



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DA PEDREIRA
ESPERANÇA – VITÓRIA DE SANTO ANTÃO - PE.**

DISCENTE: RICARDO BATISTA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: M.Sc MARINÉSIO PINHEIRO LIMA

GRADUAÇÃO: ENGENHARIA DE MINAS

Recife, agosto de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DA PEDREIRA
ESPERANÇA – VITÓRIA DE SANTO ANTÃO - PE.

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO,
APRESENTADO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA DE MINAS - DEMINAS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO –
UFPE PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE MINAS.**

DISCENTE: RICARDO BATISTA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: M.Sc MARINÉSIO PINHEIRO LIMA

Recife, agosto de 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

O48c	Oliveira, Ricardo Batista de Caracterização do maciço rochoso da pedreira esperança – Vitória de Santo Antão - PE / Ricardo Batista de Oliveira - 2016. 48 folhas, Il. e Tab. Orientador: Prof. Dr. Marinésio Pinheiro Lima. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia de Minas, 2016. Inclui Referências. 1. Engenharia de Minas. 2. Mecânica de rochas. 3. Classificação de maciços rochosos. 4. RMR. I. Lima, Marinésio Pinheiro. (Orientador). II. Título. UFPE 623.26CDD (22. ed.) BCTG/2016-246
------	---

CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS, ESTUDO DE CASO: LAVRA DA PEDREIRA ESPERANÇA.

O PRESENTE EXEMPLAR CORRESPONDE AO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
EQUIVALENTE AO PROJETO DE GRADUAÇÃO
DEFENDIDO POR RICARDO BATISTA DE
OLIVEIRA, EM SUA VERSÃO FINAL.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. M.Sc Marinésio Pinheiro Lima

Examinador: Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros

Examinador: Eng. Saulo Dantas de Franca

Examinador: Eng. Jorge Luiz Valença Maris

“A vida é muito curta para ser pequena”.

Benjamin Disraeli.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é a concretização de uma longa jornada. Durante todo esse processo, diversas pessoas contribuíram para a sua realização, merecendo por isso o meu sincero agradecimento.

- Ao meu orientador, Prof. Marinésio Pinheiro Lima, cuja colaboração, orientação, correções e disponibilidade foram essenciais para a elaboração deste trabalho.
- A Universidade Federal de Pernambuco, ao corpo docente do departamento de Engenharia de Minas, à direção e administração que fizeram com que fosse possível essa realização.
- A Pedreira Esperança pela colaboração fornecida para a realização do presente estudo, em especial ao Engenheiro de Minas Jorge Luiz Valença Maris.
- A minha família, por todo o apoio, incentivo e pelos esforços a que se dispuseram para que conseguisse a minha formatura.
- Aos meus colegas e amigos, pelo companheirismo, ajuda e momentos de descontração compartilhados comigo ao longo do percurso até esse trabalho.
- A minha namorada, Jokderléa Corrêa de Sousa por ter acreditado em mim durante todo esse período, meu amor, carinho e respeito.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para realização deste trabalho e que não foram aqui citados, para estes deixo aqui também uma palavra de apreço.

Obrigado!

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de analisar e tornar visível os dados de algumas das características geológicas e geomecânicas do maciço rochoso encontrado na Pedreira Esperança. Para alcançar tal objetivo, várias metodologias descritas na literatura foram utilizadas como a classificação *Rock Mass Rating (RMR)* proposta por (Bieniawski, 1973, apud Bieniawski, 1989), entre outras. A metodologia do trabalho aplicada nas avaliações, tanto qualitativas e quantitativas, consistiu em visitas técnicas no período de maio e junho de 2016, juntamente com observações em campo, coleta e análise de dados. Portanto, os subsídios técnicos apresentados neste trabalho serviram para uma melhor visualização da situação atual do maciço em estudo e o estabelecimento de possíveis abordagens para trabalhos futuro, visando à melhora da abordagem operacional frente as condições geotécnicas encontradas no local.

Palavras-chave: mecânica de rochas, classificação de maciços rochosos, RMR

ABSTRACT

This study aims to analyse and make visible the data of some of the geological and geomechanical rock mass found in the Esperança Quarry. To achieve this goal, various methods described in the literature were used as the classification Rock Mass Rating (RMR) proposed by (Bieniawski, 1973, cited in Bieniawski, 1989), among others. The methodology of work applied in the assessments, both qualitative and quantitative, consisted of technical visits between May and June of 2016, along with field observations, data collection and analysis. Therefore, the technical information presented in this study serve as a better view of the current situation of the rock mass in study and the establishment of possible approaches for future studies, aiming at improving the operational approach facing the geotechnical conditions found on site.

Keywords: rock mechanics, rock mass classification, RMR

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Terminologia Definindo a Atitude de uma Descontinuidade 50/135: (a) Vista Isométrica; (b) Vista em Planta (Wyllie et al, 2004).	14
Figura 2 - Representação Estereográfica de um Plano e uma Linha no Hemisfério	16
Figura 3 – Principais tipos de ruptura em taludes e condições de geologia estrutural susceptíveis de causar essas falhas: (a) ruptura planar; (b) ruptura em cunha; (c) ruptura por tombamento; e (d) ruptura circular.	17
Figura 4 - Classificação Geomecânica RMR (Bieniawski, 1989).	20
Figure 5 – Relação entre o <i>RQD</i> e a Frequência média das descontinuidades	21
Figura 6 - Cálculo do <i>Jv</i> (Adaptado de Palmström, 1982).	22
Figura 7 - Guia de Estimativa do Valor de GSI (Hoek, 1994).	25
Figura 8 – Valores de <i>mi</i> para uma Série de Diferentes Tipos de Rocha	26
Figura 9 – Valores Sugeridos para <i>D</i> . (Wyllie et al, 2004).	27
Figura 10 - Desenvolvimento do método de elementos finitos de um modelo genérico. (a) modelo geométrico; (b) condições de contorno e elementos; (c) deslocamentos e tensões em um elemento. (ZINGANO, 2002).	29
Figura 11 – Localização (Google Imagens, 2016).	30
Figura 12 – Vista Geral da Cava da Pedreira	31
Figura 13 – Feições Estruturais do Corpo	31
Figura 14 – Frequência de descontinuidades	33
Figura 15 – Obtenção do <i>RQD</i> através da frequência média de descontinuidades. (Priest e Hudson, 1976)	33
Figura 16 – Projeção em rede estereográfica (a) Projeção dos respectivos pólos;	35
Figura 17 – Determinação do Valor de GSI	37
Figura 18 – Determinação do Valor de <i>D</i>	38
Figura 19 – Determinação Do Valor De <i>mi</i>	39
Figura 20 – Análise da Resistência do Maciço Rochoso Usando RocLab	41
Figura 21 - Discretização do modelamento contínuo com GSI de 62	42
Figura 22 - Modelo mostrando condições de estabilidade	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação Do Parâmetro <i>Rock Quality Designation (RQD)</i> (Modificado de Deere et al., 1967).....	22
Tabela 2 – Valores de J_v Obtidos <i>In Situ</i>	32
Tabela 3 - Obtenção do <i>RQD</i> por meio da frequência média de descontinuidades.	34
Tabela 4 – Obtenção Da Qualidade do Maciço Por Meio do <i>RQD</i>	34
Tabela 5 – Representação e Orientações das Principais Famílias de Descontinuidades	34
Tabela 6 – Pesos para Obtenção do <i>RMR</i> para o Caso em Estudo	35
Tabela 7 - Classificação do Maciço em Função do <i>RMR</i> (Bienwaski, 1989)	40
Tabela 8 - Parâmetros de resistência utilizados na primeira modelagem	42
Tabela 9 – Parâmetros utilizados no segundo modelo	43

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	10
2 - OBJETIVO.....	11
2.1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 – METODOLOGIA	12
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1 – Descontinuidades.....	13
4.2 - Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos.....	18
4.3 – Critérios de Ruptura em Maciços Rochosos	23
4.4 – Modelagem Numérica.....	28
5 – ESTUDO DE CASO	30
5.1 – Localização e Acesso.....	30
5.2 – Visita de Reconhecimento.....	31
5.3 - Levantamentos Dos Parâmetros Para Classificação Do Maciço	32
5.3.1 – RQD.....	32
5.3.2 - Orientação das Descontinuidades	34
5.4 – OBTENÇÃO DO RMR	35
5.5 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MACIÇO	37
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
CONCLUSÃO.....	45
BIBLIOGRAFIA	46

1 - INTRODUÇÃO

A região constituída pelas várias cidades ao redor da cidade do Recife constitui um polo de produção e consumo de agregados para uso na construção civil. O mercado produtor de brita, na região, é formado por pequenas e médias minerações, que apresentam uma evolução caracterizada, no decorrer dos últimos anos, por uma sensível diminuição do número de unidades produtoras, consequência da desaceleração dos investimentos na região em novos projetos de engenharia, fruto da complexa situação política e econômica em que o Brasil se encontra.

Essa região tem um potencial mineiro muito relevante por possuir boas reservas de matérias primas e pelo fato de as unidades produtoras localizarem-se próximas ao mercado consumidor. No entanto, problemas relacionados à elevação dos custos de produção, e a falta de investimentos vêm provocando sucessivos conflitos à medida em que ocorre o “estrangulamento” das entidades produtoras. O interesse em estudar essa região não leva só em conta o fator econômico, mas também o fator social. O emprego de uma abordagem mais técnica e tecnológica à lavra, tem por consequência trazer um ganho de desempenho, segurança e confiança à mineração.

Abordaremos neste trabalho a parte de tecnologia em lavra, tratando da área de mecânica de rochas, iremos fazer uma análise geomecânica do maciço visitado, classifica-lo através do método estabelecido por Bieniawski em 1973, (apud Bieniawski, 1989) conhecido como *Rock Mass Rating (RMR)*, juntamente com o estudo das tensões encontradas na massa rochosa e os critérios que regem sua ruptura, observação e caracterização das principais famílias de descontinuidades presentes, tudo isso com o intuito de obter uma melhor noção do maciço trabalhado e consequente aprimoramento da eficiência operacional na etapas de produção.

Em visita realizada à Pedreira Esperança, no município de Vitória de Santo Antão, foi coletado dados a fim de classificar tal maciço rochoso de modo que, em um futuro próximo, seja possível beneficiar-se desses parâmetros obtidos para consequentemente conseguir uma eficiência maior nas etapas seguintes do processo produtivo, como desmonte, carregamento, transporte, especificação do produto final, dentre outros.

