descontinuidades
J_r	Índice de rugosidade das descontinuidades
J_v	Índice volumétrico
J_w	Fator de redução de água
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor
σ_c	Resistência a compressão uniaxial
m_b	Constante de Hoek-Brown para maciço rochoso
S	Constante de Hoek-Brown
A	Constante de Hoek-Brown
m_i	Constante de Hoek-Brown para rocha intacta
D	Fator de perturbação do maciço rochoso
φ	Ângulo de atrito
σ_{3n}	Tensão principal menor máxima dividida pela resistência a compressão uniaxial
C	Coesão
$\sigma_{3máx}$	Tensão máxima da tensão principal menor
H	Altura do talude
γ	Peso específico

SUMÁRIO

1. Introdução 1
2. Revisão bibliográfica 3
   2.1. Maciço rochoso 3
   2.2. Descontinuidades 5
   2.3. Sistemas de classificação 9
   2.4. Critérios de resistência 20
   2.5. Teste do martelo de geólogo 22
3. Metodologia 24
   1.1. Levantamento geológico-geotécnico 25
   1.2. Tratamento dos dados 26
4. Resultados e Discussões 28
   4.1. Caracterização geológica-geotécnica 28
   4.2. Ensaio de resistência com o martelo de geólogo 32
   4.3. Classificação geomecânica 33
      4.3.1. RQD 33
      4.3.2. RMR 34
      4.3.3. Q 35
      4.3.4. GSI 36
   4.4. Critério de resistência 37
5. Conclusão 41
6. Referências bibliográficas 42

Apêndice 1 – Tabelas e dados de campo 44

Anexo 1 – Complemento das condições das descontinuidades para o RMR. 47

Anexo 2 – Tabelas para o cálculo das constantes de Hoek-Brown 48

1. Introdução

Uma investigação de campo para reconhecimento estrutural e geomecânico das rochas que receberão obras de engenharia é de fundamental importância para todo projeto que envolve a construção de taludes e escavações. Essa investigação é um dos principais assuntos que integram a Engenharia Geotécnica. Trata-se de uma série de etapas que englobam o reconhecimento inicial e deve prosseguir e acompanhar toda a execução do projeto. Isso irá possibilitar um aprimoramento dos métodos, o redimensionamento de estruturas, quando necessário, e a adoção de soluções que convenham para a obra em geral.

Na mineração, em que na maioria das vezes são compreendidos projetos de grande porte, que lidam com maciços rochosos, e com custeio muito oneroso, a investigação de viabilidade técnico-econômica para extração segura e rentável do minério é necessária. A caracterização e classificação do maciço rochoso determinará o caminho a ser seguido no planejamento dos cortes, de forma a garantir a segurança dos trabalhos. O maciço rochoso é aquele que inclui além da rocha intacta, as descontinuidades, blocos, água e estado de tensões (JAQUES, 2014).

A classificação do maciço irá proporcionar a determinação de sua composição, de sua estrutura e a previsão do seu comportamento geral em relação à implantação do projeto e dos esforços mecânicos solicitados pelo mesmo. Porém, a classificação por si só é apenas uma ferramenta para auxiliar na solução dos problemas. Trata-se de um instrumento capaz de servir como uma base de dados para posteriores estudos mais aprofundados, ou seja, constitui a etapa inicial de conhecimento do maciço rochoso.

Um fato considerável e muito aceito pelos profissionais da área é que o conhecimento das propriedades geotécnicas do maciço é mais importante do que o conhecimento das propriedades da rocha intacta. Isso deve-se ao fato da escala em que a grande maioria dos problemas se dá, ou seja, a quantidade de elementos que a obra incorpora.

O emprego do método correto de classificação e caracterização aplicado a cada caso, adicionalmente a uma boa execução, são condições imprescindíveis para a qualidade do produto final, seja ele um talude ou mesmo um túnel.

Como a segurança e a viabilidade econômica deve ser levada em consideração em todo projeto mineiro, desde os pequenos até aqueles maiores, toda e qualquer mina deve fazer uso da caracterização e classificação de seu maciço rochoso, visando uma otimização de seu aproveitamento. Estudar a qualidade do maciço ou mesmo dos taludes é imprescindível para o bom funcionamento da operação.

O objetivo deste trabalho é efetuar a caracterização e classificação geomecânica – segundo os sistemas RQD, RMR, Q e GSI - do maciço rochoso constituinte de um talude, visando o estudo do seu comportamento. E também a determinação de seus parâmetros de resistência pelos critérios de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb.

Dessa forma, acredita-se que o estudo geotécnico do maciço rochoso pertencente à empresa Santa Helena Mineração Ltda. abordado aqui, possibilitará ao empreendimento um melhor entendimento da situação vivenciada na mineradora, auxiliando nas tomadas de decisão operacionais.

Os próximos tópicos desse trabalho compreendem o referencial bibliográfico, no qual serão apresentados definições acerca de maciço rochoso, descontinuidades e fundamentos dos sistemas de classificação e critérios de resistência. Em seguida, será exibida a metodologia empregada na pesquisa, descrevendo como as etapas de trabalho de campo e tratamento dos dados foram desenvolvidas. Adiante, encontram-se os resultados obtidos para a caracterização e classificação geomecânica, bem como as considerações acerca deles. E por fim, serão expostas as conclusões alcançadas ao longo do estudo.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Maciço rochoso

Em obras de engenharia em que há problemas abrangendo rochas, é de fundamental importância saber a diferença entre rocha e maciço rochoso. A distinção entre ambos irá ajudar no entendimento e planejamento do projeto (JAQUES, 2014).

Rocha é entendida como sendo um corpo sólido e natural formado por um conjunto de grãos de um ou mais minerais que resultaram de processos geológicos sob determinadas condições de temperatura e pressão (MESQUITA, 2008).

Para Vallejo (2002), as rochas podem ser definidas como um agregado natural de partículas minerais, que possuem elevada união coesiva e permanente, que constituem uma massa geológica num sistema contínuo. Rocha também pode ser compreendida como materiais sólidos consolidados que compõem o maciço rochoso, sendo formada por um conjunto de minerais em grande massa ou fragmentos (AZEVEDO & MARQUES, 2002).

Por outro lado, o maciço rochoso é definido por Mesquita (2008) como um conjunto de blocos de rocha intacta, ou mesmo apenas rocha intacta, e planos de fraqueza que os delimitam, ou seja, as descontinuidades. Vallejo (2002) define maciço rochoso como toda massa rochosa que está afetada por planos de descontinuidades e que separam os blocos da matriz rochosa.

De maneira mais completa, o maciço rochoso é um meio sólido descontínuo formado essencialmente pela rocha intacta e descontinuidades que as cortam, e que compreendem a água e estado de tensões presente no local. Esses planos de fraquezas (descontinuidades) podem, tipicamente, se apresentar nas mais diversas escalas, seja em centímetros ou dezenas de metros (AZEVEDO & MARQUES, 2002).

A Figura 1 ilustra o efeito escala, que demonstra como o tamanho de um bloco ou da região afetada pela obra influencia em seu comportamento.

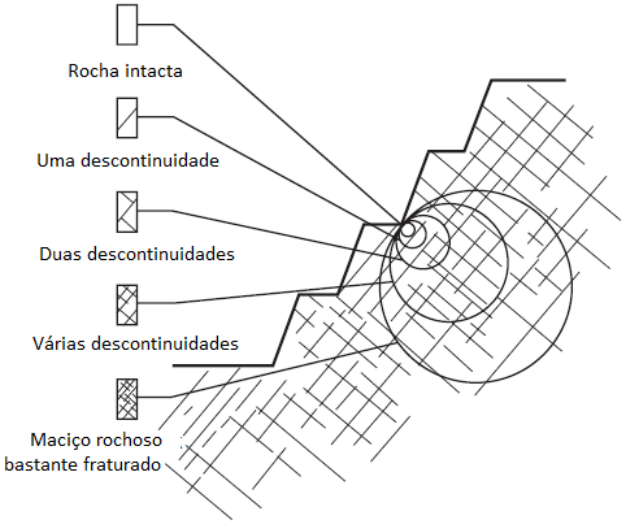


Figura 1 - Diagrama ilustrando o efeito escala.

Fonte: Adaptado de Hoek (2002).

Além do conhecimento das características da matriz formadora do maciço rochoso, o conhecimento das descontinuidades presentes é de fundamental importância, pelo fato de serem as estruturas de menor resistência e onde provavelmente haverá ruptura ao receber os esforços da obra (SANTOS, 2015). Essas estruturas consistem no principal fator responsável pela perda de resistência do maciço rochoso.

As descontinuidades se referem a qualquer estrutura geológica que corte a continuidade física de um corpo. Podem ser falhas, juntas e outros (SILVA, 2013).

Diante disso, a ISRM (2007) propôs algumas características das descontinuidades que afetam o comportamento geotécnico dos maciços rochosos, são elas: orientação, espaçamento, rugosidade, persistência, preenchimento, abertura e infiltração ou percolação de água (Figura 2).

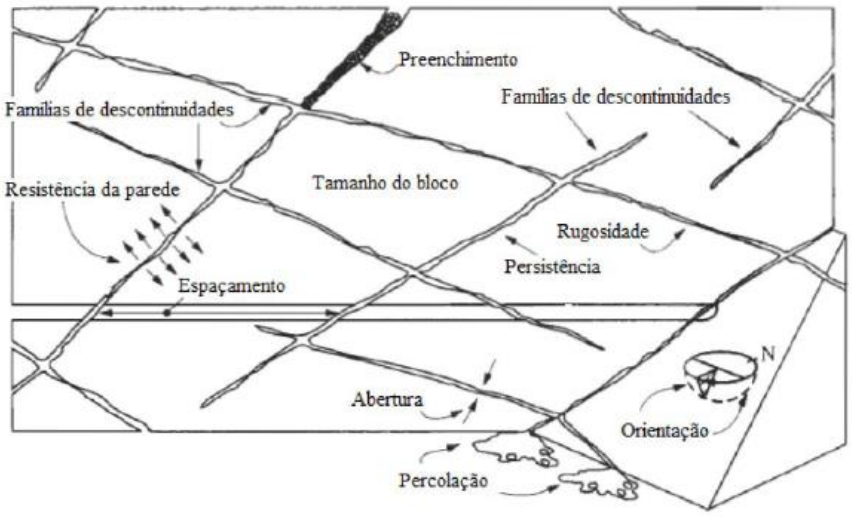


Figura 2 – Características das descontinuidades passíveis de observação.

Fonte: Adaptado de ISRM (2007).