2 - OBJETIVO

O objetivo do atual trabalho resume-se a elaboração de um estudo geomecânico do maciço encontrado na lavra a céu aberto do tipo pedreira da empresa Pedreira Esperança Ltda. A classificação utilizará o método *Rock Mass Rating (RMR)* juntamente com outros parâmetros que sirvam para uma melhor caracterização do maciço em estudo, como análises computadorizadas e observações em campo visando uma análise mais completa do ponto de vista da Engenharia de Minas.

2.1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definição das principais famílias de descontinuidades;
- Classificação geomecânica através do método *Rock Mass Rating (RMR)*;
- Utilização do critério de ruptura de *Hoek-Brown* e *Mohr-Coulomb*;
- Estudo geomecânico através de análise de ruptura em meio contínuo.

3 – METODOLOGIA

A metodologia deu-se em função inicialmente de visitas ao local para conhecimento da situação operacional da pedreira e reconhecimento inicial do maciço rochoso. Feito o contato inicial buscou-se a integração entre os métodos e práticas encontrados através de levantamentos bibliográficos das áreas de geologia, engenharia e demais temas correlatos, como por exemplo os diferentes métodos de classificação de acordo com o método de lavra utilizado e seleção do mais adequado, análises mais representativas para a situação em estudo e escolha dos dados a serem coletados para posteriores simulações.

Ao longo das visitas realizadas, foram sendo feitas análises visuais do maciço, como observação de sua orientação, condição operacional, condição de faturamento, inclinação do talude das frentes de trabalho, entre outras. Tarefas estas que foram seguidas de acordo com orientações passadas pelo docente e orientador do projeto em que também ficou definido o recolhimento de dados referentes às descontinuidades encontradas na cava, como suas respectivas atitudes, distribuição, espaçamento, persistência, presença de fluidos, entre outras informações.

Através da disponibilidade do levantamento bibliográfico, das análises, dados e informações coletadas foi possível concretizar a classificação e reconhecimento da situação real do maciço rochoso encontrado na pedreira e com isso se chegar a parâmetros que objetivam as aplicações práticas do domínio da Engenharia de Minas.

4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 – Descontinuidades

A estabilidade de taludes rochosos é muitas vezes significativamente influenciada pela geologia estrutural da rocha em que é escavado. Geologia estrutural refere-se a interrupções naturais que ocorrem na rocha, tais como planos de estratificação, diaclases e falhas, que são comumente denominadas descontinuidades. As propriedades das descontinuidades relativas à estabilidade incluem a orientação, a persistência, a rugosidade e o preenchimento. O significado de descontinuidades é que elas são planos de fraqueza presentes na rocha que fazem com que falhas tendam a ocorrer preferencialmente ao longo destas superfícies. Portanto, as propriedades das descontinuidades vão afetar a resistência do maciço rochoso em que o talude é escavado. (Wyllie et al, 2004)

Um dos objetivos de um programa de classificação e análise geomecânica de um maciço é definir um conjunto ou conjuntos de descontinuidades, ou um parâmetro único, como uma falha por exemplo, que poderá controlar a estabilidade em um talude ou frente de trabalho em particular. É comum que as descontinuidades ocorram em três conjuntos ortogonais (mutuamente em ângulo reto), possivelmente com um conjunto adicional.

Sugere-se que quatro conjuntos é o máximo que pode ser incorporado para o design de um talude, e que quaisquer conjuntos adicionais que pareçam estar presentes são prováveis representações da dispersão na orientação dos conjuntos principais. Descontinuidades que ocorrem com pouca frequência no maciço rochoso são provavelmente incapazes de ter uma influência significativa sobre a estabilidade da escavação e por isso podem ser desconsiderados no design. (Wyllie et al, 2004)

Orientação das descontinuidades

O primeiro passo na investigação de descontinuidades em um talude é a análise da sua orientação ou atitude, identificação das famílias de descontinuidades e combinar estes dados usando um procedimento que é prontamente acessível à análise. Esta análise é facilitada pelo uso de um método simples e fácil de expressar a atitude de uma descontinuidade. A

terminologia recomendada para orientação é o *dip* e o *dip direction* que são definidos abaixo, e mostrado esquematicamente na Figura 1 (a) e (b). (Wyllie et al, 2004)

1. Mergulho (*dip*) do respectivo plano (Figura 1), através do ângulo medido no sentido descendente a partir da horizontal (ψ);
2. Azimute da direção (*dip direction*), sendo medido a partir do Norte no sentido horário (α).

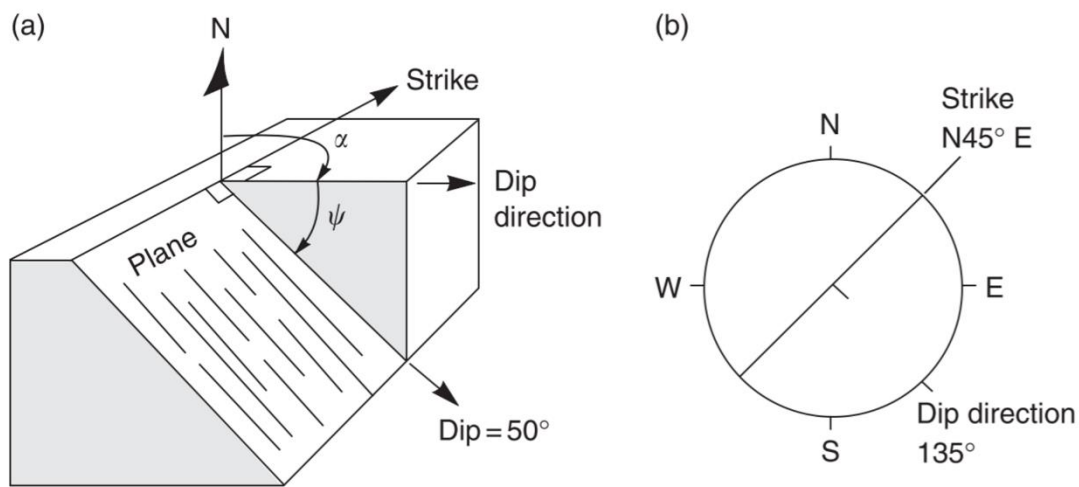


Figura 1 - Terminologia Definindo a Atitude de uma Descontinuidade 50/135: (a) Vista Isométrica; (b) Vista em Planta (Wyllie et al, 2004).

Análise Cinemática

Foi citado anteriormente parâmetros da geologia estrutural que influenciam a estabilidade de taludes em maciços rochosos. Estes parâmetros muitas vezes ocorrem em três dimensões, com um grau de dispersão natural, e a fim de ser capaz de usar os dados eficientemente, é necessário dispor de uma boa técnica de análise. Verificou-se que a projeção estereográfica é uma ferramenta ideal para esta aplicação. Logo abaixo há a descrição dos métodos de análise de dados de geologia estrutural usando projeções estereográficas para identificar famílias de descontinuidades, e examinar sua influência na estabilidade de taludes.

Projeção Estereográfica

A projeção estereográfica permite que os dados de orientação tridimensionais possam ser representados e analisados em duas dimensões. As projeções estereográficas removem uma das dimensões e dessa forma linhas ou pontos podem representar planos, e pontos podem representar linhas.

A projeção estereográfica consiste em uma esfera de referência em que seu plano equatorial é horizontal, e sua orientação é fixada em relação ao norte (Figura 2). A intersecção da característica observada com a metade inferior da esfera de referência define uma linha única sobre a superfície do hemisfério de referência. Para um plano, esta intersecção com a esfera de referência é um arco circular chamado de grande círculo ou círculo maior, enquanto que para uma linha, a intersecção com a esfera de referência é um ponto. A fim de desenvolver uma projeção estereográfica de um plano ou linha, a intersecção com a esfera de referência é levada para baixo para uma superfície horizontal na base da esfera (Figura 2). As linhas e os pontos são locais únicos na projeção que representam o mergulho (*dip*) e direção (*dip direction*) da descontinuidade. Na análise de estabilidade de taludes utilizando projeção estereográfica, os planos são usados para representar ambas as descontinuidades e a inclinação do talude. (Wyllie et al, 2004)

Um meio alternativo de se representar a orientação de um plano é o pólo de um plano (Figura 2 (b)). O pólo é o ponto sobre a superfície da esfera de referência que é perfurada por uma linha radial, numa direção normal ao plano. A importância da projeção em pólo se dá pelo fato de um único ponto poder representar a orientação completa de um plano.

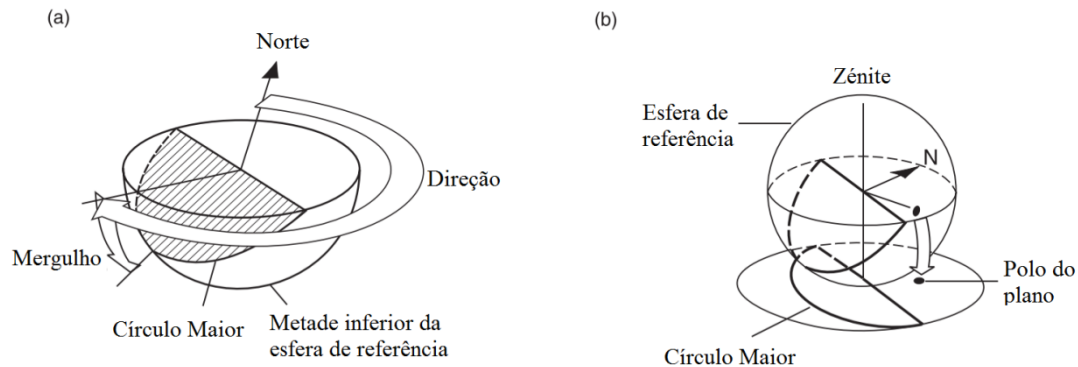


Figura 2 - Representação Estereográfica de um Plano e uma Linha no Hemisfério Inferior da Esfera de Referência: (a) Plano Projetado Como Círculo Maior
(b) Plano Projetado Como Círculo Maior e Respetivo Polo. (Wyllie et al, 2004).