Como a maioria dos projetos envolvem maciços rochosos, o conhecimento das propriedades geotécnicas do mesmo é fundamental para o sucesso da intervenção. Assim sendo, muitas das classificações utilizadas atualmente permitem a estimativa destas propriedades e sua principal preocupação é a análise de estabilidade dos maciços, tendo em vista o dimensionamento de escavações e cortes de estrada ou mineração (ÁVILA, 2012).

2.2. Descontinuidades

Dentre as características presentes no maciço rochoso, seja ela, matriz formadora ou grau de alteração, as descontinuidades talvez sejam a principal peculiaridade por estarem ligadas diretamente à resistência e comportamento geomecânico do mesmo, que irá interferir na estabilidade da obra. Grande parte das rupturas ocorrem ao longo desses planos de fraqueza (JAQUES, 2014).

De acordo com a ISRM (1978) a maioria dos maciços rochosos, em particular aqueles que se encontram a algumas centenas de metros da superfície, se comportam de maneira descontínua e são em grande parte determinantes no comportamento mecânico

do maciço, muitas vezes condicionando o seu modo de ruptura. A Figura 3 apresenta um maciço fraturado com uma construção acima.

O termo descontinuidade se refere a qualquer essência geológica que intercepte a continuidade física de um dado corpo, como juntas, falhas entre outros. É um termo geral utilizado para qualquer descontinuidade que possui nenhuma ou baixa resistência à tração dentro do maciço (SILVA, 2013).

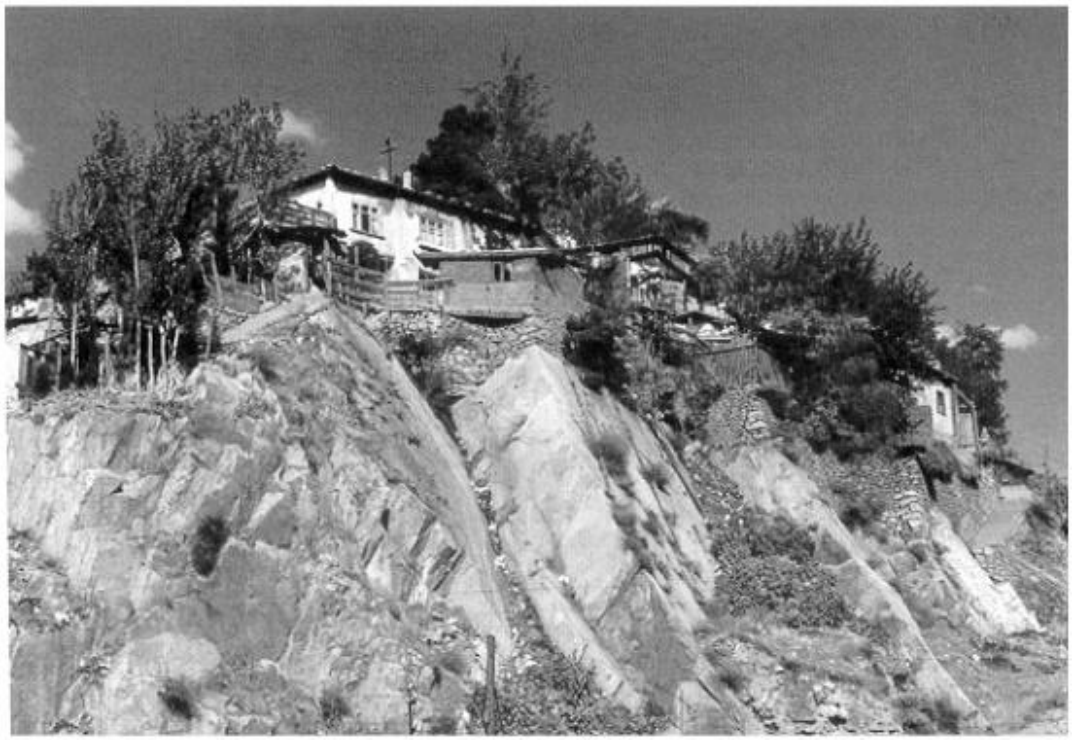


Figura 3 - Diferentes descontinuidades formando blocos de rocha.

Fonte: GEOLOGIA DE ENGENHARIA.

Devido à sua influência sobre o maciço rochoso, uma caracterização para o conhecimento das descontinuidades presentes no maciço é bastante recomendada em obras de engenharia. Para padronizar e facilitar no processo de levantamento das descontinuidades a ISRM (1978) sistematizou alguns parâmetros para descrição das descontinuidades. São eles:

- atitude: é a orientação da descontinuidade no espaço em função da direção do mergulho e do mergulho do plano de fraqueza;

- espaçamento: é a distância entre duas descontinuidades adjacentes e pertencentes à mesma família (Tabela 1);

Tabela 1 - Descrição do espaçamento das descontinuidades.

Descrição	Espaçamento (mm)
Extremamente próximos	< 20
Muito próximos	20 – 60
Próximas	60-200
Moderadamente espaçadas	200-600
Muito espaçadas	600-6000
Extremamente espaçados	> 6000

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

- persistência: se refere ao comprimento do traço da descontinuidade no plano assim como é observada em campo (Tabela 2);

Tabela 2 - Descrição da persistência.

Descrição	Persistência (m)
Muito baixa	< 1
Baixa	1- 3
Média	3 -10
Alta	10- 20
Muito alta	> 20

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

- rugosidade: está relacionada às irregularidades de relevo presentes nos planos das descontinuidades (ondulações). A rugosidade influencia na resistência ao cisalhamento;

- resistência das paredes: é a resistência à compressão das paredes das descontinuidades e, normalmente, é menor que a resistência da rocha sã devido às alterações das paredes;

- abertura: é a distância perpendicular entre duas paredes paralelas de determinada descontinuidade que pode ser preenchida por água ou ar (Tabela 3);

Tabela 3 - Descrição das aberturas.

Descrição	Abertura
Muito fechadas	< 0,1 mm
Fechadas	0,1– 0,25 mm
Parcialmente abertas	0,25 – 0,5 mm
Abertas	0,5– 2,5 mm
Cavernosas	> 1 m

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

- preenchimento: é aquele material que está presente entre as paredes da descontinuidade e que usualmente é mais fraco que sua rocha originária, pode ser areia, silte, etc.;

- percolação: presença do fluxo de água ou de umidade pela descontinuidade ou no maciço todo;

- número de famílias: é quantidade de famílias que forma o conjunto de descontinuidades (uma família é um conjunto de descontinuidades com a mesma atitude e gênese). Pode haver descontinuidades isoladas também;

- grau de fraturamento: expressa a quantidade de descontinuidades presentes por metro linear de maciço rochoso (Tabela 4).

Tabela 4 - Grau de fraturamento.

Siglas	Número de fraturas por metro	Denominação
F1	<1	Ocasionalmente fraturado
F2	1 – 5	Pouco fraturado
F3	6 – 10	Mediamente fraturado

F4	11 – 20	Muito fraturado
F5	> 20	Extremamente fraturado

Fonte: Guidicini *et al*. 1972 apud Silva (2013).

- amplitude: é a medida da profundidade da cavidade gerada pelas ondulações da face da descontinuidade em contato com uma superfície plana.

2.3. Sistemas de classificação

Para que sejam tomadas decisões corretas, seguras e viáveis economicamente a respeito de qualquer projeto de escavações na mineração, é fundamental o conhecimento das características geomecânicas do corpo de minério e também das rochas encaixantes. As classificações geomecânicas são métodos importantes e válidos para estas avaliações desde a fase inicial do projeto mineiro, pelo fato de ser uma maneira simples e não onerosa de prever o comportamento do maciço rochoso quando solicitado (FABRÍCIO, 2015).

Os sistemas de classificações têm sido desenvolvidos por mais de 100 anos desde Ritter (1879) na tentativa de indicar um critério empírico acerca do desenvolvimento de túneis. O entendimento de suas limitações e que o seu uso não substitui os procedimentos de design é importante. Entretanto, esses procedimentos necessitam de muitos detalhes que nos estágios iniciais do projeto não são conhecidos. Por isso, o uso das classificações se faz relevante e, à medida que as informações vão se tornando disponíveis, devem ser atualizadas em conjunto com as análises específicas do local.

Estas ferramentas são usadas para caracterizar os maciços rochosos com base em observações de campo, em ensaios in situ ou em amostras coletadas. Por fim, o resultado é uma sistematização dos elementos geotécnicos em classes que segue determinado critério comportamental. As classificações não são a última solução para os problemas geotécnicos, mas sim o caminho para o fim deles (BIENIAWSKI, 1989).

A caracterização geomecânica de maciços rochosos pode ser entendida como o ato de se categorizar as características do maciço, organizando-as em grupos ou classes que consideram os diferentes comportamentos do meio rochoso nas condições de solicitações consideradas (MESQUITA, 2008).

Segundo Bieniawski (1989) os objetivos da classificação do maciço rochoso são:

- Identificar os principais parâmetros que influenciam o comportamento do maciço;
- Dividir o maciço rochoso em classes de comportamento parecido;
- Fornecer uma base para o entendimento de cada classe;
- Relacionar a experiência de condições da rocha de um local com experiências de outros locais;
- Obter dados quantitativos e linha de orientação para o projeto de engenharia e;
- Fornecer uma base de comunicação comum entre as pessoas envolvidas no projeto (engenheiros e geólogos).

Uma das primeiras referências a respeito do uso de classificações geomecânicas de maciços rochosos foi feita por Terzaghi (1946). Seu método pode ser denominado como "*Rock Load Classification*" no qual o carregamento de rocha, em túneis, suportada por suportes de aço era estimado através de uma classificação descritiva. A necessidade de aplicação em situações que não envolvessem construção de túneis fez com que se desse maior atenção ao desenvolvimento de mais métodos de classificação. Assim, um grande número de sistemas de classificação partem do método proposto por Terzaghi (FABRÍCIO, 2015).

Possivelmente os sistemas de classificação mais difundidos e conhecidos, atualmente, são o RMR (*Rock Mass Rating*) elaborado por Bieniawski (1973) e o sistema Q (*Tunneling Quality Index*) proposto por Barton *et al.* (1974). Além desses, algumas outras metodologias também costumam ser utilizadas, como o RQD (*Rock Quality Designation*) proposto por Deere (1963), e o GSI (*Geological Stress Index*) idealizado por Hoek *et al.* 1994 (HOEK, 2000).

O RQD foi o primeiro índice quantitativo proposto por Deere (19630 para descrever a qualidade do maciço rochoso. O objetivo era quantificar a qualidade das rochas obtidas nos testemunhos de sondagens. Trata-se de uma medida indireta das descontinuidades. Este método fundamenta-se na porcentagem de recuperação, levando em consideração apenas partes do testemunho que tenham mais que 10 cm de comprimento. O somatório dessas partes dividido pelo tamanho total é o resultado do RQD (MESQUITA, 2008). Seu cálculo é dado segundo a equação 1.

$$RQD = \frac{\Sigma\ porções\ de\ rocha\ com\ mais\ de\ 10\ cm}{comprimento\ total\ do\ testemunho} x100 \qquad \text{Equação 1}$$

A classificação estabelecida por Deere é dada pela Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Classes de classificação de qualidade do maciço rochoso a partir do RQD.