O polo de um plano, como mostrado na figura 2, permite à um ponto representar a orientação de um plano. Projeções em polo, em que cada plano é representado por um único ponto, é o meio mais conveniente de examinar as atitudes de um grande número de descontinuidades. A projeção apresenta uma representação visual imediata de concentrações de polos que representam as orientações das famílias de descontinuidades, e a análise é facilitada pelo uso de diferentes símbolos para os diferentes tipos de descontinuidades, caso seja necessário. (Wyllie et al, 2004)

Tipos de Ruptura

O tipo de ruptura de um talude está associado com diferentes estruturas geológicas e é importante que saibamos a relação entre as diversas famílias de descontinuidades e o potencial cinético de instabilidade dessas estruturas, proporcionando reconhecer os potenciais problemas de estabilidade envolvidos no projeto. Alguns dos padrões estruturais, que devem ser identificados ao examinar as projeções estereográficas, são descritos abaixo. (Wyllie et al, 2004)

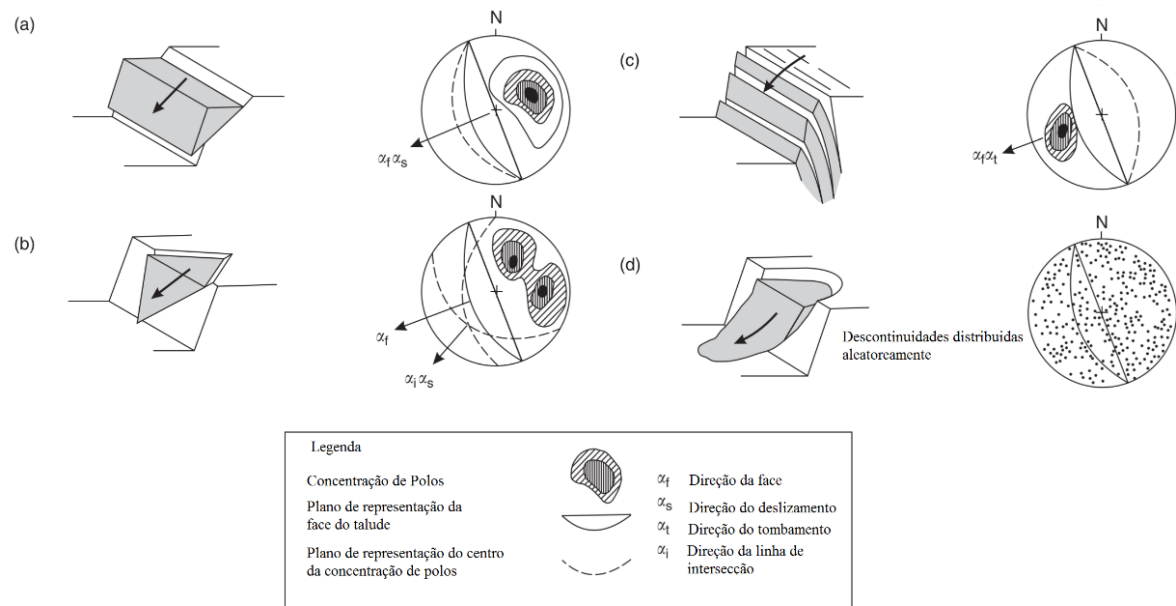


Figura 3 – Principais tipos de ruptura em taludes e condições de geologia estrutural susceptíveis de causar essas falhas: (a) ruptura planar; (b) ruptura em cunha; (c) ruptura por tombamento; e (d) ruptura circular. (Wyllie et al, 2004).

A ruptura planar, assim mostrada na Figura 3 (a) acontece quando as descontinuidades têm a direção aproximadamente paralela à face do talude e mergulho menor que a face do talude, fazendo com que seja possível o deslizamento do material acima da descontinuidade. Já na ruptura em cunha, Figura 3 (b) nota-se a sua formação a partir de duas diferentes famílias de descontinuidades, cuja intersecção proporciona o rompimento de parte do talude. Quando há a intersecção entre as duas superfícies de descontinuidade, elas terminam por definir um bloco tetraedral.

Por outro lado, na ruptura por tombamento, Figura 3 (c), temos um tipo de ruptura em taludes envolvendo rotação de blocos em coluna, agindo uns sobre os outros. Em maciços rochosos esses blocos são formados por planos de acamamento regulares, clivagem ou descontinuidades, paralelos à face do talude e mergulhando para dentro do maciço rochoso, contrastando com a ruptura por deslizamento, na qual as descontinuidades mergulham no mesmo sentido do talude. Por fim, podemos citar a ruptura circular, Figura 3 (d), presente em maciços rochosos extremamente fraturados, em solos ou em maciços muito alterados, geralmente com superfície em forma de concha. Nestas rupturas não há nenhum padrão estrutural definido ou orientações críticas das descontinuidades. Estas rupturas são típicas de maciços de solos.

4.2 - Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos

A necessidade de termos sistemas de classificação de maciços rochosos originalmente surgiu a partir da necessidade de que engenheiros envolvidos em projetos tiveram de relacionar experiências adquiridas em diferentes locais com diferentes condições de solo e de rocha, e aplicá-las a novos projetos (Hoek e Brown, 1980, apud Potvin et al, 2012).

À medida que os sistemas de classificação foram se desenvolvendo e sua aplicação no campo da engenharia civil e da mineração foi se espalhando, tornaram-se cada vez mais usados para construir uma imagem da composição e das características de uma massa rochosa para fornecer estimativas da resistência e propriedade de deformação do maciço rochoso (Hoek et al., 1995, apud Potvin et al, 2012). Atualmente, duas classificações geomecânicas são mais utilizadas e adaptadas para diferentes projetos de engenharia, são elas: a classificação RMR de (Bieniawski, 1973, apud Potvin et al, 2012) e o sistema Q (Barton et al., 1974, apud Potvin et al, 2012). Os dois últimos sistemas utilizam o RQD como parâmetro para o cálculo de seus índices de qualidade do maciço. A popularidade dessas classificações é resultado da sua aplicação útil à um número muito grande de projetos relevantes.

A análise do comportamento geomecânico de um maciço rochoso requer a realização de observações e ensaios em *in situ*, ensaios de laboratório, monitoramento e mapeamento geomecânico do depósito mineral, levantamentos estes que podem ser realizados a partir de furos de sondagem ou por meio de linhas de referência (*scanlines*). Comumente, a realização do procedimento de amostragem é realizado em alguns locais específicos do depósito mineral. O comportamento mecânico das rochas não é constante em toda a massa rochosa. Existe uma anisotropia e uma heterogeneidade das variáveis sob observação. Isso significa que os parâmetros geomecânicos possuem uma variabilidade em direções e locais diferentes do mesmo depósito.

RMR

A classificação geomecânica denominada *Rock Mass Rating (RMR)* foi demonstrada e desenvolvida por Bieniawski (1976, 1979, 1984, 1989), ao longo dos anos, este sistema foi sendo sucessivamente refinado à medida que mais registros de casos foram examinados e que também Bieniawski fez mudanças significativas nos pesos atribuídos aos diferentes parâmetros. A classificação RMR, Bieniawski (1989), foi desenvolvida para caracterização de maciços rochosos e passou a ser muito utilizada em tuneis e outras aplicações para descrever massas rochosas. Esta classificação é baseada na aplicação de pesos à 6 parâmetros (Figura 4), previamente selecionados, relativos ao maciço rochoso, os parâmetros a serem considerados na classificação são os seguintes:

1. Resistência a compressão simples do material rochosos;
2. *Rock Quality Designation (RQD)* do maciço rochoso;
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condições das descontinuidades;
5. Condições hidrogeológicas (infiltração de água);
6. Orientação das descontinuidades em relação a escavação.

A soma dos pesos referentes aos parâmetros 1, 2, 3, 4, 5, 6 será o valor de RMR. Este somatório fornece um valor que varia entre zero e cem, obtendo-se, assim, um índice para a qualidade para cada zona geotécnica de um dado maciço estudado.

Tal classificação fornece uma base para a compreensão do comportamento característico de determinado maciço, e se relaciona com a experiência adquiridas de um local para outro. Para vários projetos de engenharia, a informação detalhada em relação aos parâmetros da massa rochosa, o seu estresse e características hidrológicas é de fundamental importância. Assim, a classificação mostra-se útil para avaliar o comportamento do maciço rochoso. Ela não só dá informações sobre a composição, resistência, propriedades de deformação e características de um maciço rochoso, mas também mostra quais informações são relevantes e necessárias (Bieniawski, 1989).

A partir do valor de RMR pode-se classificar um maciço em termos de qualidade, dividindo-o em zonas com características geológicas e geotécnicas semelhantes, sendo então o maciço enquadrado numa das cinco classes seguintes: rocha de muito boa qualidade, rocha

de boa qualidade, rocha de qualidade razoável, rocha de má qualidade e rocha de muita má qualidade.

A – Parâmetros de classificação e seus pesos									
Parâmetro				Intervalo de variação dos valores					
P1	Resistência do material rochoso intacto	Ensaio de Carga Pontual (MPa)	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para este intervalo é aconselhável utilizar o ensaio de resistência à compressão uniaxial		
		Resistência Compressão uniaxial (MPa)	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
P2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Peso	20	17	13	8	3			
P3	Espaçamento das descontinuidades	>2 m	0.5-2.0 m	0.2-0.6 m	0.05-0.2 m	<0.05 m			
	Peso	20	15	10	8	5			
P4	Condições das descontinuidades (ver E)	Superfícies muito rugosas Não contínuas Nenhuma separação Superfície de rocha inalterada	Superfícies ligeiramente rugosas Separação <1mm Superfície de rocha ligeira/alterada	Superfícies ligeiramente rugosas Separação <1mm Superfície de rocha muito alterada	Superfícies lisas ou enchimento com espessura < 5mm ou separação 1-5mm contínua	enchimento mole com espessura >5mm ou separação >5mm contínua			
		Peso	30	25	20	10	0		
P5	Água subterrânea	Caudal por 10m de túnel (l/m)	Nenhum	<10	10-25	25-125	>125		
		(Pressão água nas diaclases/ tensão principal máxima)	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Ligeiramente Húmido	Húmido	Gotejante	Fluente		
	Peso		15	10	7	4	0		
B. Ajuste dos pesos devido à orientação das descontinuidades (ver F)									
P6		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável			
	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12			
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-6	-25	-50	-60			
C. Classe do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais									
Peso		100-81	80-61	60-41	40-21	<21			
Tipo de Classe		I	II	III	IV	V			
Descrição		Rocha de muito boa qualidade	Rocha de boa qualidade	Rocha de qualidade razoável	Rocha de má qualidade	Rocha de muito má qualidade			
D. Significado das classes das rochas									
Tipo de classe		I	II	III	IV	V			
Tempo médio de auto-sustentimento (auto-portante)		20 anos para um vão de 15m	1 ano para um vão de 10m	1 semana para um vão de 5m	10 horas para um vão 2,5m	30 minutos para um vão de 1m			
Coesão do maciço rochoso (kPa)		>400	300-400	200-300	100-200	<100			
Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)		>45	35-45	25-35	15-25	<15			
E. Orientações para a classificação das condições das descontinuidades									
Comprimento (persistência)	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m				
Peso	6	4	2	1	0				
Abertura	Nenhuma	<0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm				
Peso	6	5	4	1	0				
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Macio	Liso				
Peso	6	5	3	1	0				
Enchimento	Nenhum	Enchimento duro <5mm	Enchimento duro >5mm	Enchimento mole <5mm	Enchimento mole >5mm				
Peso	6	4	2	2	0				
Grau de alteração	Inalterado	Ligeiramente alterado	Moderadamente alterado	Muito alterado	Decomposto				
Peso	6	5	3	1	0				
F. Efeito da orientação da direcção e da inclinação das descontinuidades em túneis									
Direcção perpendicular ao eixo do túnel					Direcção paralela ao eixo do túnel				
Escavar a favor da inclinação – inclinação 45°-90°			Escavar a favor da inclinação – inclinação 20°-45°		Inclinação 45°-90°		Inclinação 20°-45°		
Muito favorável			Favorável		Muito desfavorável		Razoável		
Escavar contra a inclinação – inclinação 45°-90°			Escavar contra a inclinação – inclinação 20°-45°			Inclinação 0°-20° Independente da direcção			
Razoável			Desfavorável			Razoável			

Figura 4 - Classificação Geomecânica RMR (Bieniawski, 1989).