Classe	Qualidade da rocha	RQD (%)
I	Muito ruim	< 25
II	Ruim	25 – 50
III	Regular	50 – 75
IV	Bom	75 – 90
V	Excelente	90 – 100

Fonte: Adaptado de Deere (1989).

O valor obtido pela equação acima é dependente da orientação e comprimento do testemunho de sondagem, e por esse motivo algumas variações podem ser encontradas. Apesar disso, devido a sua simplicidade acaba por se tornar prático em muitos casos. A Figura 4 ilustra um esquema prático de como calcular.

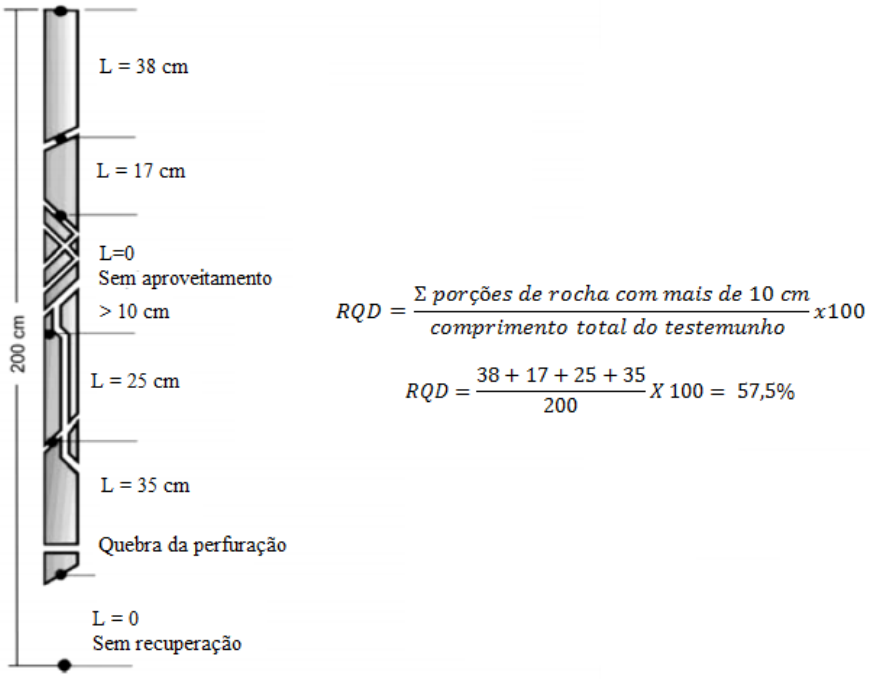


Figura 4 - Cálculo do RQD.

Fonte: Adaptado de Hoek (2000).

Em situações que não existem sondagens disponíveis, o método não deixa de ser aplicável. Outros autores trabalharam em elaborar formas diferentes para determinação do RQD. Um desses autores foi Palmström (1982), ele sugeriu estimar o valor de qualidade da rocha por meio do número de descontinuidades por unidade de volume. Para sua execução é necessário que as descontinuidades estejam em superfícies de afloramentos de maneira visível e passível de mapeamento (HOEK, 2000). A equação 2 é a proposta por Palmström.

$$RQD = 115 - 3{,}3J_v \qquad \text{Equação 2}$$

Onde J_v é o parâmetro que se refere ao índice volumétrico (número de descontinuidades por unidade de comprimento num volume de 1 m³).

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} \qquad \text{Equação 3}$$

S_i é o espaçamento médio da família em metros.

Como dito anteriormente, o RQD é dependente da direção e diferentes orientações de sondagem resultarão em resultados distintos. O uso do J_v se torna uma vantagem pela redução dos problemas relacionados à direção (HOEK, 2000). Além disso, o RQD não é muito eficiente para maciços pouco fraturados. Quando se tem fraturas espaçadas de 15 cm ou 1 metro, o sistema trata os maciços de forma igual.

Posteriormente a Deere (1963), Bieniawski (1974) elaborou um novo sistema de classificação que além de ser aplicável para túneis também poderia ser utilizado para taludes. Sua construção foi baseada em casos históricos da engenharia e foi sendo refinado à medida que resultados positivos foram obtidos em novos casos e por mais que tenham ocorrido mudanças, a essência do método é a mesma (SILVA, 2013).

O sistema de classificação é conhecido como "*Rock Mass Rating*" ou RMR. Sua abordagem é simples e mais completa devido à quantidade de parâmetros que são considerados, produzindo resultados mais confiáveis. Segundo Bieniawski (1989) ao todo são seis parâmetros que podem ser vistos abaixo:

- Resistência a compressão uniaxial da rocha;
- RQD;
- Espaçamento entre as descontinuidades;
- Condição das descontinuidades (alteração, rugosidade e preenchimento);
- Condição de percolação d'água e
- Orientação das descontinuidades.

Cada parâmetro citado acima irá corresponder a um peso referente aos fatores que de acordo com Bieniawski são os maiores determinantes para o comportamento do maciço rochoso. O resultado final é adimensional, sendo a orientação das descontinuidades um parâmetro de ajuste. Todos, à exceção da condição das descontinuidades, são atributos quantitativos e são encontrados a partir de levantamento geotécnico (SANTOS, 2015). A equação 4 ilustra como deve ser feito.

$$RMR = \Sigma(pesos\ atribuidos\ a\ cada\ parametro) + ajuste\ da\ orientação\ das\ descontinuidades \qquad \text{Equação 4}$$

Para a aplicação deste sistema o maciço rochoso é dividido em zonas para classificação separadamente. Normalmente os limites entre essas subdivisões são as estruturas geológicas principais, bem como falhas, diques, zonas de cisalhamento ou mudança no tipo de rocha. Ainda dentro dessas zonas, em regiões de mesma litologia, podem ocorrer casos que seja necessária uma nova subdivisão devido a mudanças significativas no espaçamento das descontinuidades ou características dessas (HOEK, 2000).

Após a divisão do maciço em setores, os parâmetros para cada região podem ser determinados pelas medições de campo. Na Tabela 6 os seis parâmetros estão agrupados em faixas de valores. O sexto e último parâmetro se refere ao ajuste da orientação das descontinuidades, sendo um fator qualitativo e não quantitativo como os demais. Os valores para o cálculo do RMR são extraídos dessa tabela. Ao final o maciço rochoso pode ser classificado segundo cinco classes de maciços. Cada classe possui conjunto de 20 valores, sendo que o RMR varia entre 0-100 (BIENIAWSKI, 1989).

Tabela 6 - Classificação de maciços rochosos segundo o sistema RMR.

Parâmetros			Valores						
1	Resistência da rocha intacta (Mpa)	Compressão puntiforme	> 10	4- 10	2- 4	1-2	Usar compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250	100-250	50-100	25- 50	5-25	1-5	< 1
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades (cm)		> 200	200 - 60	60 - 20	20 - 6	< 6		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não-contínua e sem separação, parede da rocha não alterada	Superfícies pouco rugosas, separação <1mm, parede da rocha pouco alterada	Superfícies pouco rugosas, separação <1mm, paredes da rocha muito alterada	Superfícies estriadas ou polida com enchimento <5mm ou separação de 1-5 mm(contínua)	Enchimento mole com espessura >5mm ou separação de 1-5mm (contínua)		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Influxo por 10m no comprimento do túnel (l/m)	Sem valor	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Pressão de água na junta/σ principal maior	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Com fluxo		
	Pesos		15	10	7	4	0		

6	Orientação da das descontinuidades e mergulho		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
	Pesos	Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12
		Fundações	0	-2	-7	-15	-25
		Taludes	0	-5	-25	-50	

Classificação do maciço rochoso					
Somatório	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Segundo Bieniawski (1989), o sistema Q ou "*Tunnelling Quality Index*" foi desenvolvido por Barton et al. (1974) e pode ser considerado a principal contribuição em relação a classificação de maciços rochosos pelo seguinte motivo: o sistema foi proposto com base na análise de 212 casos históricos de túneis na Escandinávia, é um sistema de classificação quantitativo e facilita a projeção de suportes para túneis.

Assim como o sistema RMR, o sistema Q também leva em consideração o RQD, porém diferentemente deste, não faz-se necessário a determinação de parâmetros como a resistência da rocha ou espaçamento das descontinuidades. O sistema Q baseia-se na avaliação do maciço rochoso por meio de seis parâmetros que estão agrupados em três quocientes multiplicados entre si e o resultado pode variar numa escala logarítmica de 0,001 a 1000, quanto mais alto for o valor encontrado, melhor será a qualidade do maciço. São eles:

- RQD;
- Número de famílias de descontinuidades (J_n);
- Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r);
- Grau de alteração das descontinuidades (J_a);
- Fator de redução de água (J_w) e
- Estado de tensão do maciço (SRF).

Dados os seis valores necessários para a classificação, estes podem ser lançados na equação 5.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} x \frac{J_w}{SRF} \qquad \text{Equação 5}$$

Os três quocientes observados acima podem ser entendidos da seguinte maneira:

- $\frac{RQD}{J_n}$: representa uma medida aproximada do tamanho do bloco;
- $\frac{J_r}{J_a}$: pode ser entendida como a resistência ao cisalhamento interblocos e
- $\frac{J_w}{SRF}$: fator relativo ao meio que incorpora poropressões e fluxo, descreve a tensão ativa no maciço.

A seguir serão expostas tabelas 7 a 11 , que descrevem os parâmetros utilizados no sistema Q.

Tabela 7 - Valores de J_n.

Condições de compartimentação do maciço	Valores de J_n
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: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 8 - Valores de J_a no sistema Q.

a-Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre paredes das fraturas	
Condição de alteração das paredes	**Valores de J_a**
A – Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto)	0,75
B – Paredes sem alteração, somente leve descoloração ($\varphi_r = 25 - 35°$)	1
C – Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não-argilosas ($\varphi_r = 25 - 35°$)	2
D – Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas ($\varphi_r = 20 - 35°$)	3
E – Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc.) e pequena quantidade de minerais expansivos ($\varphi_r = 8 - 16°$)	4

b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
F – Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila ($\varphi_r = 25 - 35°$)	4
G – Fraturas com preenchimento argiloso sobreconsolidado (espessura < 5 mm) ($\varphi_r = 16 - 24°$)	6
H – Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5mm) ($\varphi_r 12 - 16°$)	8
I – Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5 m) ($\varphi_r = 12 - 16°$)	8 – 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 e I para condições do material argiloso) ($\varphi_r = 6 - 24°$)	6 – 8 ou 8 – 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 e I para condições do material argiloso) ($\varphi_r = 6 - 24°$)	10 -13 ou 13 - 20

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 9 - Valores de J_r no sistema 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	
Condição de rugosidade das paredes	**Valores de J_r**
A – Fraturas não-persistentes	4
B – Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
C – Fraturas lisas, onduladas	2
D – Fraturas polidas, onduladas	1,5
E – Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
F – Fraturas lisas, planas	1
G – Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5
c- fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
H – Fraturas com minerais argilosos	1
I – Zonas esmagadas	1

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 10 - Valores de J_w no sistema Q.