RQD

O índice RQD foi proposto por Deere et al. (1967) com o objetivo de quantificar a qualidade do maciço rochoso, através de testemunhos de sondagens.

Devido a impossibilidade muitas vezes de realização de furos de sondagem, é possível a utilização do espaçamento entre descontinuidades, baseando-se em uma linha de referência na face do maciço rochoso e calcular em função da distribuição de frequência dos espaçamentos das descontinuidades, o índice RQD, mostrado na correlação abaixo. (Priest e Hudson, 1976)

$$RQD = 100 (0.1\lambda + 1)e^{-0.1\lambda}$$

Onde:

λ – frequência média das descontinuidades

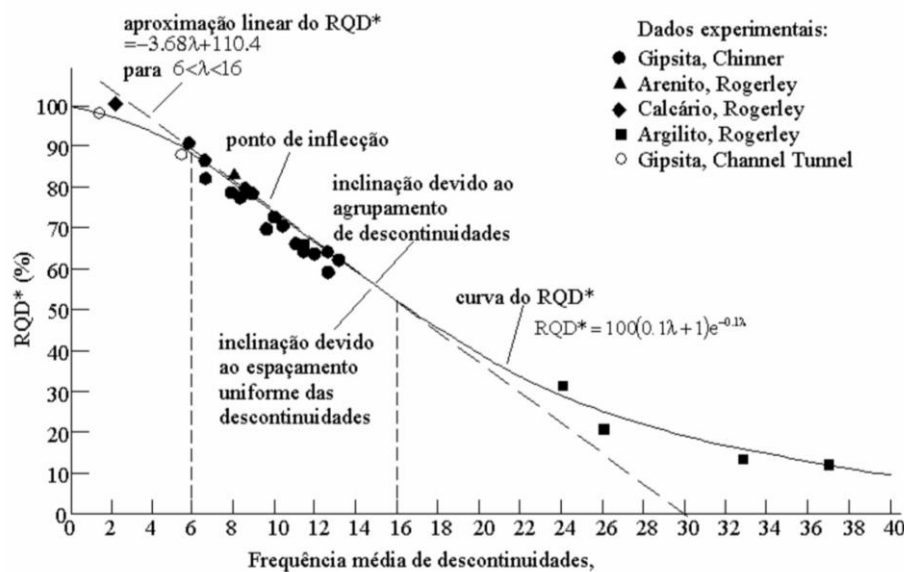


Figure 5 – Relação entre o RQD e a Frequência média das descontinuidades
(Priest e Hudson, 1976)

Além disso, a medição do *Rock Quality Designation* (RQD) proporciona resultados diferentes caso o furo de sondagem seja feito perpendicular ou paralelo à principal família de fraturas, fazendo com que também esta medida, em muitos casos forneça um parâmetro impreciso do grau de faturamento do maciço. (Palmström, 1982)

Com o intuito de aumentar a acurácia diante da obtenção do índice, Palmström, 1982 desenvolveu uma forma de relacionar o RQD com um índice de obtenção *in situ* J_v mostrado

na figura 6 que representa o índice volumétrico (número de descontinuidades por unidade de volume) e criou uma expressão para relacionar os dois valores.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

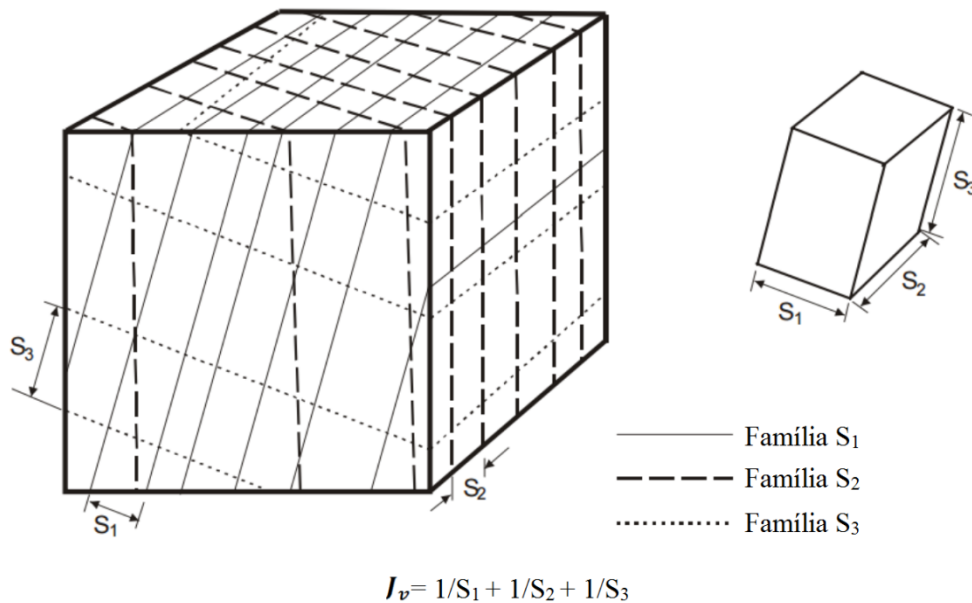


Figura 6 - Cálculo do J_v (Adaptado de Palmström, 1982).

Com o valor do RQD obtido através das expressões de correlação entre RQD , J_v e λ é possível classificar a qualidade do maciço tendo como base a tabela 1. (Deere et al. 1967)

Tabela 1 - Classificação Do Parâmetro *Rock Quality Designation (RQD)* (Modificado de Deere et al., 1967)

RQD	Qualidade do Maciço Rochoso
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

4.3 – Critérios de Ruptura em Maciços Rochosos

Critério de Mohr-Coulomb

Os critérios de ruptura servem para determinar em que nível de tensões um determinado material entra em escoamento plástico. O critério de Mohr-Coulomb é um dos que está presente a mais tempo, e é o mais utilizado há bastante tempo com o intuito de representar o comportamento de materiais quanto a ruptura em regime poliaxial de tensões, sendo estabelecido pela seguinte equação linear (Obert & Duvall ,1967, Jaeger & Cook,1976, apud Aarão et al):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Onde:

τ - tensão de cisalhamento	c - coesão da rocha e
φ - ângulo de atrito interno da rocha	σ - tensão normal

Tomando como base as tensões principais o critério de Mohr-Coulomb também pode ser expresso da forma mostrada abaixo: (Obert, L. & Duvall,1967, apud Aarão et al)

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan \beta$$

$$\sigma_c = (2c \cos \varphi) / (1 + \sin \varphi)$$

$$\tan \beta = \tan^2 (45 + \varphi / 2)$$

Onde:

σ_1 = tensão principal máxima
 σ_3 = tensão principal mínima
 σ_c = resistência à compressão uniaxial

Critério de Hoek-Brown

Como uma alternativa para fazer a análise da resistência de maciços rochosos fraturados, um método empírico foi desenvolvido por Hoek e Brown (1980) em que a resistência ao cisalhamento é representada através de um envelope de Mohr curvado. O critério começa a partir das propriedades da rocha intacta, e, em seguida, são introduzidos fatores para reduzir estas propriedades com base nas características das descontinuidades encontradas. Os autores buscaram vincular o critério empírico com as observações geológicas por meio de um dos esquemas de classificação de maciços disponíveis e, para este fim, eles escolheram o *Rock Mass Rating (RMR)* proposto por Bieniawski (1976).

Com o passar do tempo, mudanças foram feitas no critério e reconheceu-se também que o *Rock Mass Rating* de Bieniawski já não era adequado como meio para relacionar o critério de ruptura com as observações geológicas, em particular para maciços rochosos fracos. Isto resultou na introdução do *Geological Strength Index (GSI)* por Hoek et al. (1992).

Em 1994, Hoek também introduziu o conceito do critério generalizado de Hoek-Brown em que a forma da curva da tensão principal ou do envelope de Mohr pode ser modificada por meio de um coeficiente variável α .

O critério generalizado de Hoek-Brown é expresso em função da tensão principal máxima e mínima, e é mostrada abaixo

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

Onde:

σ'_1 - tensão principal máxima

σ'_3 - tensão principal mínima

σ_{ci} - resistência à compressão simples da rocha intacta

m_b - valor reduzido da constante do material m_i ou constante do maciço rochoso

s e α - constantes para o maciço rochoso

Definindo o GSI

Para auxiliar na determinação dos parâmetros de resistência de maciços rochosos, Hoek (1994) criou o sistema de classificação *Geological Strength Index (GSI)*, que fornece um valor que pode chegar até 100 e que é considerado a junção dos sistemas RMR e Q.

Atualmente o GSI é calculado fazendo uso de recursos visuais e de ábacos, como mostrado abaixo na figura 7, sendo este valor determinado conforme a avaliação das condições do maciço rochoso.

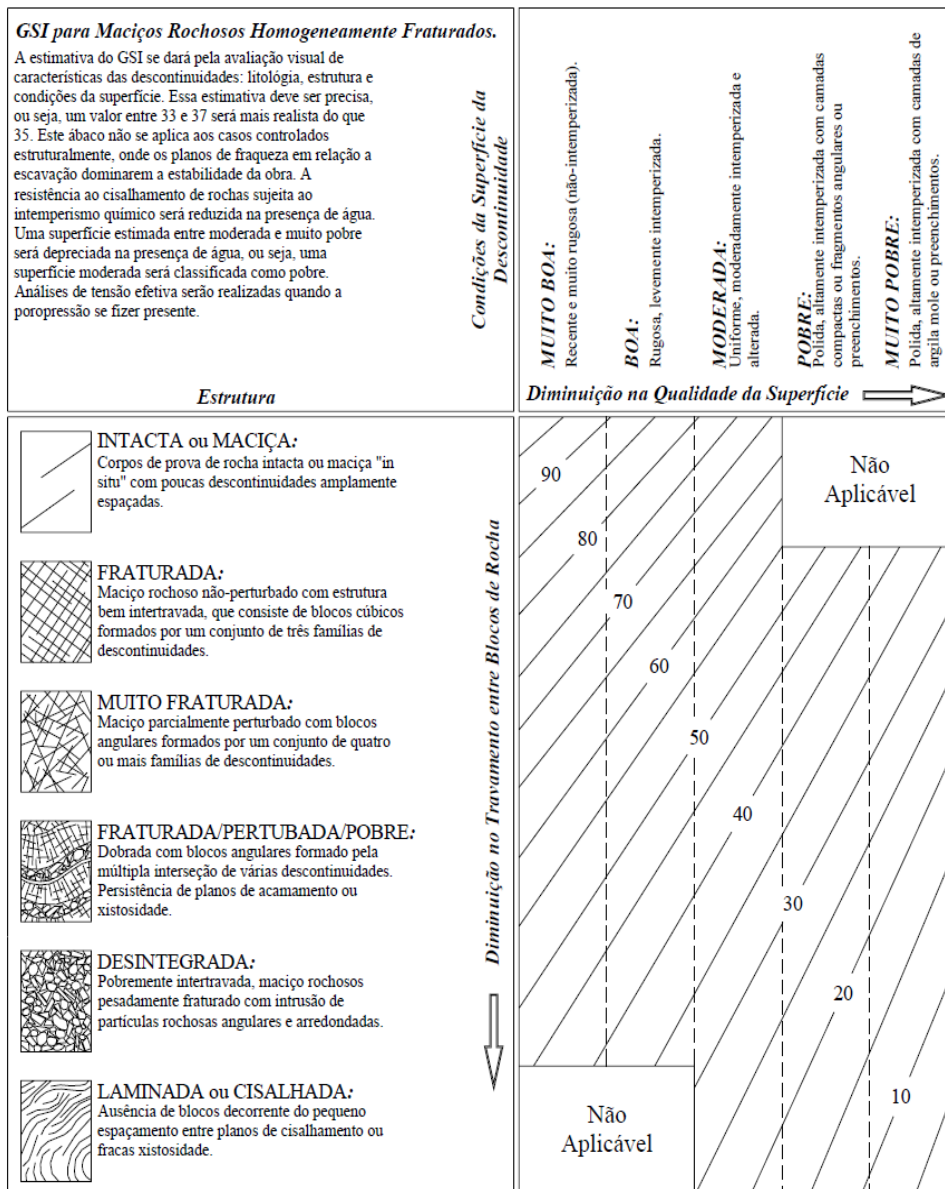


Figura 7 - Guia de Estimativa do Valor de GSI (Hoek, 1994).

Definindo o m_b e o m_i

O m_b é um valor reduzido da constante do material para rocha intacta m_i , este é obtido em função do tipo de rocha encontrada (Figura 8), e aquele é obtido através da expressão abaixo.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

Tipo de Rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grossa	Média	Fina	Muito Fina
SEDIMENTAR	Clástica		Conglomerado * (21±3) Brecha / (19±5)	Arenito / 17±4	Siltito / 7±2 Grauvaca / (18±3)	Argilito / 4±2 Folhelho / (6±2) Marga / (7±2)
	Não-Clás- tica	Carbonatas	Calcário Cristalino (12±3)	Calcário Esparítico (10±2)	Calcário Micrítico (9±2)	Dolomita / (9±3)
		Evaporíticas		Gipsita / 8±2	Anidrita / 12±2	
		Orgânica				Calcário Biogênico 7±2
METAMÓRFICA	Não- foliada		Mármore / 9±3	Hornfels / (19±4) Metarenito / (19±3)	Quartzito / 20±3	
	Levemente foliada		Migmatito / (29±3)	Anfibolito / 26±6		
	Foliada **		Gnaiss / 28±5	Xisto / 12±3	Filito / 7±3	Ardósia / 7±4
ÍGNEA	Plutônica	Ácida	Granito / 32±3	Diorito / 25±5		
			Granodiorito / (29±3)			
	Hipabissal	Básica	Gabro / 27±3 Norito / (20±5)	Dolerito / (16±5)		
		Porfírito / (20±5)			Diabásio / (15±5)	Peridotito / (25±5)
	Vulcânica	Lava		Riolito / (25±5) Andesito / 25±5	Dacito / (25±3) Basalto / (25±5)	Obsidiana / (19±3)
		Piroclásticas	Aglomerado / (19±3)	Brecha / (19±5)	Turfa / (13±5)	

* Conglomerados e brechas podem apresentar uma ampla extensão de valores de m_i dependendo da natureza do material cimentante e do grau de cimentação, assim eles podem ter limites de valores similares a arenito até valores usados para sedimentos de granulação fina.

** Estes valores são para amostras de rocha intacta ensaiadas na direção normal do acamamento ou da foliação. Os valores de m_i serão significativamente diferentes caso a ruptura ocorra ao longo do plano de fraqueza.

Figura 8 – Valores de m_i para uma Série de Diferentes Tipos de Rocha

Definindo o s e o a

O s e o a são constantes obtidas pelas expressões abaixo.

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Definindo o D

O D é um fator que leva em consideração o nível de perturbação sofrido pelo maciço rochoso através do desmonte e do alívio de tensão. É um índice que pode variar de 0, ou seja, nenhuma perturbação, até 1 para uma perturbação significativa do maciço. Por meio da Figura 9 tem-se um guia para a estimativa de seu valor.

<i>Aparência da Massa Rochosa</i>	<i>Descrição da Massa Rochosa</i>	<i>Valor Sugerido para D</i>
	Detonação de pequena escala em taludes de engenharia civil resulta em modesto dano ao maciço rochoso, particularmente se o desmonte controlado é usado como mostrado no lado esquerdo na fotografia. No entanto, o alívio de estresses pode resultar em alguma perturbação.	$D = 0.7$ Desmonte Bom $D = 1.0$ Desmonte Ruim
	Taludes muito grandes de minas a céu aberto sofrem perturbação significativa devido a detonações mais intensas, e também pelo alívio do estresse provocado pela remoção de estérreo	$D = 1.0$ Desmonte de Produção
	Em algumas rochas mais suaves, a escavação pode ser levada a diante por escarificação e nivelamento, e o grau de danos para os taludes é menor.	$D = 0.7$ Escavação Mecânica

Figura 9 – Valores Sugeridos para D . (Wyllie et al, 2004)

4.4 – Modelagem Numérica

A utilização de modelos matemáticos que representem ou simulem o comportamento mecânico dos maciços rochosos e os elementos estruturais presentes no contorno das escavações, determinam um guia para avaliação da estabilidade, segurança e economia das escavações. Uma consideração importante deve ser satisfeita: assegurar que o nível tensional no entorno da escavação não exceda a resistência do maciço, assegurando a estabilidade da escavação.

Existem alguns problemas cuja solução analítica é exata, tais como a distribuição de tensões ao redor de aberturas circulares, e o desenho de trechos semelhantes a vigas ou placas. Em outros casos, devido principalmente à problema de contorno, as equações formuladas não possuem uma solução exata, sendo necessário recorrer a métodos numéricos.

Existem vários métodos numéricos para modelamentos geomecânicos, com características específicas e aplicado a cada tipo de problema. Existem duas maneiras, de abordar o cálculo das tensões e deformações de uma mina (Hudson e Harrison, 1997; Jing e Hudson, 2002): contínuas e descontínuas. O maciço rochoso possui descontinuidades, como: planos de estratificação, juntas e falhas. Os métodos contínuos consideram o maciço rochoso como um meio contínuo interceptados por descontinuidades, e os descontínuos como um conjunto de blocos individuais. Os métodos numéricos possuem a capacidade de incluir informações geológicas, propriedades da rocha e geometrias complexas, além das escavações (Zingano, 2002).

Os principais parâmetros utilizados na análise com os métodos numéricos são: geometria da escavação, tensão pré-existent, características geométricas da geologia, parâmetro geomecânicos do maciço, elementos estruturais e condições de fronteiras. O modelamento numérico consiste em subdividir o sistema completo que se deseja estudar em uma série de elementos de tamanho relativamente pequenos em relação ao sistema (Figura 10). Estes elementos são denominados Elementos Finitos, cada um possuindo uma equação própria, de forma que a equação do sistema é obtida juntando as equações dos elementos que o compõe (Zienkiewicz, 1980).

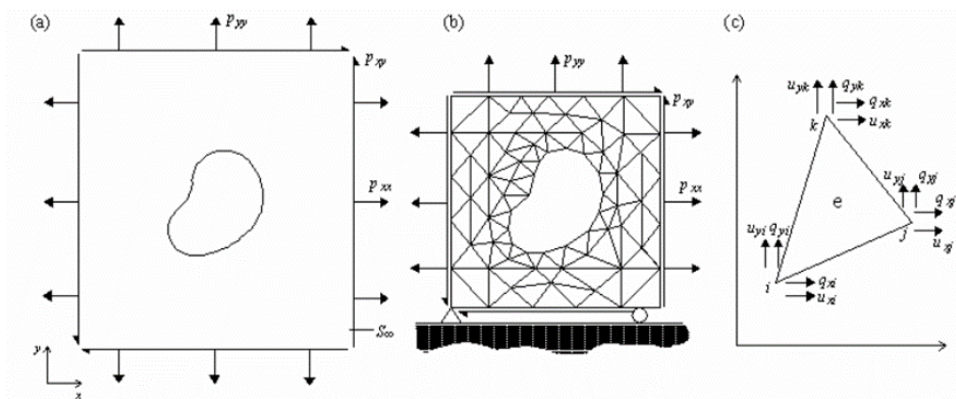


Figura 10 - Desenvolvimento do método de elementos finitos de um modelo genérico. (a) modelo geométrico; (b) condições de contorno e elementos; (c) deslocamentos e tensões em um elemento. (ZINGANO, 2002)

O método dos elementos finitos soluciona o problema por meio de matrizes de tensões e deformações, conforme a seguinte fórmula geral (Mori, 1986; Brauer, 1985):

$$[K] \{u\} = \{F\}$$

Onde: K é a matriz de rigidez;

u é a matriz deformação;

F é força.