Condição de afluência de água	Valores de J_w	Pressão de água (kg/cm²)
A – Escavação a seco ou com pequena afluência de água (< 5 l/m)	1,0	< 1
B – Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1,0 – 2,5
C – Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das juntas	0,5	2,5 – 10
D – Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,33	2,5 – 10
E – Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo	0,2 – 0,1	> 10
F – Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,1 – 0,05	> 10

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 11 - Valores de SRF no sistema 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- Tensões baixas, próximas à superfície (δ_c/δ_1 < 200)	2,5
I-Tensões médias (δ_c/δ_1 = 200 a 10)	1
J- Tensões altas (δ_c/δ_1< 10 a 5)	0,5 – 2,0
K- Explosões moderadas de rochas (δ_c/δ_1< < 5 a 2,5)	5 – 10
L- Explosões intensas de rochas (δ_c/δ_1< 2,5)	10 – 20
c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deformações)	
M- Tensões moderadas	5 – 10
N- Tensões elevadas	10 – 20
d- Rochas expansivas (atividade expansiva na presença de água)	
O- Pressão de expansão moderada	5 – 10
P- Pressão de expansão elevada	10 – 15

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

O valor adotado de RQD no cálculo do sistema Q é o resultado obtido do cálculo original, citado anteriormente. Para valores abaixo de 10, atribui-se RQD = 10 (JAQUES, 2014).

Com os valores acima o resultado de Q pode ser obtido e então realizar a classificação segundo 9 classes de maciço conforme exibido na tabela 12.

Tabela 12 - Classificação do maciço no sistema Q.

Classe	Padrão geomecânico do maciço	Valores de Q
IX	Péssimo	0,0001 – 0,01
VIII	Extremamente ruim	0,01 – 0,1
VII	Muito ruim	0,1 – 1,0
VI	Ruim	1,0 – 4,0
V	Regular	4,0 – 10,0
IV	Bom	10,0 – 40,0
III	Muito bom	40,0 – 100,0
II	Ótimo	100,0 – 400,0
I	Excelente	> 400,0

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

O método de classificação *Geological Stress Index* (GSI) foi desenvolvido inicialmente para maciços rochosos homogeneamente fraturados. Desenvolvido por Hoek *et al.* em 1994, tinha como objetivo estimar parâmetros para o critério de resistência Hoek & Brown. O GSI é um sistema que permite estimar as propriedades mecânicas dos maciços rochosos, bem como, a redução da força do maciço para diferentes condições geológicas. O valor do GSI está relacionado ao grau de fraturamento e às condições superficiais das fraturas (WYLLIE & MAH, 2004). O resultado desta análise pode ser obtido através de um ábaco como mostrado na Figura 5, e é dado em intervalos de valores.

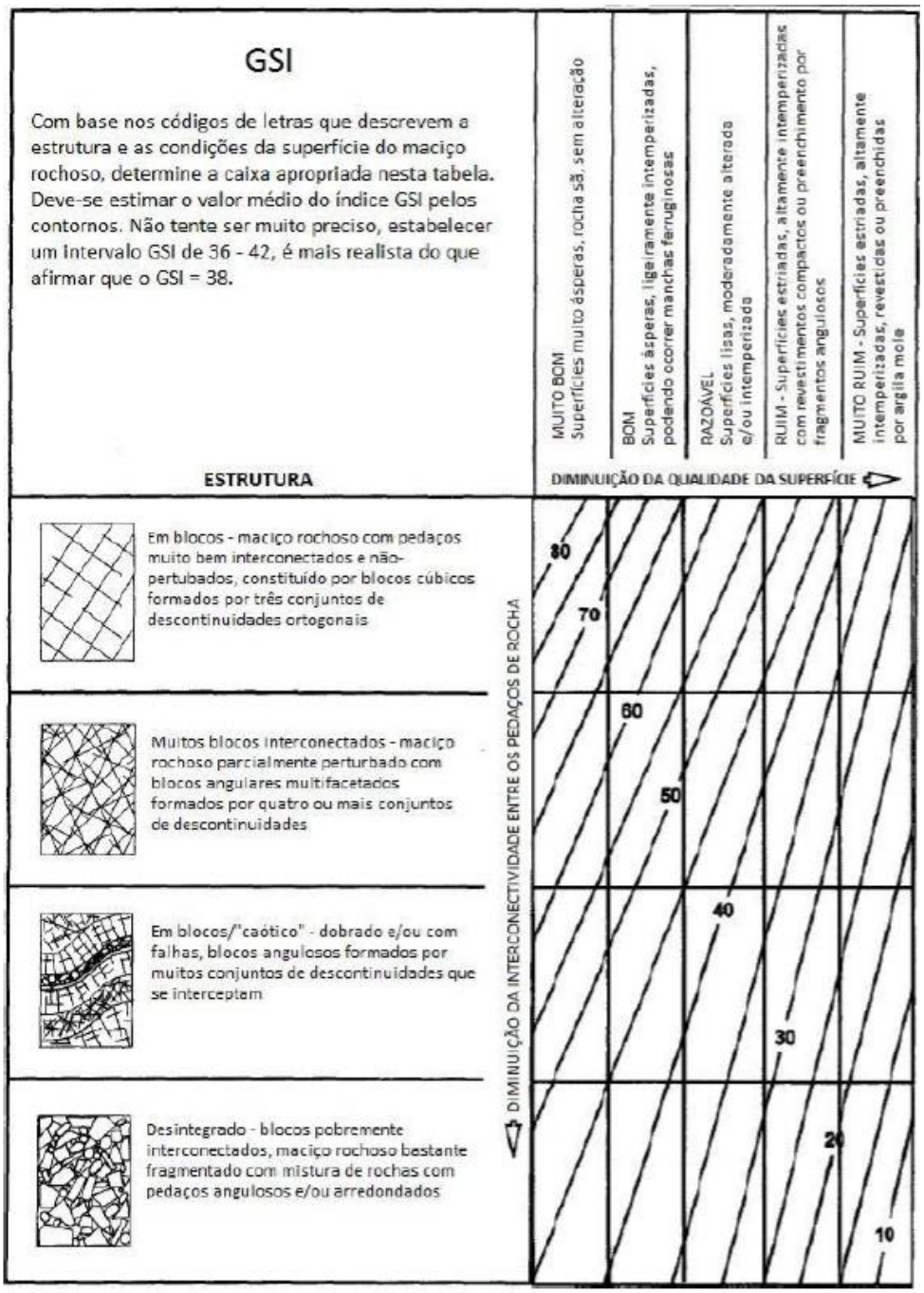


Figura 5 - Ábaco para obtenção dos valores de GSI.

Fonte: Santos (2015).

2.4. Critérios de resistência

Hoek et al. (2002) propôs o critério de resistência de Hoek & Brown diante das dificuldades de medir as forças presentes no maciço rochoso. Trata-se de um método

empírico em alternativa às retroanálises que determina a resistência do maciço rochoso (WYLLIE & MAH, 2004). O critério pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

σ_1: é a tensão principal maior;

σ_3: é a tensão principal menor;

σ_c: é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;

m_b, s e a: são constantes dependentes das propriedades do maciço rochoso (constantes de Hoek-Brown).

Quando se trata de uma rocha intacta a constante m_b assume o valor de m_i. Para essa e as demais constantes, a obtenção das mesmas ocorre por meio das equações apresentadas abaixo 7, 8 e 9 e levam em consideração o sistema de classificação GSI.

$$m_b = m_i \; x \; e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad Equação\ 7$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad Equação\ 8$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \qquad Equação\ 9$$

Onde:

GSI: Índice de resistência geológica;

m_i: é a constante da rocha intacta (valor pode ser encontrado no Anexo 2) e

D: fator que depende da perturbação que o maciço rochoso está exposto para o desmonte (Anexo 2).

A partir das constantes apresentadas anteriormente - m_b, s e a – e também σ_3 e δ_c, é possível calcular dois novos parâmetros intrínsecos as descontinuidades e que levam ao Critério de Mohr-Coulomb. São eles o ângulo de atrito e a coesão, dados pelas equações 10 e 11.

$$\varphi = sin^{-1}\left(\frac{6am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}\right) \quad \text{Equação 10}$$

$$c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma_{3n}](s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+[6am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)]}} \quad Equação\ 11$$

Sendo σ_{3n} a tensão σ_3 máxima dividida pela resistência à compressão uniaxial da rocha e é determinado pela seguinte equação

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_c} = 0{,}47\left(\frac{\sigma_c}{\gamma H}\right)^{-0{,}94} ou\ 0{,}72\left(\frac{\sigma_c}{\gamma H}\right)^{-0{,}91} \quad Equação\ 12$$

Onde:

γ: é o peso específico da rocha e

H: é a altura do talude.

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

2.5. Teste do martelo de geólogo

A resistência à compressão de uma amostra de rocha é um parâmetro quantitativo, que pode ser determinado a partir de ensaios laboratoriais. Entretanto, é possível estimar uma faixa de valores de resistência para as rochas por meio do teste do martelo de geólogo (Tabela 13). Esse teste consiste em realizar análises simples, com instrumentos tipicamente utilizados em trabalhos de campo, para se obter um panorama geral sobre a resistência da rocha.

Tabela 13 - Grau de resistência das rochas.

Grau	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
R0	Solos estruturados e rijos à rochas muito brandas	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; escavada por equipamento manual	0,25 – 1,0
R1	Rochas muito brandas	Esmigalha-se facilmente sob o impacto de martelo de geólogo; riscada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo; riscada e raspada facilmente pelo canivete; desplacamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; bordas dos fragmentos facilmente quebradas pela pressão dos dedos; pequenos fragmentos (2 X 2 X 2 cm) não quebram sob pressão dos dedos; escavação mecanizada	1,0 – 5,0
R2	Rochas brandas	Quebra-se sob único impacto do martelo; cavidade rasa sob impacto firme da ponta fina do martelo de geólogo; as bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; a lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; podem ser raspadas pelo canivete; escavação por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço	5,0 – 25,0
R3	Rochas mediamente resistentes	Espécimes de mão podem ser quebrados sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; superfície pouco riscável por lâmina de aço; não pode ser raspada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	25,0 – 50,0
R4	Rochas resistentes	Espécimes de mão requerem alguns golpes do martelo para serem quebrados; bordas dos fragmentos dificilmente quebradas pelas mãos; superfície dificilmente riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	50,0 – 100,0
R5	Rochas muito resistentes	Espécimes de mão requerem muitos golpes do martelo para serem quebrados; fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; superfície praticamente não riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	100,0 - 250,0
R6	Rochas extremamente resistentes	Espécimes somente lascados com o uso do martelo	> 250,0

Fonte: Adaptado de Hoek (2002).