A modelagem numérica é uma ferramenta importantíssima uma vez que depois de estabelecido os parâmetros como: propriedades geomecânicas do maciço, geometria da escavação, condições de contorno e o carregamento a que o modelo está submetido, através de análise numérica pode-se avaliar os fatores de segurança para as escavações projetadas e consequentemente a estabilidade das escavações.

5 – ESTUDO DE CASO

O estudo do local será realizado por meio da classificação RMR desenvolvido por Bienwaski (1973), apud Bienwaski, 1989, que propôs o índice de Qualidade RMR para a determinação das características do maciço rochoso. Outro levantamento importante realizado, refere-se à caracterização das principais famílias de descontinuidades presentes no maciço e também a identificação dos parâmetros que influenciam as características geomecânicas e os critérios de rupturas do maciço.

5.1 – Localização e Acesso

A área escolhida como objeto de estudo foi a cava atual da Pedreira Esperança, situada no município de Vitória de Santo Antão, 50 km da capital do estado de Pernambuco, Recife, dentro da mesorregião da Mata Pernambucana. O acesso à pedreira é feito pelo km 40 da BR-232. O mapa de situação e localização da mina é apresentado na Figura 11.



Figura 11 – Localização (Google Imagens, 2016)

5.2 – Visita de Reconhecimento

A área da pedreira Esperança é composta por uma única cava dividida em 3 níveis, inferior, intermediário e superior. O foco principal da lavra na pedreira é a produção de brita como matéria prima para a construção civil.



Figura 12 – Vista Geral da Cava da Pedreira



Figura 13 – Feições Estruturais do Corpo

5.3 - Levantamentos Dos Parâmetros Para Classificação Do Maciço

5.3.1 – RQD

O RQD foi obtido logo após uma das visitas, com a obtenção *in situ* do J_v que representa o índice volumétrico (número de descontinuidades por unidade de volume) e aplicação do valor obtido na expressão proposta por Palmström (1975).

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

A opção pela utilização de tal expressão para a estimativa do RQD deu-se pela impossibilidade de se obter dados referentes a testemunhos de sondagem. Na tabela 2 encontram-se os resultados coletados em campo.

Tabela 2 – Valores de J_v Obtidos *In Situ*

LOCAL	S ₁	S ₂	S ₃	J_v	RQD
Nível Superior	0.4m	0.6m	0.5m	6.17	94%
Nível Intermediário	0.5m	0.6m	0.5m	5.67	96%
Nível Inferior	0.5m	0.7m	0.4m	5.93	95%

Para subsidiar a obtenção do *RQD* através da correlação proposta por Palmström (1975) também foi obtido o índice *RQD* através da análise de imagens do maciço levando-se em consideração a relação proposta por Priest e Hudson (1976).



Figura 14 – Frequência de descontinuidades

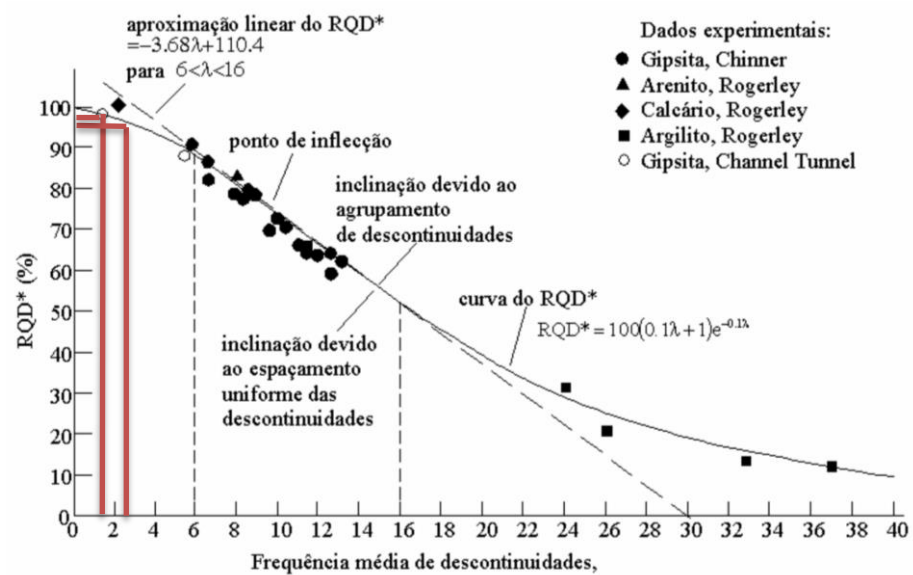


Figura 15 – Obtenção do RQD através da frequência média de descontinuidades. (Priest e Hudson, 1976)

Tabela 3 - Obtenção do RQD por meio da frequência média de descontinuidades.

SCANLINE	λ	$RQD = 100 (0.1\lambda + 1) e^{-0.1\lambda}$	RQD
Superior	2.63	$RQD = 100 (0.1 \times 2.63 + 1) e^{-0.1 \times 2.63}$	97%
Intermediário	1.81	$RQD = 100 (0.1 \times 1.72 + 1) e^{-0.1 \times 1.72}$	98%
Inferior	1.81	$RQD = 100 (0.1 \times 1.72 + 1) e^{-0.1 \times 1.72}$	98%

Por meio dos valores obtidos, podemos classificar o maciço como *EXCELENTE* com base no RQD (Tabela 4).

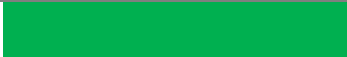
Tabela 4 – Obtenção Da Qualidade do Maciço Por Meio do RQD

RQD	Qualidade do Maciço Rochoso
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

5.3.2 - Orientação das Descontinuidades

As orientações das descontinuidades podem ser observadas com o auxílio das projeções em redes estereográficas mostradas na Figura 16; juntamente com as respectivas atitudes das principais famílias encontradas no maciço em estudo (Tabela 5).

Tabela 5 – Representação e Orientações das Principais Famílias de Descontinuidades

Famílias	Traço	Direção	Mergulho
Família A		202	80
Família B		127	79
Família C		264	73
Família D		344	28

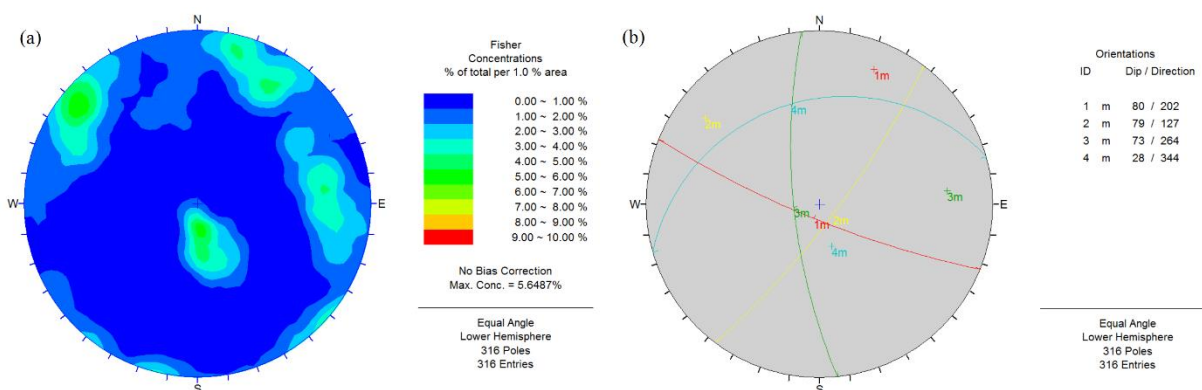


Figura 16 – Projção em rede estereográfica (a) Projção dos respectivos pólos;
(b) Definição das famílias das descontinuidades

5.4 – OBTENÇÃO DO RMR

No projeto realizado na Pedreira Esperança foram levantados os parâmetros para classificação geomecânica do maciço. Parâmetros esses que vão nos levar a obtenção do RMR, que é um dos objetivos deste trabalho.

Tendo em mãos, os dados observados em campo, os dados coletados e os dados estimados, torna-se possível a classificação do maciço, o que será demonstrado abaixo através da valoração dos parâmetros envolvidos na determinação do RMR até a determinação do mesmo.

Tabela 6 – Pesos para Obtenção do RMR para o Caso em Estudo

Parâmetro	Item	Valor	Peso
P1	Resistência à Compressão Uniaxial	175 Mpa	12
P2	RQD	95%	20
P3	Espaçamento das Descontinuidades	0.2m – 0.7m	10
P4	Condição das Descontinuidades	Nota 1	25
P5	Água Subterrânea	Ligeiramente húmido	10
P6	Ajuste devido à Orientação das Descontinuidades	Nota 2	-25

Nota 1. Superfícies ligeiramente rugosas com separação de <1mm e superfície de rocha ligeiramente alterada.

Nota 2. A orientação das descontinuidades com relação escavação possui um caráter razoável.

Por meio dos pesos e correções obtidas podemos calcular o RMR através da expressão:

$$RMR = 12 + 20 + 10 + 25 + 10 - 25$$

$$\mathbf{RMR = 52}$$

5.5 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MACIÇO

I. Determinação do GSI

Foi obtido um valor de $GSI = 62$ de acordo com a Figura 17.