3. Metodologia

Os procedimentos e materiais utilizados neste trabalho podem ser divididos em duas etapas principais e distintas. Uma primeira etapa está relacionada ao trabalho de campo, ou seja, o levantamento geológico-geotécnico e a segunda etapa referente ao tratamento dos dados coletados em campo.

O talude utilizado para este estudo pertence à mina da Santa Helena Mineração Ltda, localizada a cerca de 320 km de Belo horizonte e 40 km de Araxá às margens da BR-262, município de Ibiá, como ilustrado na Figura 6. O talude pode ser denominado como TLD-01 e foi escolhido de acordo com a necessidade da empresa. Sendo uma região que está localizada no limite final da mina, realizar qualquer alteração de geometria para melhorar a estabilidade do talude, de forma a garantir a segurança do mesmo, é uma tarefa bastante complexa. Por tratar-se de um talude alto, dotado de forte inclinação, que chega a quase ser vertical, e possuir inúmeras descontinuidades, o estudo para conhecimento geomecânico do TLD-01 era de grande relevância para a pedreira.

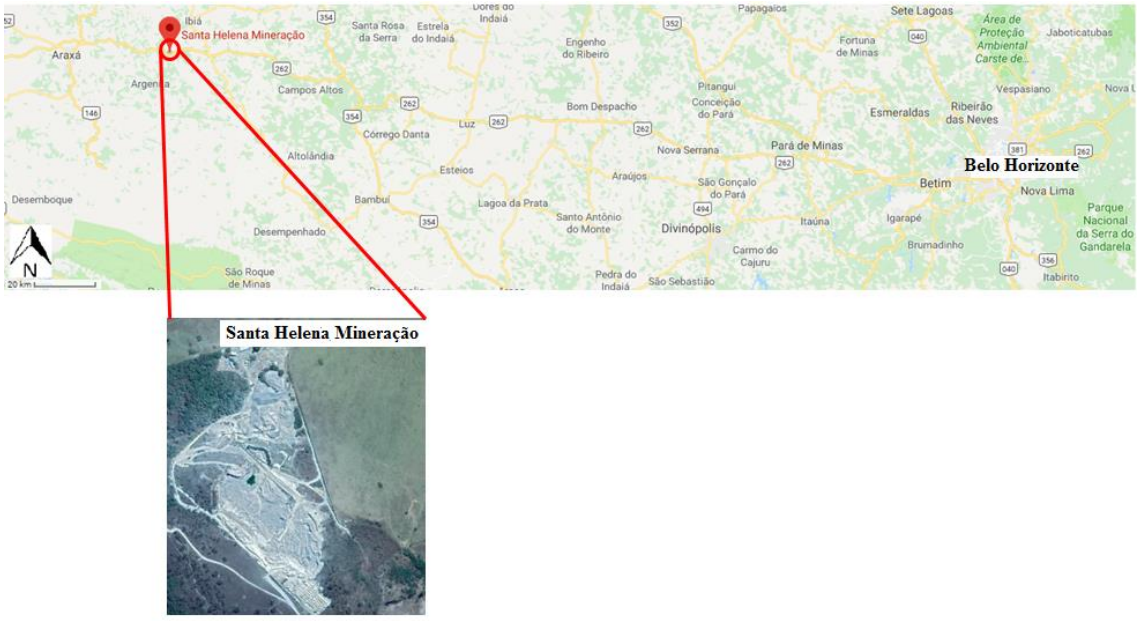


Figura 6 - Localização da Santa Helena Mineração.

Fonte: Google Earth.

1.1. Levantamento geológico-geotécnico

O levantamento geológico-geotécnico consistiu basicamente da coleta de dados do maciço e das descontinuidades. Primeiramente ocorreu a definição da litologia do maciço e em seguida a coleta dos dados.

Anteriormente à ida a campo, foram selecionados quais parâmetros deveriam ser levantados. A amostragem realizada seguiu o método linear, ou seja, foi executada ao longo de uma linha pré-estabelecida, com cerca de 30 m de extensão. Mediu-se então todas as principais estruturas que interceptavam essa linha. Diante disso, foram feitas medidas acerca das atitudes das descontinuidades com auxílio do aplicativo FieldMove Clino, além da medição dos espaçamentos e das persistências, sempre que possível, com a realização de estimativas para aqueles casos em que se mostrou inviável a tomada desses valores. Determinou-se ainda as condições das descontinuidades: abertura, rugosidade, preenchimento, alteração da parede e amplitude.

Alguns parâmetros a respeito do maciço rochoso também foram coletados. Foi verificada a presença de infiltração de água subterrânea e alteração da rocha. Além disso, nesta etapa de levantamento geológico-geotécnico foi realizado o teste do martelo de geólogo. Feito isso, foram observadas as características do maciço rochoso (Tabela 13), e aferida a sua classificação segundo as classes R0 a R6 e sua resistência à compressão uniaxial. Todos os dados coletados foram anotados em uma planilha de campo (Apêndice 1). Ainda em campo foi feita a classificação pelo sistema GSI observando o grau de fraturamento e condições das fraturas visualizadas.

Lista de materiais utilizados nesta fase (Figura 7):

- Trena;
- Planilha de campo;
- Smartphone (App “ FieldMove Clino”);
- Escalimetro;
- Placa de alumínio e
- Martelo de geólogo.

Figura 7 - Equipamentos utilizados: trena (A); smartphone, chapa e escalimetro (B) e martelo de geólogo (C).

Figura 8 - Teste do martelo de geólogo.

1.2. Tratamento dos dados

Esta etapa só foi possível ser realizada após ter posse de todos os dados de campo devidamente organizados. Para tanto, a planilha de campo obtida na fase anterior necessitou passar por uma repaginação utilizando o software Microsoft Excel, de modo que facilitasse os cálculos posteriores. O modelo da planilha está exposto na Figura 9.

n° do ponto	Coordenada geográfica	Litologia	Alteração da rocha	Água subterrânea	Teste do martelo geológico	Descontinuidades								
						Dip direction	Dip	Espaçamento médio (cm)	Abertura (mm)	Persistência (m)	Rugosidade	Preenchi-mento	Alteração da parede	Amplitude (mm)

Figura 9 - Parte da tabela de dados de campo.

O segundo passo realizado nesta etapa foi a análise dos dados empregando o software da Rocscience, Dips. Por meio desta ferramenta foi possível a determinação das famílias de descontinuidades presentes no talude, bem como o espaçamento e atitude média delas. Nesta seção apenas as atitudes e espaçamentos das descontinuidades foram utilizadas.

Através da integração dos resultados obtidos no Dips e dos dados do levantamento de campo foi possível associar o valor de cada parâmetro relacionado a cada sistema de classificação geomecânica e prosseguir com os cálculos. Todas as operações foram realizadas usando o Excel e empregando as equações 2, 3, 4 e 5. Lembrando que no caso do RMR foi utilizado o RMR básico, ou seja, sem a aplicação do ajuste da orientação. Para o RMR, além da Tabela 6 foi utilizado o Anexo 1. Ao fim dos cálculos cada resultado foi relacionado à sua classe para a caracterização do maciço, seguindo as tabelas 5, 6 e 12. Para o GSI, a obtenção dos resultados foi feita em campo utilizando o ábaco já mostrado pela Figura 5.

A última etapa foi obter os parâmetros presentes nos critérios de resistência. Estes foram encontrados utilizando o software da Rocscience, RocData, e também as equações 7, 8 e 9 já exibidas.

4. Resultados e Discussões

4.1. Caracterização geológica-geotécnica

O talude TLD-01 está localizado no limite de exploração da mina e suas coordenadas geográficas são 46°57’12” O e 19°34’45” S. Foi selecionada uma extensão de aproximadamente 30 metros para a coleta de dados onde o talude possui altura de 25 metros e inclinação de 90°. O maciço rochoso formador do talude é bastante fraturado por toda a extensão do TLD-01, apresentando continuidade em suas características. A rocha constituinte do maciço possui coloração cinza esbranquiçada (Figura 10), é ígnea e apresenta textura fanerítica. Tal rocha foi denominada como granito deformado.

Figura 10 - Rocha formadora do maciço, Granito deformado.

Para a análise pelo software Dips a planilha de campo precisou ser filtrada de forma que apenas os parâmetros de interesse ao software - atitude e espaçamento - fossem fornecidos a ele. Ao todo foram coletados 30 pontos de medições. A planilha completa pode ser visualizada no Anexo 1. A Tabela 14 representa esses dados filtrados.

Tabela 14 - Orientação e espaçamento das descontinuidades.

Dip	Dip direction	Espaçamento médio (cm)
89	221	8
83	238	8
42	102	40
70	141	9
71	222	14
70	144	21
88	56	11
38	39	4
81	141	2
75	72	4
59	239	56
78	138	70
80	55	32
47	228	100
81	68	3
84	132	5
65	67	3
82	130	6
76	234	21
41	221	71
87	313	16
80	67	42
47	230	16
24	62	1,5
58	78	38
44	46	46
66	64	33
12	256	40
72	217	53
82	145	3

Após a inserção dos dados, o software plotou todos os pontos gerando um gráfico de pontos com todas as descontinuidades medidas. Feito isso foi possível determinar três famílias de descontinuidades presentes no TLD-01. As famílias foram definidas observando a densidade de pontos. Verificando a Figura 11 nota-se que há uma interligação da densidade de pontos pertencentes às famílias 2 e 3, porém, para melhor caracterizar o talude achou-se distingui-los em famílias distintas. Em situações como esta, a experiência do profissional é imprescindível.