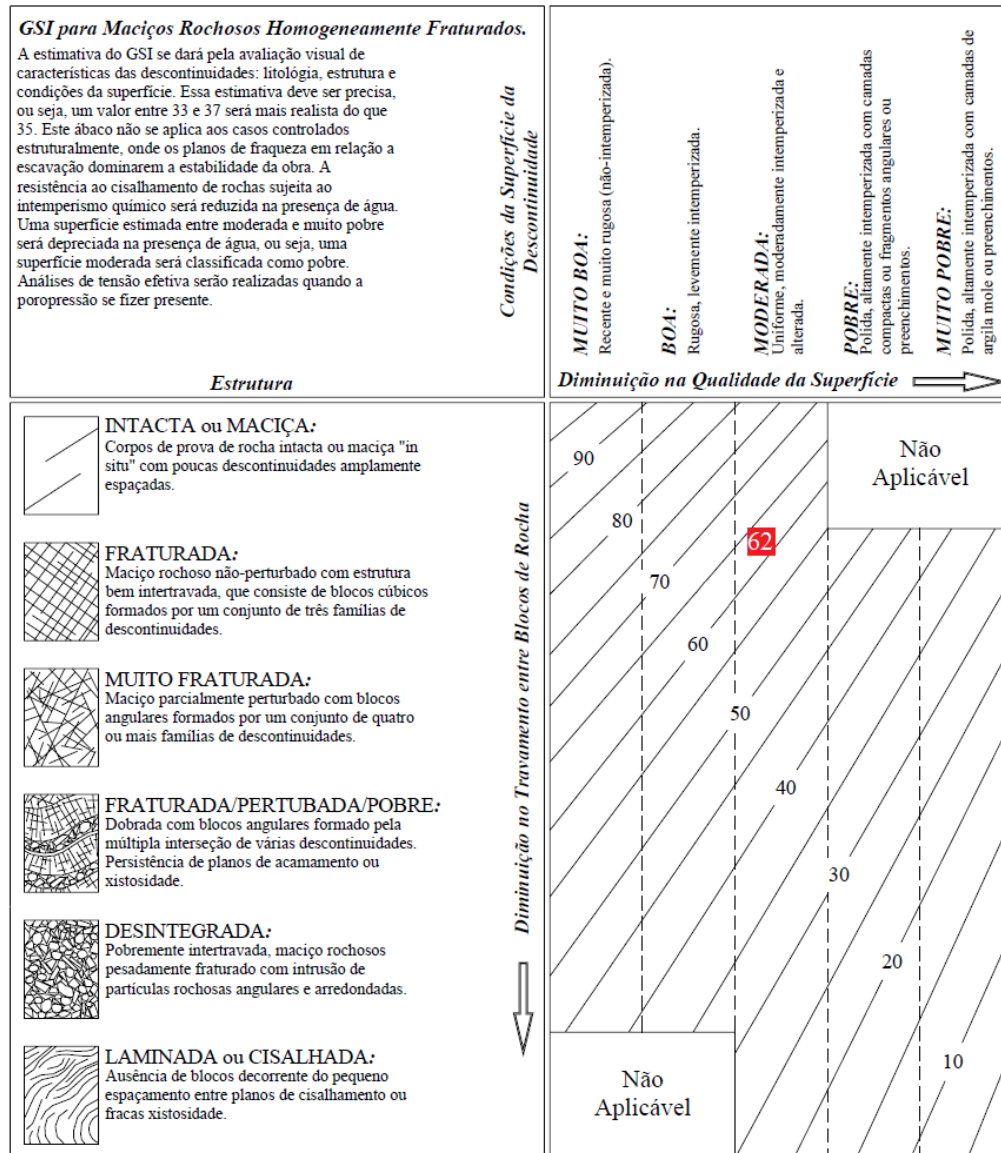


Figura 17 – Determinação do Valor de GSI

II. Determinação do parâmetro de desmonte D

Foi obtido um valor de $D = 0.7$ de acordo com as características observadas no maciço e levando-se em consideração a Figura 18

<i>Aparência da Massa Rochosa</i>	<i>Descrição da Massa Rochosa</i>	<i>Valor Sugerido para D</i>
	Detonação de pequena escala em taludes de engenharia civil resulta em modesto dano ao maciço rochoso, particularmente se o desmonte controlado é usado como mostrado no lado esquerdo na fotografia. No entanto, o alívio de estresses pode resultar em alguma perturbação.	$D = 0.7$ Desmonte Bom $D = 1.0$ Desmonte Ruim
	Taludes muito grandes de minas a céu aberto sofrem perturbação significativa devido a detonações mais intensas, e também pelo alívio do estresse provocado pela remoção de estérreo	$D = 1.0$ Desmonte de Produção
	Em algumas rochas mais suaves, a escavação pode ser levada a diante por escarificação e nivelamento, e o grau de danos para os taludes é menor.	$D = 0.7$ Escavação Mecânica

Figura 18 – Determinação do Valor de D

III. Determinação do m_b

Foi obtido o valor de $m_b = 3.099$ de acordo com a expressão

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \rightarrow m_b = 25 \exp\left(\frac{62-100}{28-14 \times 0.7}\right)$$

IV. Determinação do m_i

Foi obtido um valor de $m_i = 25$ de acordo com a Figura 19.

Tipo de Rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grossa	Média	Fina	Muito Fina
SEDIMENTAR	Clástica		Conglomerado * (21±3) Brecha / (19±5)	Arenito / 17±4	Siltito / 7±2 Grauvaca / (18±3)	Argilito / 4±2 Folhelho / (6±2) Marga / (7±2)
	Não-Clás- tica	Carbonatas	Calcário Cristalino (12±3)	Calcário Esparítico (10±2)	Calcário Micrítico (9±2)	Dolomita / (9±3)
		Evaporíticas		Gipsita / 8±2	Anidrita / 12±2	
		Orgânica				Calcário Biogénico 7±2
METAMÓRFICA	Não- foliada		Mármore / 9±3	Hornfels / (19±4) Metarenito / (19±3)	Quartzito / 20±3	
	Levemen- te foliada		Migmatito / (29±3)	Anfibolito / 26±6		
	Foliada **		Gnaiss / 28±5	Xisto / 12±3	Filito / 7±3	Ardósia / 7±4
ÍGNEA	Plutônica	Ácida	Granito / 32±3	Diorito / 25±5		
			Granodiorito / (29±3)			
	Hipabissal	Básica	Gabro / 27±3 Norito / (20±5)	Dolerito / (16±5)		
		Porfírito / (20±5)			Diabásio / (15±5)	Peridotito / (25±5)
	Vulcânica	Lava		Riolito / (25±5) Andesito / 25±5	Dacito / (25±3) Basalto / (25±5)	Obsidiana / (19±3)
		Piroclásticas	Aglomerado / (19±3)	Brecha / (19±5)	Turfa / (13±5)	

* Conglomerados e brechas podem apresentar uma ampla extensão de valores de m_i dependendo da natureza do material cimentante e do grau de cimentação, assim eles podem ter limites de valores similares a arenito até valores usados para sedimentos de granulação fina.

** Estes valores são para amostras de rocha intacta ensaiadas na direção normal do acamamento ou da foliação. Os valores de m_i serão significativamente diferentes caso a ruptura ocorra ao longo do plano de fraqueza.

Figura 19 – Determinação Do Valor De m_i

V. Determinação do S

Foi obtido o seguinte de $S = 0.0041$ de acordo com a expressão

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \rightarrow s = \exp\left(\frac{62-100}{9-3 \times 0.7}\right)$$

VI. Determinação do α

Foi obtido o seguinte valor de $\alpha = 0.502$ de acordo com a expressão

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \rightarrow \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-62/15} - e^{-20/3})$$

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de qualidade efetuado para o maciço em estudo foi de $RMR = 52$, o que classifica o maciço como de **Qualidade Razoável** (Tabela 7).

Tabela 7 - Classificação do Maciço em Função do RMR (Bienwaski, 1989)

RMR	Descrição
100 – 81	Rocha de Muito Boa Qualidade
80 – 61	Rocha de Boa Qualidade
60 – 41	Rocha de Qualidade Razoável
40 – 21	Rocha de Má Qualidade
< 21	Rocha de Muito Má Qualidade

Na Figura 20 pode ser observado os resultados obtidos através do programa de computador Roclab para os dois critérios de ruptura apresentados no presente trabalho.

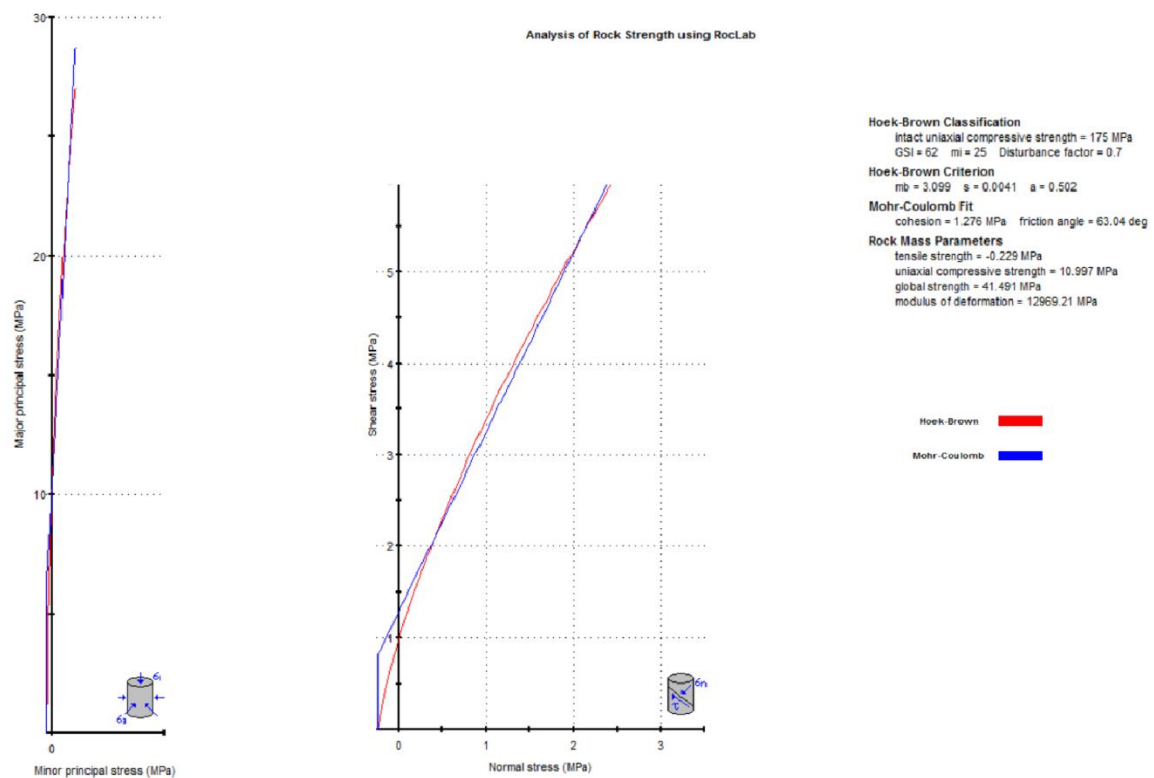


Figura 20 – Análise da Resistência do Maciço Rochoso Usando RocLab

Após determinar os critérios de resistência do maciço através da ferramenta computacional do RocLab, foi realizado um modelamento computacional com o intuito de observar as características de estabilidade da escavação, quanto a possíveis ocorrências de deslizamento, tombamento ou outros modos de ruptura do talude.