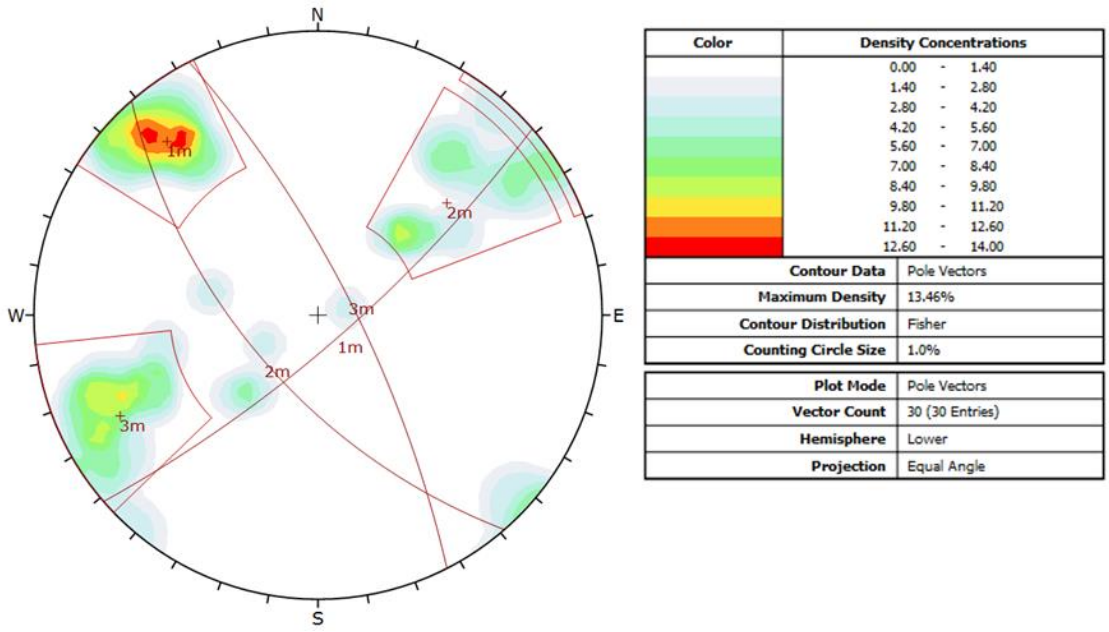


Figura 11 - Diagrama de densidade das descontinuidades do TLD-01.

O espaçamento médio de cada família definida (1, 2 e 3) está exposto na Tabela 15 e foi extraído do Dips. As atitudes médias de cada família também foram calculadas e estão na Tabela 16.

Tabela 15 - Espaçamento médio das descontinuidades do TLD-01.

Família	Espaçamento médio (cm)
1	16,57
2	42,37
3	19,33

Tabela 16 - Atitudes médias das famílias de descontinuidades do TLD-01.

Família	Atitude média
1	78/139
2	65/228
3	74/66

Em relação à persistência das descontinuidades, a grande maioria daquelas coletadas estão acima de 2 metros, totalizando 17 delas. Por motivos técnicos não foi possível determinar o comprimento exato, somente fazer uma estimativa pelo fato das descontinuidades entrarem no maciço. Levando em consideração a Tabela 2, essa

parcela de descontinuidades pode ser descrita com persistência de baixa a muito alta devido a baixa exatidão das medidas.

A família 3 é a que possui a maior quantidade com persistência acima de 2 metros, totalizando 6 descontinuidades. Por outro lado, ambas as famílias 1 e 2 são semelhantes, com persistências menores e ainda assim com descontinuidades acima de 2 metros.

A presença de água foi verificada em apenas um ponto da coleta, e mesmo assim era somente uma face levemente umedecida acompanhada de matéria orgânica.

Quanto ao restante de parâmetros colhidos, todas as condições são expostas na Tabela 17 de acordo com suas respectivas famílias. Todas possuem características predominantemente parecidas, diferindo no quesito abertura e rugosidade no caso da família 3. Aqui foram considerados os dados mais relevantes, ou seja, que mais se repetiam.

Tabela 17 - Condições das descontinuidades do TLD-01.

	Família 1	**Família 2**	**Família 3**
Abertura	Fechada	Fechada a 4 mm	Fechada a 1 mm
Rugosidade	Rugosa (ondulado e irregular)	Rugosa (ondulado e irregular)	Rugosa (ondulado e regular)
Preenchimento	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Alteração da parede	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração

Em campo foi possível notar a quantidade de blocos que se formam em decorrência das descontinuidades (Figura 12). Isso representa um problema, pois a depender das condições do talude, estes blocos podem soltar-se e causar transtornos e prejuízos à empresa.

Figura 12- Blocos formados pelas descontinuidades.

4.2. Ensaio de resistência com o martelo de geólogo

O ensaio foi realizado em campo logo após a coleta dos dados. Ao analisar a rocha foi perceptível que a mesma possuía uma resistência considerável e, portanto foi utilizado o martelo de geólogo. Por tratar-se de um teste bastante simples ele é considerado susceptível a erros e não é o mais recomendado. Porém, em situações que não é possível realizar outros ensaios, seus resultados em faixas de valores são satisfatórios para aplicação. A experiência do geotécnico tem grande influência no produto final. O resultado do teste foi elaborado empregando a Tabela 13 e está exibido na Tabela 18.

Tabela 18 - Teste do martelo de geólogo do TLD-01.

Grau	R5
Descrição	Rochas muito resistentes
Características	Espécimes de mão requerem muitos golpes do martelo para serem quebrados; fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; superfície praticamente não riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo
Resistência à compressão uniaxial	100,0 – 250,0 MPa

Como a faixa estabelecida engloba muitos valores, com variação de resistência de até 150 MPa. Foi estimado o valor de 100 MPa para a rocha do TLD-01.

De acordo com vários estudos presentes na literatura, a resistência à compressão do granito é superior a 100 MPa, assim como foi constatado no teste efetuado. Diante disso, confirma-se, como os resultados deste teste são aceitáveis para projetos de engenharia.

4.3. Classificação geomecânica

As classificações geomecânicas do talude TLD-01 são apresentadas separadamente a seguir, seguindo os diferentes sistemas de classificação já apresentados na seção 3.4 deste trabalho.

4.3.1. RQD

Como o método proposto por Deere (1963) foi inicialmente utilizado para quantificar a qualidade das rochas obtidas nos testemunhos de sondagem, foi utilizada a equação proposta por Palmström (1982), que leva em consideração o número de descontinuidades por unidade de volume, devido à inexistência de testemunhos.

Os cálculos do índice RQD estão abaixo:

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{0{,}17} + \frac{1}{0{,}42} + \frac{1}{0{,}19} = 13{,}57$$

$$RQD = 115 - 3{,}3J_v = 115 - (3{,}3 * 13{,}57) = 70{,}23\%$$

De acordo com a Tabela **5**, o talude TLD-01 pode ser classificado como regular segundo as classes sugeridas, ou seja, está entre 50 – 75% do RQD (Classe III).

4.3.2. RMR

Para o índice RMR, a planilha de campo sofreu uma leve modificação para que incluísse em sua estrutura os pesos referentes aos parâmetros de interesse da análise. Como se trata de um somatório de pesos para cada descontinuidade, foi adotada aquela que apresentou o pior cenário. Os pesos e o resultado para a situação estão na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultado obtido pelo método RMR.

	Cenário estudado
Presença de água	10
Resistência à compressão uniaxial	12
Espaçamento médio	8
Persistência	2
Abertura	1
Rugosidade	1
Preenchimento	4
Alteração da parede	5
RQD	13
RMR	**56**

Diante do que foi exibido acima e analisando a Tabela 6, o TLD-01 pode ser classificado como razoável (Classe III) de acordo com o cenário escolhido. Nota-se que o principal fator responsável pela queda do RMR, está na presença de água encontrada na descontinuidade. Para o âmbito de projeto, quando não se dispõe de muitas informações, é interessante utilizar o RMR do pior caso, sendo assim mais conservador.

4.3.3. Q

Para o sistema Q de classificação, foi necessária a análise das condições das descontinuidades bem como das avaliações já realizadas nos itens acima juntamente às tabelas apresentadas anteriormente no tópico 3.3 - Sistemas de classificação – para se obter os valores de cada parâmetro. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores utilizados para o cálculo de Q.

Parâmetro avaliado	Valor associado ao sistema Q
RQD	70,23
J_n	9
J_r	3
J_a	1
J_w	1
SRF	2,5

O cálculo do sistema Q pode ser visto abaixo:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} x \frac{J_w}{SRF} = \frac{70,23}{9} x \frac{3}{1} x \frac{1}{2,5} = 9,36$$

Por meio da tabela Tabela 12 o índice Q encontrado é atribuído a classe V, ou seja, regular de acordo com o que foi proposto por Barton et al. (1974).

Fazendo um comparativo com os outros sistemas discutidos, percebe-se que seus resultados são razoavelmente consistentes, ou seja, manteve a classificação independentemente do método utilizado. Em todos os sistemas aplicados, o resultado obtido para o TLD-01 foi o mesmo, sendo sempre de qualidade regular. Dessa forma, pode-se afirmar que os três critérios foram coerentes na classificação do maciço estudado.

4.3.4. GSI

Por sua vez, o GSI é o método de classificação mais simples e fácil de ser aplicado entre aqueles empregados. Com uma metodologia simples e intuitiva, o método é sujeito a erros de quem o está aplicando, por se tratar de parâmetros subjetivos. O resultado alcançado pode ser visualizado na Figura 13.

A região delimitada pela cor vermelha representa a caixa que melhor descreve as estruturas e as condições da superfície do maciço rochoso. Havia a formação de vários blocos angulares conectados entre si e com variedade de faces, oriundos de diferentes descontinuidades. A superfície da rocha era áspera e pouco intemperizada, evidenciado pelas regiões com alteração da coloração e manchas. Pela cor amarela está a faixa que foi determinada como o intervalo de GSI do maciço, 55 a 60. Em situações de cálculo adota-se o valor médio ou aproximado, neste caso seria 57.

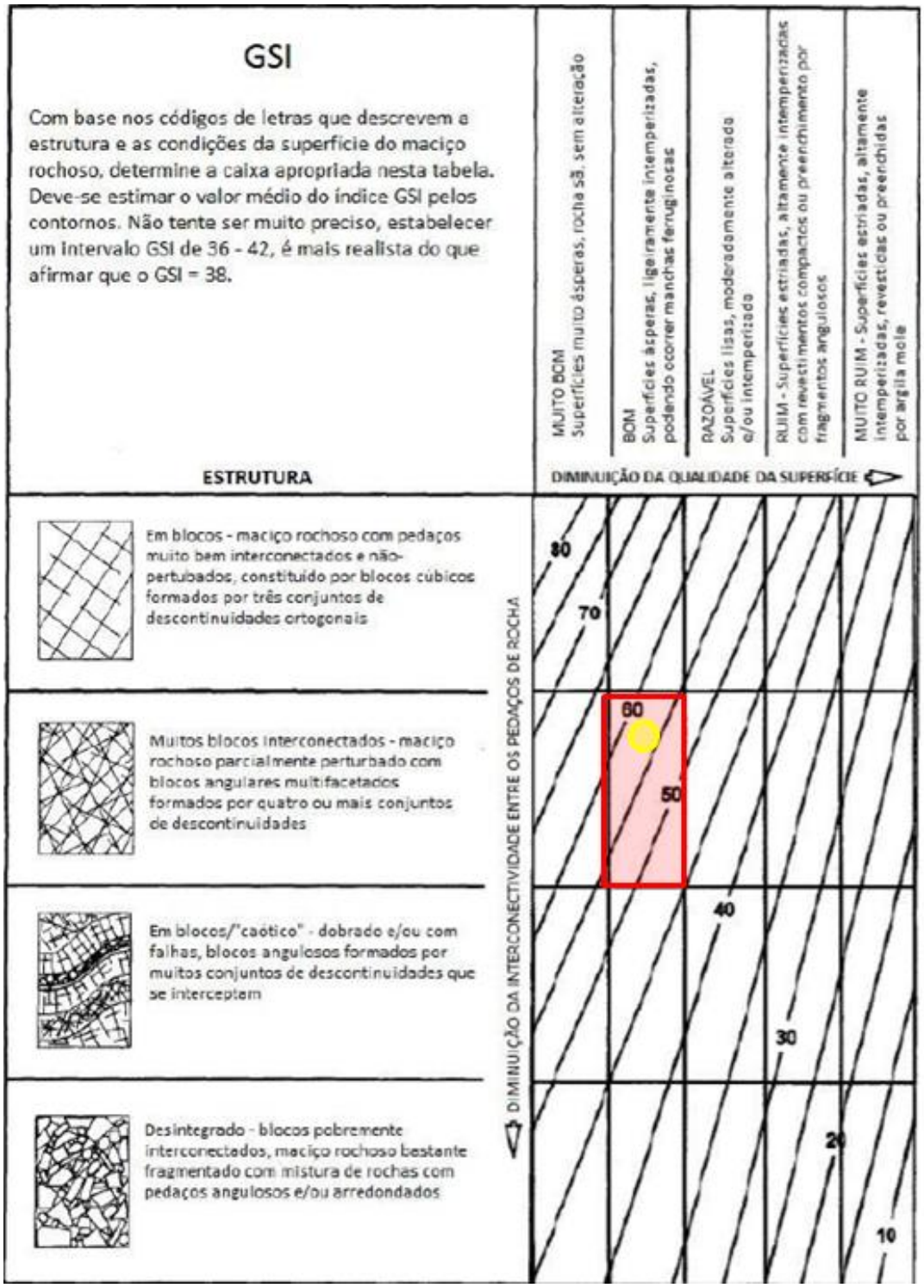


Figura 13 - Classificação geomecânica pelo sistema GSI.

4.4. Critério de resistência

O critério de Hoek-Brown Generalizado (2002) estabelece três parâmetros para a determinação de resistência do maciço rochoso. A partir desse resultado, é possível

estimar valores de ângulo de atrito e coesão, propostos pelo critério de Mohr-Coulomb. Os cálculos referentes aos três parâmetros do critério de Hoek-Brown estão apresentados abaixo. O m_i utilizado foi igual a 32, e o fator D foi igual a 1 pelo fato do desmonte do talude ser feito por explosivos e não possuir muitos dados a respeito disso, ambos obtidos no Anexo 2. Como o GSI é dado por uma faixa ou intervalo de valores, foi adotado um valor médio do encontrado na seção 5.3.4, sendo ele igual a 57.

$$m_b = 32\, x e^{\frac{57-100}{28-(14x1)}} = 1{,}483$$

$$s = e^{\frac{57-100}{9-(3x1)}} = 0{,}0008$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{\frac{-57}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = 0{,}504$$

Já a coesão e ângulo de atrito foram extraídos do software RocData. Nele, foram inseridos os valores de GSI, δ_c, m_i e D como mostra a Figura 14. Os valores de coesão e ângulos de atrito encontram-se na Tabela 21.

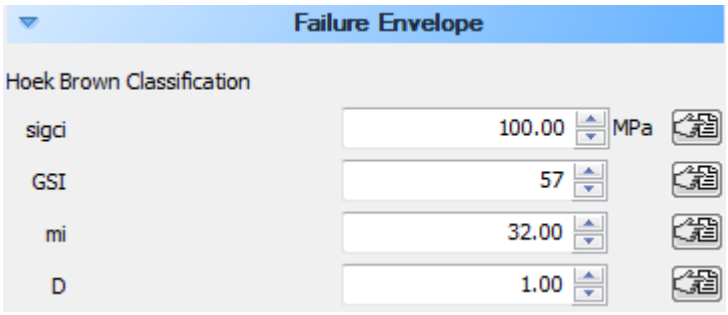


Figura 14 - Parâmetros inseridos no RocData.

Tabela 21 - Critério de Mohr-Coulomb.

	Resultado
Coesão (c)	4,698 MPa
Ângulo de atrito (φ)	29,55°

Outro resultado obtido pelo software são as curvas que representam as envoltórias de resistência da rocha. Isso proporciona realizar análises de ruptura da rocha. As envoltórias são mostradas na Figura 15.

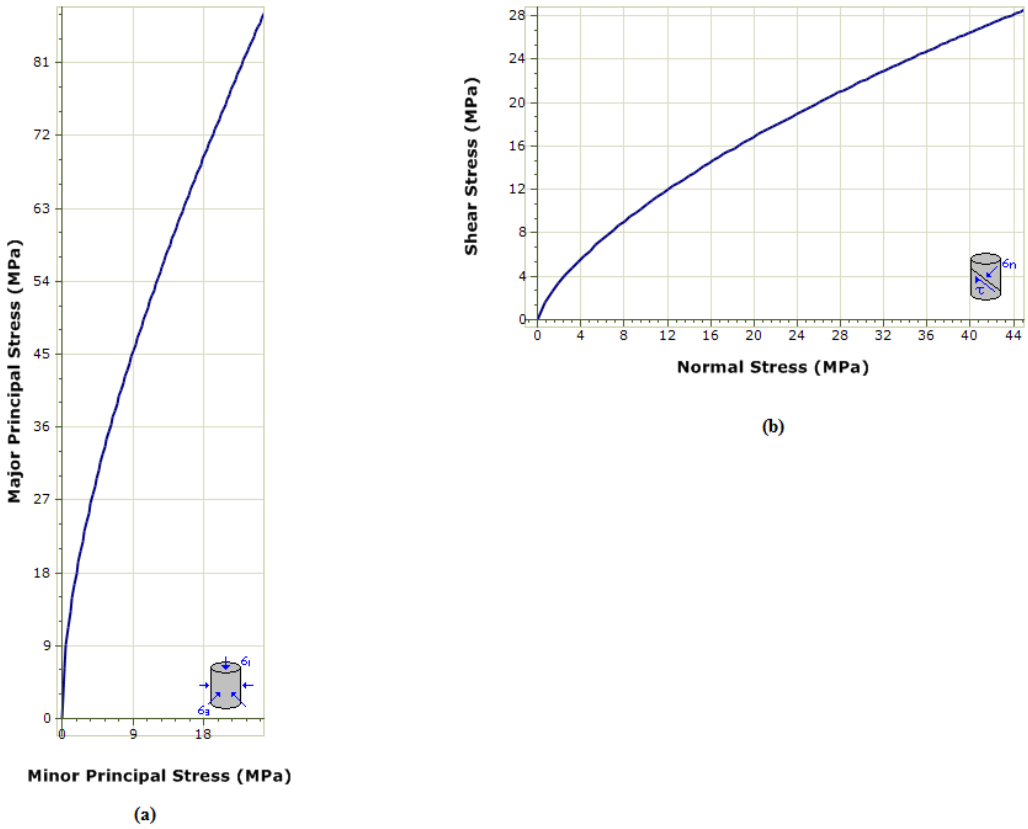


Figura 15 - Envoltórias de resistência de Hoek e Brown: (a) tensão principal menor x tensão principal maior e (b) tensão de cisalhamento x tensão normal .

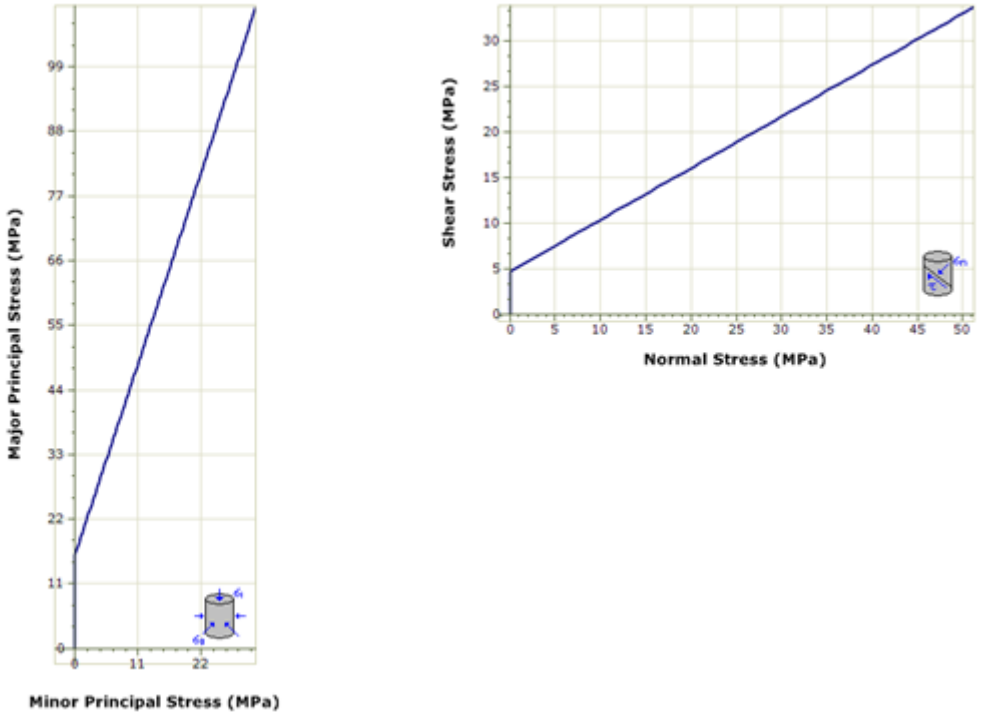


Figura 16 - Envoltórias de resistência de Mohr Coulomb: (a) tensão principal menor x tensão principal maior e (b) tensão de cisalhamento x tensão normal .

A partir dessas envoltórias obtidas no RocData é possível prosseguir para o estudo de análise de estabilidade e obter os fatores de segurança para as prováveis rupturas do talude.