O primeiro modelo considerou o maciço como sendo um meio contínuo e com os parâmetros das descontinuidades inseridos através da classificação geomecânica GSI. Os dados de entrada estão definidos abaixo na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de resistência utilizados na primeira modelagem

Parâmetros do Maciço	Descrição
GSI	62
Resistência σ_{ci} (MPa)	175
Módulo de Deformação - Em (MPa)	12969.21
s (critério Hoek-Brown)	0.0041
a (critério de Hoek-Brown)	0.502
mb (critério Hoek-Brown)	3.099

Abaixo na Figura 21 é apresentado o modelo discretizado indicando o deslocamento total simulado.

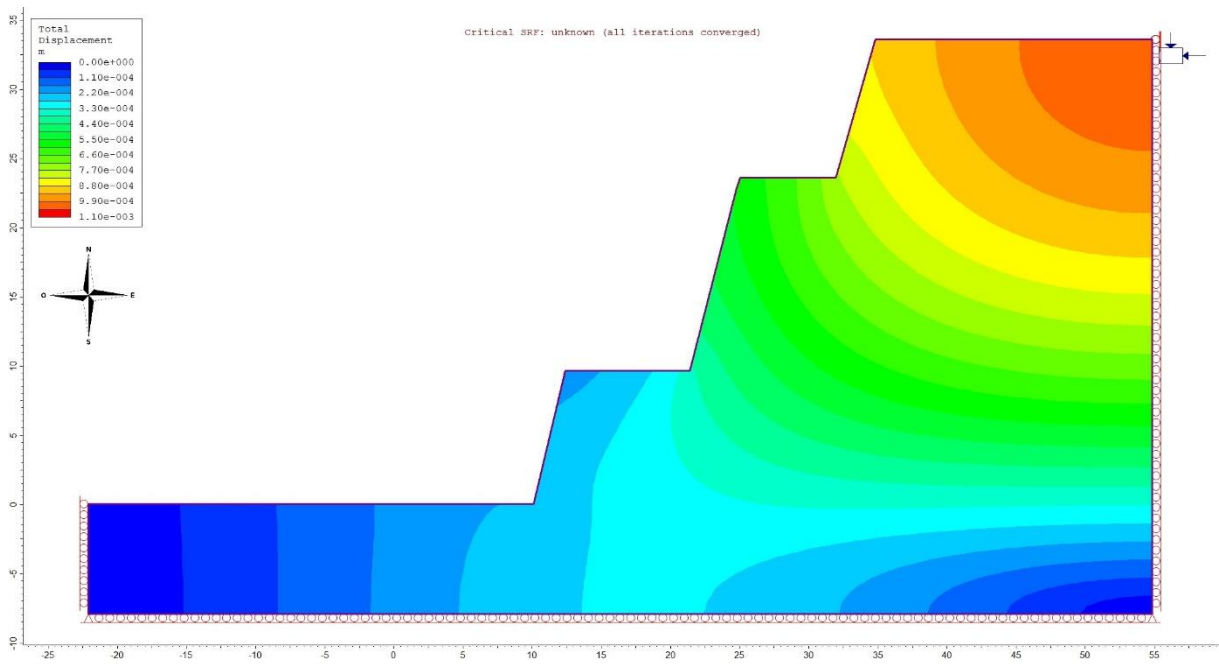


Figura 21 - Discretização do modelamento contínuo com GSI de 62

O segundo modelo foi discretizado inserindo-se no modelo contínuo as descontinuidades encontradas e caracterizadas “in situ” (Tabela 5), por meio da função “joint network”. Com a inserção das descontinuidades no maciço tentou-se obter a equivalência de

características com o primeiro modelamento, porém discretizadas pelas famílias de descontinuidades.

Na Tabela 9 é apresentado os parâmetros geomecânicos e estruturais do segundo modelo. A Figura 22 mostra a discretização do problema com as 4 famílias de descontinuidades inseridas no modelamento.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados no segundo modelo

Parâmetros do Maciço	Descrição
GSI	100
Resistência σ_{ci} (MPa)	175
Módulo de Deformação - Em (MPa)	115588.16
s (critério Hoek-Brown)	1
a (critério de Hoek-Brown)	0.5
mb (critério Hoek-Brown)	25

A Figura 22 mostra o resultado do modelamento após inserção das descontinuidades presentes no maciço, é possível observar a estabilidade para o ângulo global da mina.

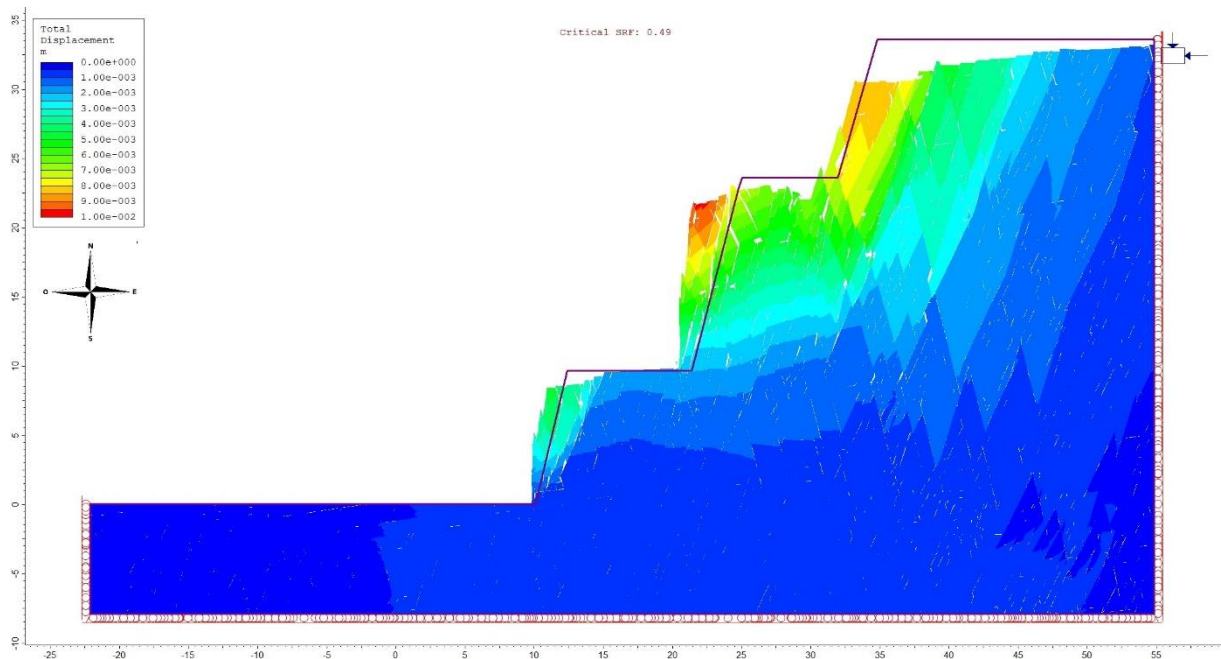


Figura 22 - Modelo mostrando condições de estabilidade

Os resultados apresentados pelos dois modelamentos indicam uma diferença relevante entre os modelos, no primeiro temos uma convergência total entre o valor do SFR e o deslocamento total máximo, o que demonstra uma impossibilidade de ruptura do talude. Já no segundo modelo contínuo e com a presença das descontinuidades, houve a obtenção de um SFR de 0.49, indicando de forma exagerada como aconteceria a ruptura do talude, nitidamente por movimento de tombamento, em condições de fator de segurança desse nível, algo distante da situação atual da escavação.

Analisando ambos os modelos, é sugestivo notar que diante das condições apresentadas pelo maciço e pelo talude da mina no momento e localização atuais, a escavação encontra-se estável, sem aparente risco de deslizamento ou desmoronamento.

CONCLUSÃO

Conforme os objetivos estabelecidos, conclui-se que o trabalho possibilitou a percepção da importância do amparo acadêmico nas observações e análises realizadas no campo da engenharia de minas, foi exigido uma grande quantidade de pesquisas e levantamentos técnicos, que pudessem embasar a obtenção dos objetivos propostos.

Sendo assim, houve êxito naquilo que foi pretendido: o conhecimento mais aprofundado das condições geomecânicas presentes na mina em estudo, a análise das condições de estabilidade dos taludes em produção, demonstrando os parâmetros de segurança atuais da mina e a estimativa de possíveis instabilidades de blocos rochosos pela existência de descontinuidades encontradas “in situ” no maciço.

Ao longo desse trabalho ficou evidente a relevância de um bom nível de conhecimento técnico para o uso de ferramentas computacionais que auxiliam a se chegar a conclusões mais confiáveis e de melhor compreensão.

O presente estudo pode vir a ser somado com outros trabalhos e investigações que venham a ser realizadas na Pedreira Esperança, como também servir de incentivo para, através de análises e investigações relativamente simples apresentadas, venham a ser aplicadas a outras mineradoras de pequeno e médio porte da região, às quais podem vir a se beneficiar e a beneficiar todo o setor de brita da região conhecendo melhor as suas respectivas características geomecânicas e de estabilidade.

BIBLIOGRAFIA

ARLINDO J. B, AARÃO A. L, MARCONI E. A & NATANAEL V. O. (1999). Utilização do Critério de Ruptura de Hoek-Brown em Mecânica de Rocha. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo.

BIENIAWSKI, ZT (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. Wiley: New York.

DEERE, D.U. MONSEES, J.E., PECK, R.B., SCHMIDT, B. (1969). Design of tunnel liners and support systems. Office of High Speed Ground Transportation, U.S. Department of Transportation, Washington.

HUDSON, J. A. e HARRISON, J.(1987). Engineering Rock Mechanics – an introduction to the principais, Pergamon Press, 444 pág., Londres.

JING, L. e HUDSON, J.A., (2002) Numerical Methods in Rock Mechanics, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., In Press, Pergamon Press(www.elsevier.com/locate/ijrmms)

PALMSTROM A., (1982). The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG Congress, New Delhi, 1982. pp. V.221 – V.228.

POTVIN, Y.; DIGHT, P.M. e WESSELOO, J. (2012). Some pitfalls and misuses of rock mass classification systems for mine design. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 2012, vol.112, n.8, pp. 01-06.

PRIEST, S.D. e HUDSON, A.J., (1976). Discontinuity spacings in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.13, pp. 135-148.

WYLLIE, D. C., MAH, C. W., & HOEK, E. (2004). Rock slope engineering: civil and mining. London, Spon Press.

ZINGANO, A.C. (2002) Modelamento Geomecânico para o Dimensionamento de Pilares de Carvão. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

ZIENKIEWICZ, O.C. (1980) El Método de Los Elementos Finitos, Reverte, Barcelona.