5. Conclusão

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

A rocha constituinte do maciço rochoso é um granito deformado de coloração cinza esbranquiçada e com resistência a compressão uniaxial por volta de 100 MPa, obtida a partir do teste do martelo de geólogo.

A classificação do maciço rochoso pelos sistemas de classificação RQD, RMR e Q convergiram para o mesmo resultado, um maciço rochoso regular. O RQD obtido pela equação aplicada foi de 70,23%, pertencendo à Classe III. O RMR foi de 56 e foi classificado como Classe III. Já o Q alcançado foi de 9,36 e está dentro da Classe V. Por fim a última classificação aplicada foi o GSI; para este sistema obteve-se o valor de 57. Entre todos os sistemas aplicados, o RQD era o mais simplificado até mesmo utilizando a estimativa proposta por Palmström. Devido à dependência da direção do levantamento e por considerar apenas o número de descontinuidades – não pondera as características das descontinuidades - o método foi considerado o menos preciso entre eles.

O uso de ferramentas computacionais para a análise da geologia estrutural e obtenção dos critérios de resistência constituiu uma boa metodologia. Tanto o software Dips e RocData apresentaram resultados condizentes com uma plataforma didática. Para o critério de Hoek-Brown os parâmetros obtidos pelo software RocData foram confirmados aplicando as fórmulas apresentadas no corpo do texto. O resultado do m_b para o maciço rochoso foi de 1,483, o s foi 0,0008 e o a, 0,504. Já os parâmetros ângulo de atrito e coesão encontrados foram de 29,55° e 4,698 MPa respectivamente.

De modo geral, foi possível concluir a importância do uso de classificações geomecânicas como dispositivo na estimativa de parâmetros relevantes ao maciço rochoso, em casos nos quais não é possível obtê-los em ensaios de laboratório. A análise de estabilidade do talude fica indicada como sugestão para trabalhos futuros, que deem continuidade a este.

6. Referências bibliográficas

ÁVILA, C. R. (2012). ***Determinação das Propriedades Mecânicas de Maciços Rochosos e/ou Descontinuidades Utilizando Classificações Geomecânicas - uma Comparação entre os Diversos Métodos de Classificação.*** Dissertação de Mestrado , Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia , Ouro Preto.

AZEVEDO, I. C., & MARQUES, E. A. (2002). ***Introdução à Mecânica das Rochas. Caderno Didático 85***. Viçosa, MG: Editora UFV.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). ***Engineering Rock Mass Classifications.*** New York : John Wiley & Sons .

DEERE, D. U. (1989). ***Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years.*** National Technical Information Service. Gainesville, Florida. 22 p.

FABRÍCIO, J. F. et al. (2015). ***Análise e Interpretação de Parâmetros de Qualidade de Maciço para Proposição de Modelo Geomecânico.*** *Revista Monografias Ambientais* (Edição Especial Unipampa), 62-79 p.

HOEK, E. (2000). ***Pratical Rock Engineering***. Canadá.

HOEK, E. (2002). ***Rock Mass Properties for Underground Mines***. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). Litleton, Colorado. 21 p.

ISRM. (1978). ***Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass***. Grã Bretanha, v. 15. 319 - 368 p.

ISRM. (2007). ***The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:2007-2014***. (R. Ulusay, Ed.) Springer .

JAQUES, D. S. (2014). ***Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos da Mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais.*** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa.

MESQUITA, J. B. (2008). ***Maciços Rochosos em Projetos Hidroelétricos: Proposta de Classificação Geomecânica.*** Dissertação de Doutorado , Universidade Estadual Paulista , Instituto de Geociências e Ciências Exatas , Rio Claro.

SANTOS, T. B. (2015). ***Aplicabilidade das Classificações Geomecânicas e Retroanálise para Estimação das Propriedades dos Maciços Rochosos***. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto , Departamento de Engenharia de Minas , Ouro Preto.

SILVA, M. D. (2013). ***Caracterização Geotécnica do Maciço Rochoso e Fundações em Estacas Embutidas em Rocha***. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife.

VALLEJO, L. L., FERRER, M., ORTUÑO, L., & OTEO, C. (2002). ***Ingeniería Geológica***. Espanha: Prentice Hall.

WYLLIE, D. C., & MAH, C. W. (2004). ***ROCK SLOPE ENGINEERING CIVIL AND MINING*** (4th Edition ed.).

Apêndice 1 – Tabelas e dados de campo

Alteração da rocha.

Código	Descrição
1	Rocha sã
2	Rocha pouco alterada
3	Rocha moderadamente alterada
4	Rocha muito alterada
5	Rocha completamente alterada
6	Solo residual

Condição de água subterrânea.

Código	Condição de água
1	Seco
2	Úmido
3	Encharcado
4	Gotejando
5	Com fluxo

Rugosidade da descontinuidade.

Código	Descrição
1	Superfície lisa com estrias; aspecto plano e regular
2	Superfície lisa; aspecto ondulado e regular
3	Superfície levemente rugosa; aspecto ondulado e irregular
4	Superfície rugosa; aspecto regular escalonado
5	Superfície extremamente rugosa; aspecto irregular escalonado

Preenchimento da descontinuidade.

Código	Preenchimento
1	Nenhum
2	Duro < 5 mm
3	Duro > 5 mm
4	Macio < 5 mm
5	Macio > 5 mm

Alteração da parede da descontinuidade.

Código	Descrição
1	Sem alteração
2	Pouco alterado
3	Moderadamente alterado
4	Muito alterado
5	Completamente alterado

Dados coletados em campo.

n° do ponto	Coordenada geográfica	Litologia	Alteração da rocha	Água subterrânea	Teste do martelo geológico
1		Granito	2	1	100
2		Granito	2	1	100
3		Granito	2	1	100
4		Granito	2	1	100
5		Granito	2	1	100
6		Granito	2	1	100
7		Granito	2	1	100
8		Granito	2	1	100
9		Granito	2	1	100
10		Granito	2	1	100
11	19°34'45"S 46°57'12" W	Granito	2	1	100
12		Granito	2	1	100
13		Granito	2	1	100
14		Granito	2	1	100
15		Granito	2	1	100
16		Granito	2	1	100
17		Granito	2	1	100
18		Granito	2	1	100
19		Granito	2	1	100
20		Granito	2	1	100
21		Granito	2	1	100
22		Granito	2	1	100
23		Granito	2	2	100
24		Granito	2	1	100
25		Granito	2	1	100
26		Granito	2	1	100
27		Granito	2	1	100
28		Granito	2	1	100

29	Granito	2	1	100
30	Granito	2	1	100

Descontinuidades								
Dip direction	Dip	Espaçamento médio (cm)	Abertura (mm)	Persistência (m)	Rugosidade	Preenchi-mento	Alteração da parede	Amplitude (mm)
221	89	8	F	>2	2	4	2	10
238	83	8	F	1 <	3	1	1	3
102	42	40	F	> 2	3	1	2	13
141	70	9	F	0,7	2	1	1	2
222	71	14	F	> 2	2	1	2	1
144	70	21	F	0,4	1	1	1	5
56	88	11	F	> 1 < 2	3	1	1	5
39	38	4	F	> = 1	2	1	1	3
141	81	2	F	> 2	2	1	1	1
72	75	4	F	> 2	3	1	1	5
239	59	56	F	> 1	4	1	2	10
138	78	70	F	> 2	2	1	1	2
55	80	32	F	> 2	2	1	2	11
228	47	100	1	> 2	3	1	1	4
68	81	3	F	> 2	2	1	2	10
132	84	5	F	> 2	3	1	1	16
67	65	3	F	> 2	1	1	1	3
130	82	6	F	1,4	4	1	1	15
234	76	21	F	< 0,60	2	1	1	4
221	41	71	F	> 1	4	1	1	6
313	87	16	10	> 2	2	1	1	8
67	80	42	F	0,9	2	1	1	10
230	47	16	4	> 2	2	2	2	8
62	24	1,5	F	0,17	2	1	1	1
78	58	38	1	1,3	1	2	1	4
46	44	46	1	0,6	2	2	1	1
64	66	33	1	> 2	2	1	1	5
256	12	40	1	> 2	2	1	1	3
217	72	53	1	> 2	3	1	1	8
145	82	3	F	> 2	3	1	1	11

Anexo 1 – Complemento das condições das descontinuidades para o RMR.

Condição das descontinuidades (Hudson et al. 1997).

Persistência	<1 m	1 -3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	<0,1 mm	0,1 – 1 mm	1 – 5 mm	>5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Suave	Estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro <5 mm	Duro >5 mm	Mole <5 mm	Mole >5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Alteração	S/ alteração	Pouco alt.	Moderada	Altamente alt.	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0

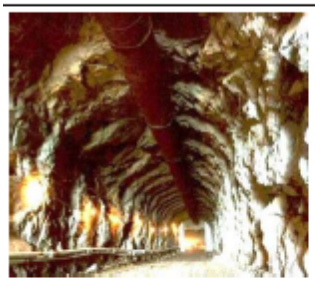
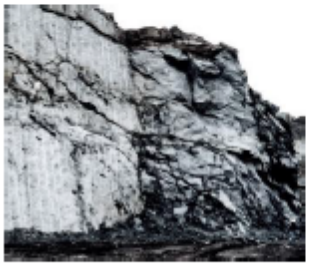
Anexo 2 – Tabelas para o cálculo das constantes de Hoek-Brown

Valores de m_i para rocha intacta.

Tipo de rocha		**Valores de m_i**			
		Textura grosseira	**Textura média**	**Textura fina**	**Textura muito fina**
Sedimentar	Clástica	Conglomerado 21±3 Brecha 19±5	Arenito 17±4	Siltito 7±2	Arglito 4±2 Folhelhos 6±2 Margas 18±3
	Carbonática	Calcário cristalino 12±3	Calcário esparítico 10±2	Calcário micrítico 9±2	Dolomito 9±3
	Evaporitos		Gipsita 8±2	Anidrito 12±2	
	Orgnânicas				Giz 7±2
Ígneas	Intrusiva	Granito 32±3 Granodiorito 29±3 Gabro 27±3 Diorito 25±5 Norito 22±5			
	Hipabissal	Pórfiro 20±5		Dolerito 16±5	Peridotito 25±5
	Vulcânica	Aglomerado 19±3	Andesito 25±5 Riolito 16±5	Basalto 25±5 Tufo 13±5	Obsidiana 19±3
Metamórfica	Foliada	Gnaisse 28±5	Xisto 12±3	Filito 7±3	Ardósia 7±4
	Levemente foliada	Migmatito 29±3	Anfibolito 26±6		
	Sem foliação	Mármore 9±3	Metarenito 19±3	Quartizito 20±3	

Fonte: Adaptado de Hoek (2002).

Valores de perturbação do maciço rochoso.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation