



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ

FRANCISCO JOSÉ PIMENTA DIOGO FILHO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS  
GEOMECÂNICOS NA DETERMINAÇÃO DO *ROCK MASS  
RATING*.**

ARAXÁ/MG

2019

FRANCISCO JOSÉ PIMENTA DIOGO FILHO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS  
GEOMECÂNICOS NA DETERMINAÇÃO DO *ROCK MASS  
RATING*.**

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

Orientador: Prof. Me. Allan Erlikhman Medeiros Santos.

ARAXÁ/MG

2019

FRANCISCO JOSÉ PIMENTA DIOGO FILHO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS NA  
DETERMINAÇÃO DO ROCK MASS RATING

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

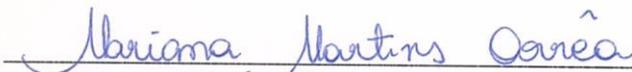
Araxá, 10 de setembro de 2019



\_\_\_\_\_  
Presidente e Orientador: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos  
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. Mariana Martins Corrêa  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

**DEDICO ESTE TRABALHO**

*Aos meus pais (in memoriam), que me deram a vida e uma família espetacular.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e por colocar tantas pessoas especiais em minha trajetória.

A minha mãe, por sempre ser uma referência de força, honestidade e positividade.

A minha família, que se fez presente e demonstrou grande apoio em todos os momentos.

Aos meus amigos, que de diferentes formas me auxiliaram durante minha graduação e na confecção do presente trabalho.

Ao meu orientador, que exerceu de maneira paciente e efetiva a sua função para fim da concepção deste projeto.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Com o intuito de se explorar as conjunturas estruturais de minas à céu aberto, este trabalho apresenta um estudo das condições geomecânicas de taludes de composição rochosas. Em posse de um banco de dados com espaço amostral equivalente a três mil e duas amostras de uma cava locada na região do quadrilátero ferrífero, foi estabelecida a classificação dos maciços rochosos via RMR – *Rock Mass Rating* – além do estabelecimento de análises descritivas das variáveis envolvidas. Ainda em abordagem à estatística multivariável, aplicou-se a análise de componentes principais (PCA) objetivando a identificação da influência das oito variáveis iniciais na construção da resposta (RMR). Obteve-se o número de componentes principais igual a dois, onde essas combinações lineares foram discutidas em função de suas variáveis originárias. Também foi abordado um padrão identificado na relação entre a classificação geomecânica dos taludes junto a sua coordenada, ainda que a sua localização não compreenda o grupo de variáveis diretas ao RMR.

**Palavras-chaves:** *Rock Mass Rating*; Análise de Componentes Principais; Análise multivariada; Resistência Geomecânica; Maciço Rochoso.

## ABSTRACT

In order to explore the structural conjunctures of open pit mines, this work presents a study of the geomechanical conditions of rocky slopes. The classification of rock masses via RMR (Rock Mass Rating) was established by a database with sample space equivalent to three thousand and two samples obtained from Cuadrilátero Ferrífero region, as well as the establishment of descriptive analyzes of the variables involved. Also, in the approach to multivariate statistics, the Principal Component Analysis (PCA) was applied to identify the influence of the eight initial variables in the response construction of the RMR system. The number of principal components equal to two was obtained, where those linear combinations were discussed as a function of their original variables. It also addresses a pattern identified in the relationship between the geomechanical classification of the slopes along its coordinate, although its location it is not included in the group of direct variables of the RMR system.

**Key words:** Rock Mass Rating; Principal Component Analysis; Multivariate Analysis; Geomechanical resistance; Rock Mass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento para cálculo do RQD.....	17
Figura 2 - Medida de espaçamento entre descontinuidades.....	18
Figura 3 - Curva de tensão ( $\uparrow$ ) versus deformação ( $\rightarrow$ ).....	27
Figura 4 - Modelo de predição do módulo de deformabilidade.....	27
Figura 5 - Exemplo de <i>Scree Plot</i> .....	33
Figura 6 - Etapas para a obtenção dos resultados.....	35
Figura 7 - Etapas da ACP.....	36
Figura 8 - Frequência do resultado categórico RMR.....	37
Figura 9 - Distribuição dos resultados em coordenada X,Y, e Z.....	38
Figura 10 - Setorização da cava em função da profundidade.....	38
Figura 11 - Comportamento dos grupos em função do RMR.....	39
Figura 12 - Frequência do Modulo de deformação.....	40
Figura 13 - Densidade do <i>Em</i> em função dos grupos Z.....	41
Figura 14 - Frequência dos resultados de ângulo de atrito e coesão das amostras.....	42
Figura 15 - Perfil dos autovalores das variáveis.....	44
Figura 16 - Dispersão dos resultados para as duas componentes principais.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apuração de resistência do maciço rochoso via martelo de geólogo.....	15
Tabela 2 - Relação entre RQD e qualidade da rocha.....	21
Tabela 3 - Resistência à compressão uniaxial para RMR.....	23
Tabela 4 - Qualidade da rocha (RQD) para RMR. ....	23
Tabela 5 - Espaçamento das descontinuidades para RMR.....	23
Tabela 6 - Condições das descontinuidades para RMR.....	24
Tabela 7 - Água subterrânea para RMR.....	24
Tabela 8 - Orientações das descontinuidades para RMR. ....	24
Tabela 9 - Parâmetros para a condição da descontinuidade. ....	25
Tabela 10 - Classificação dos maciços pelo sistema RMR. ....	25
Tabela 11 - Relação da coesão e ângulo de atrito com RMR. ....	28
Tabela 12 - Construção dos autovetores.....	31
Tabela 13 - Construção da Componentes.....	32
Tabela 14 - Equações para a determinação do módulo de deformabilidade.....	40
Tabela 15 - Matriz de Correlação.....	42
Tabela 16 - Autoanálise das componentes principais. ....	44
Tabela 17 - Componentes principais.....	45

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1. CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	13
2.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL .....	14
2.1.2. ÍNDICE DE QUALIDADE DA ROCHA (RQD) .....	15
2.1.3. ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES.....	18
2.1.4. CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES .....	19
2.2. CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	20
2.2.1. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO RQD.....	21
2.2.2. RMR – ROCK MASS RATING.....	21
2.3. APLICAÇÕES DO RMR EM MINERAÇÕES A CÉU ABERTO.....	26
2.3.1. PREDIÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE .....	26
2.3.2. INDUÇÃO DA COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO .....	28
2.4 ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	28
2.4.1. CONSIDERAÇÕES MATEMÁTICAS .....	29
2.4.2. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS VIA MATRIZ DE CORRELAÇÃO.....	30
2.4.3. FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS.....	31
2.4.4. OBTENÇÃO DO NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	32
2.4.5. APLICAÇÕES DE ACP NAS GEOCIÊNCIAS .....	33
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	34
3.1. MATERIAIS .....	34
3.2. METODOLOGIA APLICADA .....	34
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
4.1. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – RMR.....	36
4.2. ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DO MACIÇO ROCHOSO .....	40
4.2.1. MÓDULO DE DEFORMABILIDADE.....	40
4.2.2. COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO .....	41
4.3. MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS E O VALOR DE RMR. ....	42
4.4. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	43
4.4.1. RELEVÂNCIA DAS COMPONENTES.....	43
4.4.2. Escolha do número de componentes principais .....	44
4.4.3. Interpretação das componentes .....	45
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	48
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Os taludes são importantes estruturas no âmbito de uma mineração a céu aberto, sendo responsáveis por permitir a extração dos recursos de forma segura e viável. Dentro do contexto de uma mineração a céu aberto, existem basicamente três tipos de taludes: talude de bancada, talude inter-rampa e talude global (pit final). A complexidade de estudos aplicados a estas estruturas está basicamente vinculadas às diferentes características estruturais e de composição do maciço rochoso. Em uma mina a céu aberto com o constante avanço da operação de lavra, é comum se obter níveis de acesso cada vez mais baixos e um número crescente de taludes que irão compor os limites da cava. Os taludes podem estar presentes tanto na cava como também nas vias de acesso.

Os maciços rochosos se comportam de maneiras diferentes devido a pluralidade de variáveis atuantes, que envolvem suas modificações – naturais e/ou antrópicas –, condições de tensões aplicadas sobre os maciços e características da rocha e das descontinuidades presentes. Quando se somam fatores como ocorrência de dobramentos e graus elevados de fraturamentos que favorecem o intemperismo, o maciço rochoso começa a se comportar de forma equiparável à solos quanto a sua resistência, e conseqüentemente aumenta os riscos quanto à estabilidade.

A investigação da estabilidade de maciços rochosos é importante e precisa ser realizada de forma contínua, em função do dinamismo do avanço das frentes de lavra. O reconhecimento de campo acerca das variáveis geológicas presentes em um maciço rochoso é o primeiro passo em um estudo de estabilidade. Atualmente são encontrados diversos métodos para averiguação das condições dos maciços como: mapeamento de superfície, utilizado para o reconhecimento dos tipos de estrutura das rochas, coleta de amostras, medidas de atitude de descontinuidade, avaliação das condições da rocha e das descontinuidades, além da determinação de classificações geomecânicas. Outras técnicas vêm ganhando o cenário de avaliação de maciços rochosos, tais como a prospecção geofísica, no reconhecimento de heterogeneidade e profundidades das alterações, e também técnicas clássicas como a utilização de testemunhos de sondagens.

Os sistemas de classificação de maciços rochosos foram criados para aplicação em minerações subterrâneas e construções de túneis. Posteriormente muitos desses sistemas foram criados e adaptados para ambientes de lavra de mineração a céu aberto, onde o estado de tensão difere por completo de uma situação de mineração subterrânea. A utilização das classificações geomecânicas é imprescindível para estudos de estabilidade, uma vez que permite a estimação de parâmetros de resistência e comportamento em geral do maciço rochoso. Dentre os sistemas de classificação geomecânica destaca-se o Rock Mass Rating, por sua ampla aplicação. O *Rock Mass Rating* (RMR) proposto por Bieniawski (1989), é obtido por meio do somatório da pontuação gerada através de parâmetros referentes à rocha e as descontinuidades, de natureza qualitativa e quantitativa. Além do RMR, outros sistemas também são comumente utilizados e discutidos em estudos de classificação de maciços rochosos, sendo: Sistema Q (Rock Mass Quality), proposto por Barton; GSI (Geological Strength Index), proposto por Hoek; RQD (Rock Quality Designation), proposto por Deere; e RSR (Rock Structure Rating), desenvolvido por Wickham *et al.*

Dentro dos parâmetros citados no parágrafo anterior quanto às características da rocha e descontinuidade, tem-se: resistência à compressão uniaxial do material rochoso intacto; grau de fraturamento do maciço através do RQD; espaçamento das descontinuidades; condições das descontinuidades; condições hidrogeológicas; e Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação. Esses parâmetros regem a construção da metodologia aplicada nesta pesquisa – Sistema *Rock Mass Rating*.

Ainda que os sistemas de classificação de maciços rochosos não tenham sido concebidos com o fim de aplicações na mineração, historicamente os parâmetros passaram por adaptações para este uso. A utilização de parâmetros indicadores do estado geomecânico de maciços rochosos deu-se a partir da prática de escavações subterrâneas em obras civis.

A presente pesquisa tem como objetivo principal o estudo da influência do comportamento dos parâmetros geomecânicos na concepção do RMR, para uma mina a céu aberto de ferro. Assim, a primeira parte da pesquisa consistiu da realização da classificação de maciços rochosos, de acordo com o RMR. Em seguida, foi desenvolvido um estudo, por meio de técnica da estatística multivariada, especificamente a análise de componentes principais, com o objetivo de avaliar a

influência das variáveis no resultado da classificação do RMR. A parte final da pesquisa propõe, uma redução no número de componentes que orientam a classificação geomecânica fundamentado nas combinações lineares obtidas na Análise de Componentes Principais (ACP).

O trabalho está dividindo em cinco capítulos, onde é exposto inicialmente a introdução, seguida pela revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões e a conclusão. A introdução apresenta a inserção do tema, descreve o trabalho, objetivos e a estruturação dos capítulos. A revisão bibliográfica apresenta a pesquisa literária utilizada para a realização do estudo. O capítulo de metodologia retrata os materiais e métodos utilizados na pesquisa. O quarto capítulo refere aos resultados e discussões, e apresenta todas as interpretações das análises realizadas durante o trabalho. Por fim, o capítulo de conclusões finda a monografia destacando os entendimentos e recomendações para futuros trabalhos na mesma linha de pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta de forma breve os conceitos acerca do aporte teórico em que a presente pesquisa está fundamentada. Assim, são apresentadas as contribuições de autores sobre a caracterização e sistemas de classificação de maciços rochosos, além da análise estatística multivariável (ACP) que foi aplicada ao banco de dados.

### **2.1. CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS**

Os maciços rochosos podem ser definidos como um conjunto de blocos de rocha intacta e suas descontinuidades (Mesquita, 2008). Os maciços rochosos podem apresentar várias particularidades devido as diferentes litologias, processos tectônicos e de intemperismo.

Dessa forma, a caracterização do maciço rochoso é de fundamental importância no entendimento, planejamento e execução de projetos na mineração. As características do maciço rochoso podem ser obtidas em campo e também em ensaios laboratoriais, promovendo o conhecimento da rocha intacta formadora do maciço e principalmente das descontinuidades. Tais descontinuidades carregam as características mais importantes dos maciços, influenciando diretamente na resistência e no comportamento geomecânico dos maciços (Jaques, 2014).

### 2.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência à compressão uniaxial é considerada por Vidal (1999) como a capacidade de determinado material em suportar forças compressivas. Essas forças são medidas em função da tensão necessária para gerar ruptura no corpo ensaiado. Tem-se como variáveis importantes para a resistência à compressão uniaxial resultante: porosidade, índice de flexão, granulometria, estado de alteração, microfissuras e posicionamento estrutural.

O ensaio responsável pela apuração do módulo da resistência à compressão uniaxial é, segundo Frascá (2002), uma ação provocadora de esforços compressivos sob o corpo de prova a fim de se estipular um indicador quanto a sua integridade física. Esses esforços podem ser realizados em uma única direção (uniaxial) ou em mais direções como no ensaio triaxial.

Freitas (2011) descreve como teste de resistência simples ou uniaxial, o teste realizado em laboratório onde uma força é aplicada ao corpo de prova com deformação não reversiva, onde se estabelece o indicador de resistência em função da carga máxima uniaxial que a rocha é capaz de suportar sem entrar em colapso. O teste é simples, entretanto, a preparação da amostra possuiu um elevado grau de complexidade devido a necessidade de se manter a integridade da amostra para que seja mais fiel à realidade.

A complexidade do processo de amostragem relatado no parágrafo anterior, impossibilita muitas vezes a aplicação das metodologias laboratoriais. Com isso, têm-se testes em campo com maiores erros atribuídos a resposta, em contrapartida, é vantajoso se trabalhar com o maciço *in situ* – maior representatividade. Os testes de martelos de Schimdt e geólogo são alternativas para tal prática.

O martelo de Schimdt é um aparelho que permite obter *in situ*, a resistência à compressão simples de um maciço rochoso de forma não destrutiva ao corpo aferido. A dureza da rocha é obtida de forma instantânea no equipamento. É um ensaio de resistência superficial, sendo os valores obtidos meramente representativos, e permitem avaliar a homogeneidade, o nível de resistência e decidir se é necessário ou não fazer ensaios mais complexos (Viles *et al.*, 2010).

O teste do martelo de geólogo possui uma alta simplicidade metódica. Essa característica pode levá-lo a uma aplicação mais atrativa. O fomento do uso desse método não se dá apenas à sua facilidade, visto que os resultados possuem aspectos imediatos e coerentes com a realidade. A avaliação da resistência é obtida em intervalos categóricos relacionados à característica do material em resposta à aplicação de golpes do martelo de geólogo ISRM (1981). Os intervalos de resistência dos maciços rochosos estão dispostos na Tabela 1 de forma elencada a característica obtida pelo pesquisador em campo.

Tabela 1 - Apuração de resistência do maciço rochoso via martelo de geólogo.

Grau	Resistência (Mpa)	Descrição	Característica
R0	0,25 a 1	Extremamente Branda	Riscada pela unha
R1	1 a 5	Muito Branda	Ocorrência de farelo após golpe com martelo.
R2	5 a 25	Branda	Geração de marca da ponta do martelo no maciço após golpe firme.
R3	25 a 50	Resistência Média	Amostras fraturadas com único golpe de martelo / Não apresenta traço com uso de canivete.
R4	50 a 100	Resistente	Mais de um golpe de martelo para fraturar a rocha.
R5	100 a 250	Muito Resistente	Muitos golpes de martelo para fraturar a rocha
R6	>250	Extremamente Resistente	Geração somente de lascas após golpes de martelo

Fonte: Adaptado de ISRM (1981)

### 2.1.2. ÍNDICE DE QUALIDADE DA ROCHA (RQD)

Com a finalidade de fornecer uma estimativa quantitativa da qualidade de um corpo rochoso, Deere *et al.* em 1967, segundo Hoek, *et al.* (1993), desenvolveram o índice de qualidade da rocha (RQD). Esse índice é gerado a partir de amostras de sondagens com

no mínimo 54,7 mm de diâmetro, segundo a recomendação da International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1978), e em função da porcentagem de pedaços ilesos com mais de 100 mm no comprimento total do testemunho.

Redondo (2003) relata a utilização histórica do RQD, ressaltando a aplicação do índice RQD em túneis e rodovias nos EUA por Deere em 1965 – dois anos após a concepção do modelo também por Deere. Por conseguinte, novos estudos foram realizados e publicados até a consolidação e reconhecimento internacional desse índice em 1968 com a publicação do livro *Rock Mechanics in Engineering Practice* por Stagg e Zienkiewicz (1970).

O RQD é calculado pela Equação 1:

$$RQD = \frac{\sum x_i}{L} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $x_i$  é o comprimento individual dos fragmentos de testemunho superiores a 10cm e L é o comprimento total do testemunho em estudo. Ainda de acordo com Deere (1989), o procedimento da Figura 1 ilustra o cálculo do RQD.

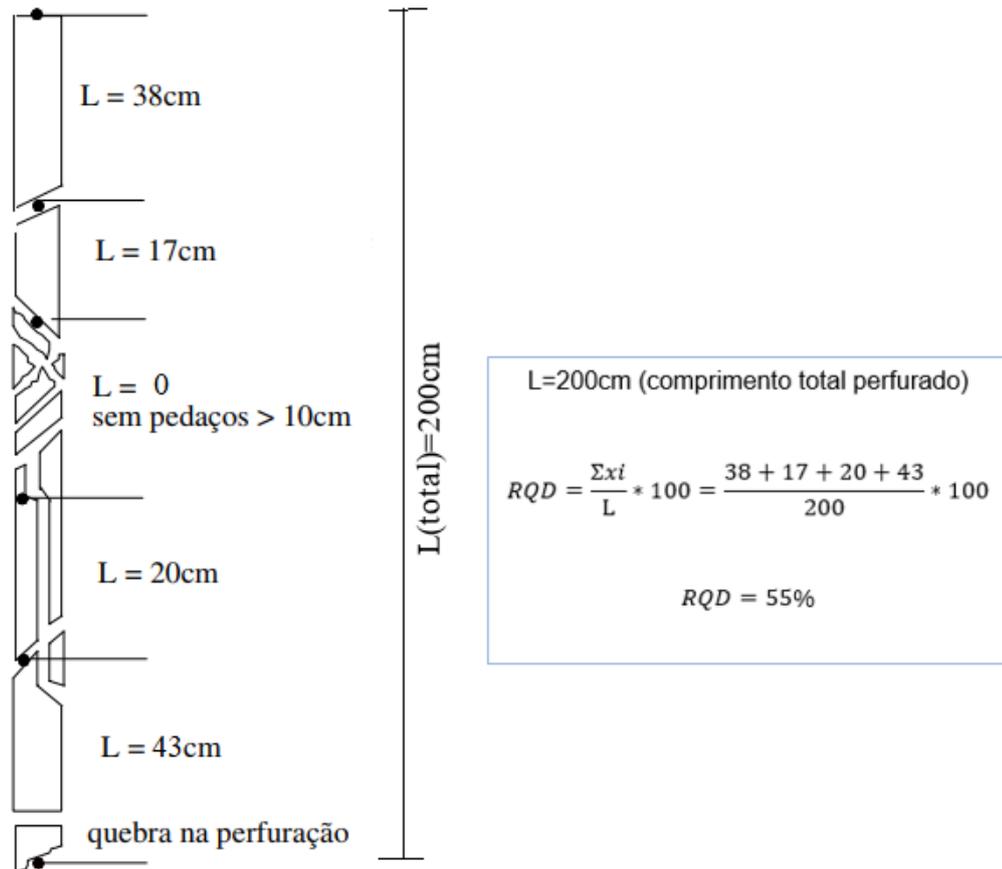


Figura 1 - Procedimento para cálculo do RQD  
 Fonte: Adaptado de Deere (1989).

No caso da ausência de testemunhos de sondagem, mas presença dos traços de descontinuidades visíveis em exposições de superfície ou aditamentos de exploração, estima-se o RQD através do número de descontinuidades por unidade de volume ( $J_v$ ). Este método foi sugerido por Palmström (1982), dado pela Equação 2.

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

O índice RQD constitui um indicador simples e econômico, porém possui alta influência da orientação do poço por se tratar de um parâmetro com dependência direcional. A utilização da contagem volumétrica das descontinuidades possui alto potencial para a redução desse vínculo de dependência de orientação (Hoek, *et al.*, 1993).

### 2.1.3. ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES

O espaçamento de descontinuidades controla em grande proporção o tamanho de blocos de rocha. Vários espaçamentos próximos tendem a reduzir a coesão do maciço enquanto espaçamentos mais distantes tendem a produzir condições de intertravamento (ISRM, 1978). O espaçamento de descontinuidades pode até mesmo mudar a forma de ruptura do maciço rochoso, como por exemplo mudar da ruptura planar para a circular (ISRM, 1978). Ainda de acordo com a referência, o espaçamento é ainda mais importante quando existem outras condições favoráveis à deformação como a baixa resistência e descontinuidades suficientes para produzir deslizamentos.

A medida do espaçamento de descontinuidades é utilizada por Priest e Hudson (1976) como sendo a distância entre os pontos onde as descontinuidades pertencentes a mesma família cruzam uma linha reta através do mesmo bloco. A Figura 2 ilustra a definição de Priest e Hudson com  $n$  números de descontinuidades.

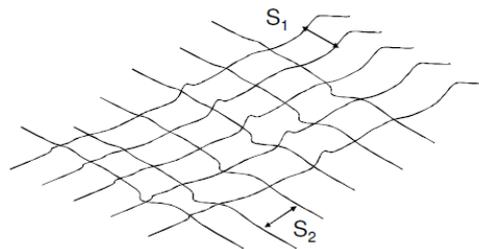


Figura 2 - Medida de espaçamento entre descontinuidades.  
Fonte: Adaptado de Priest e Hudson (1976).

Os autores ao analisarem aproximadamente 7 mil valores de espaçamento de descontinuidades de maciços rochosos, estimaram uma relação exponencial negativa com o RQD na correlação da Equação 3.

$$RQD = 100e^{(-0,1\lambda t)} (0,1\lambda + 1) \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\lambda$  representa a frequência da descontinuidade.

Vargas (2001) descreve que a medida do espaçamento das descontinuidades é relevante já que a densidade e locação da descontinuidade em questão pode ser inferida a partir desta medida.

A relação entre o volume de um bloco e o espaçamento das descontinuidades é discutida por Ávila (2012) como sendo uma interação proporcional. Em contrapartida, o volume

possui panorama inverso, visto que um maior espaçamento condiz com menor número de fraturas e maior a grandeza volumétrica de rocha intacta.

#### 2.1.4. CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES

As condições das descontinuidades abrangem parâmetros como a persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e alteração das descontinuidades, que são importantes para a classificação dos maciços rochosos, segundo Caicedo (1995). Estas características são definidas a seguir:

- **Rugosidade:** as características da superfície da descontinuidade possuem relevante impacto no comportamento ao cisalhamento das paredes referentes. Predominantemente, a rugosidade ou aspereza é um dos fatores de maior influência nas suas propriedades mecânicas. Essa constatação é realizada por Fleury e Assis (2001) que trabalharam com tal relação utilizando o método fotoelástico para mensurar a distribuição de tensões nas descontinuidades de rocha em função de diferentes condições de aspereza;
- **Abertura:** Ávila (2012) descreve a abertura como variável importante que impacta outros parâmetros característicos das rochas. Como este parâmetro define a distância entre os dois planos que formam a descontinuidade, sua grandeza está associada ao preenchimento e alterabilidade da ruptura. A alteração da superfície é fortemente influenciada pelo volume de água que pode fluir pelo maciço rochoso, assim como na deposição de material para preencher este espaço;
- **Persistência:** pode ser chamada de continuidade e comprimento das descontinuidades, se caracterizando como um considerável indicador tanto para o cálculo de densidade dos blocos como também para condicionar a descontinuidade quanto ao seu espaço vazio, que juntamente a abertura irá formar o volume vazio entre os planos da descontinuidade (Vargas, 2001);
- **Preenchimento:** As massas mais comumente encontradas em preenchimentos de descontinuidades são areias, siltes, argilas, brechas e milonitos segundo Caicedo (1995), podendo também ser encontrados filmes de materiais como quartzo, pirita, carbonatos, entre outros. De acordo com Ávila (2012) os preenchimentos de descontinuidades estão condicionados a espessura e aspereza da ruptura como também as características próprias do material depositado, como resistência, permeabilidade e deformabilidade;

- Alteração das paredes da descontinuidade: a ação de intemperismo modifica o plano da descontinuidade e constitui um dos parâmetros para classificação das rochas, que é descrito pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1998) em cinco classes:

1- Não alterada/fresca: sem sinais visíveis de alteração, a rocha é fresca e com cristais brilhantes;

2- Rocha levemente alterada: descontinuidades descoloridas podendo ou não possuir preenchimento fino;

3- Rocha moderadamente alterada: descoloração leve, podendo conter preenchimento de material alterado;

4- Rocha altamente alterada: descoloração através da rocha e o material é parcialmente friável. Maior fração da rocha intacta somado a presença de grãos separados em menor proporção;

5- Rocha completamente alterada: composição da rocha por massa friável e descolorida, possuindo aparência externa a um solo.

## 2.2. CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS

A classificação de maciços rochosos é importante e válida na fase de projetos de empreendimentos, de forma não onerosa, simples e objetiva como forma de entender o comportamento dos maciços como parâmetros de resistência em cada caso analisado, prevendo os sistemas de suporte adequados, geometria das escavações, sequência do desmonte e tempo de autossustentação das paredes (ABGE, 1998).

A classificação se inicia com o estudo de características dos maciços rochosos em campo e em laboratório, que fornecem dados tanto quantitativos quanto qualitativos. No entanto, Hoek e Brown (1997) ponderam que os sistemas de classificação possuem limitações, principalmente porque no estágio inicial do empreendimento, muitas informações acerca do maciço rochoso não estão disponíveis, como por exemplo: estado das tensões *in situ*, dados hidrogeológicos, geometria da cava e outras. Porém à medida que estes dados se tornam acessíveis, devem ser anexados aos sistemas de classificação dos maciços rochosos.

De acordo com Jaques (2014), a classificação de maciços começou a se desenvolver recentemente. Ritter em 1879 tentou de forma empírica, propor um modelo para projetos de túneis e suportes para fins de transporte. Atualmente, os sistemas de classificação mais utilizados em projetos de engenharia são os sistemas: Q, desenvolvido por Barton *et al.* (1974); RMR, proposto por Bieniawski (1989); e GSI por Hoek (1993).

### 2.2.1. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO RQD

O RQD, Índice de Qualidade da Rocha, descrito no item 2.1.2., também é considerado um sistema de classificação de maciços rochosos, desenvolvido por Deere *et al.* (1967).

Segundo os autores, existe uma relação entre o valor numérico calculado do índice RQD e a qualidade da rocha, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Relação entre RQD e qualidade da rocha.

<b>RQD (%)</b>	<b>Qualidade da rocha</b>
<25	Muito ruim
25-50	Ruim
50-75	Regular
75-90	Boa
90-100	Excelente

Fonte: Deere *et al.* (1967).

### 2.2.2. RMR – ROCK MASS RATING

A primeira aparição do sistema RMR foi em 1976 por Bieniawski. Adicionados novos estudos, o sistema sofreu mudanças e foi apresentado novamente por Bieniawski em 1989 com nova abordagem quanto aos parâmetros e com uma expansão da gama de aplicações. O *Rock Mass Rating* (RMR), tem o intuito de avaliar parâmetros de

deformação e resistência para estipular de forma preliminar a capacidade temporal de auto sustentação do bloco. Outras abordagens do RMR são as correlações com outras grandezas (Redondo, 2003).

Serra e Ojima (1998) relatam que o sistema RMR foi desenvolvido com os objetivos de caracterizar os parâmetros condicionantes do comportamento dos maciços rochosos, compartimentar uma formação rochosa em classes de maciço com qualidades distintas, fornecer parâmetros para a compreensão das características de cada classe de maciço, prover dados quantitativos para o projeto geomecânico e servir como referência a comunicação de dados na própria obra e entre obras distintas.

Com referência a Bieniawski (1989), o sistema é tido como conservador para a mineração. O sistema foi desenvolvido para obras de engenharia civil, especificamente para construção de túneis rasos. Por esse motivo, iniciou-se estudos com o fim de adaptação do método para a indústria da mineração. Laubscher em 1977 e 1984; Laubscher e Taylor em 1976; e Laubscher e Page no ano de 1990 descreveram um sistema de classificação de massa modificado para mineração aceitando o valor padrão de RMR, e o ajustando para compensar estresses *in situ* e induzidos, alterações de tensão e os efeitos de detonação e intemperismo (Hoek, *et al.*, 1993).

Por mais que o sistema RMR tenha passado por diversas modificações em propósito de melhores resultados para diferentes aplicações, este sistema não perdeu sua substancialidade (Ávila, 2012). Inicialmente o sistema continha como referência oito parâmetros condicionantes à caracterização geomecânica do maciço, contudo, foi reconstituído com seis parâmetros que compõe a classificação de valores ponderados e que devem ser posteriormente somados. (Freitas, 2011). Sendo esses, segundo o mesmo autor:

- Resistência à compressão uniaxial do material rochoso intacto, apresentado na Tabela 3;
- Grau de fraturamento do maciço através do RQD, apresentado na Tabela 4;
- Espaçamento das descontinuidades, apresentado na Tabela 6;
- Condições das descontinuidades, apresentado na Tabela 6 e Tabela 9;
- Condições hidrogeológicas, apresentado na Tabela 7;

- Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação, apresentado na Tabela 8.

Com a meta de se gerar a classificação geomecânica por RMR, o maciço deve ser dividido em secções que demonstram uniformidades quanto a sua geologia, sendo essas avaliadas separadamente (Bieniawski, 1989).

Tabela 3 - Resistência à compressão uniaxial para RMR.

CLASSIFICAÇÃO									
Parâmetro		Intervalo de valores							
1	Resistência da rocha intacta (MPa)	Índice de carga pontual (PLT)	>10	4-10	2-4	1-2	Para valores menores recomenda-se o teste de comp. uniaxial		
		Resistência compressão uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Valor		15	12	7	4	2	1	0	

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

Tabela 4 - Qualidade da rocha (RQD) para RMR.

2	Designação da qualidade da rocha (RQD%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Valor	20	17	13	8	3

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

Tabela 5 - Espaçamento das descontinuidades para RMR.

3	Espaçamento das descontinuidades (cm)	>200	200-600	60-20	20-6	<6
	Valor	20	15	10	8	5

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

Tabela 6 - Condições das descontinuidades para RMR.

Condições das descontinuidades	Superfícies muito rugosas, não-contínuas e sem separação, parede da rocha não alterada	Superfícies pouco rugosas, separação < 1 mm, paredes da rocha pouco intemperizadas	Superfícies pouco rugosas, separação < 1 mm, paredes da rocha muito intemperizadas	Superfícies estriadas ou gouge < 5 mm (espessura) ou separação 1 – 5mm (contínua)	Gouge mole > 5mm (espessura) ou separação > 5mm (contínua)
Valor	30	25	20	10	0

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

Tabela 7 - Água subterrânea para RMR.

Água subterrânea	Influxo por 10m no comprimento do túnel (l/m)	Sem valor	<10	10-25	25-125	>125
	Pressão de água na junta/ $\sigma$ principal maior	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Com fluxo	
Valor	15	10	7	4	0	

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

Tabela 8 - Orientações das descontinuidades para RMR.

Orientações da direção e mergulho	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

A Tabela 9 expande as variáveis que ponderam as condições das descontinuidades expressa na Tabela 5.

Tabela 9 - Parâmetros para a condição da descontinuidade.

Valor	6	4	2	1	0
Comprimento da descontinuidade (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
Valor	6	4	2	1	0
Abertura (mm)	Sem abertura	<0,1	0,1 - 1	1 - 5	> 5
Valor	6	4	2	1	0
Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Pouco Rugosa	Lisa	Estriada
Valor	6	4	2	1	0
		Preenchimento duro		Preenchimento mole	
Preenchimento (mm)	Não há	<5	>5	<5	>5
Valor	6	5	3	1	0
Alteração	Não há	Pouco alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

A Tabela 10 relaciona o resultado quantitativo (valor) a variáveis categóricas (classe, e descrição da rocha). Desta forma, o resultado RMR pode ser discutido das três diferentes formas apresentadas na tabela 9, sendo a “descrição da rocha” a forma mais clara de se abordar a condição de qualidade geomecânica do maciço devido a utilização de adjetivos.

Tabela 10 - Classificação dos maciços pelo sistema RMR.

Classificação do maciço rochoso determinada a partir dos valores totais					
Valor	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 Bieniawsk (1989)

### 2.3. APLICAÇÕES DO RMR EM MINERAÇÕES A CÉU ABERTO

Inicialmente o RMR atuava apenas na construção de túneis, posteriormente foram desenvolvidas outras aplicações, como para a determinação de propriedades mecânicas de maciços rochosos. O RMR é um recurso que pode compor projetos de estabilidade de encostas próximo a aberturas de túneis, como também permitir estimativas da deformabilidade de fundações – pontes e barragens (Ávila, 2012). Ávila (2012) cita ainda, a aplicação do ângulo de atrito e a coesão como parâmetros possíveis a serem levantados a partir do RMR nos estudos de taludes de composição rochosa.

Além de aplicações por meio de relações matemáticas em função do valor do RMR como descritos no parágrafo anterior, também são encontrados na literatura adaptações na construção do RMR em si. Laubscher e Jakubec (2001) introduziram o *In Situ Rock Mass Rating* (IRMR) e *Mining Rock Mass Rating* (MRMR) como uma modificação do sistema RMR de Bieniawski, para aplicação na mineração subterrânea. Para a apuração do IRMR são considerados como parâmetros básicos a resistência da rocha intacta (IRS), a resistência do bloco de rocha (BS), o número de juntas e os seus espaçamentos (JS), e a condição das descontinuidades (JC). Já para se obter o índice MRMR, ajusta-se o resultado do IRMR com a contribuição de mais cinco dependentes, sendo, o intemperismo, a orientação das estruturas, as tensões induzidas, a vibração causada em desmontes, além da ocorrência de água.

#### 2.3.1. PREDIÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

O módulo de deformabilidade médio ( $E_m$ ) é dado pela inclinação média da porção linear da curva tensão deformação (Panitz, 2007). A Figura 3 ilustra a origem do  $E_m$ .

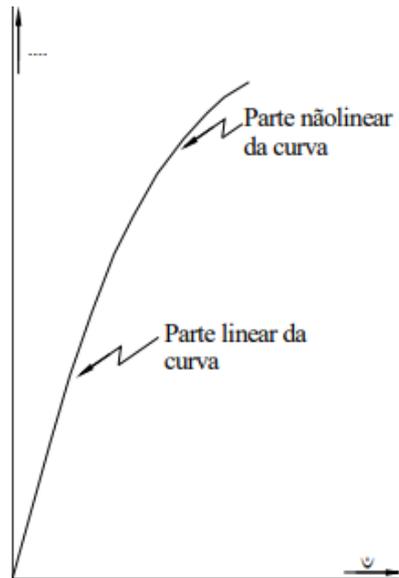


Figura 3 - Curva de tensão (↑) versus deformação (→).  
Fonte: Farmer (1968) *apud* Panitz (2007).

Ávila (2012) afirma que o módulo de deformabilidade dos maciços rochosos é um parâmetro primordial para os projetos de engenharia em rocha. Bieniawski (1989) traz a relação indutiva para o módulo de deformabilidade a partir do resultado obtido na classificação *Rock Mass Rating* (RMR). A Figura 4 expressa a comprovação experimental do modelo preditivo do  $E_m$  com resultados RMR > 50, e expressa a equação de regressão  $E_m$ .

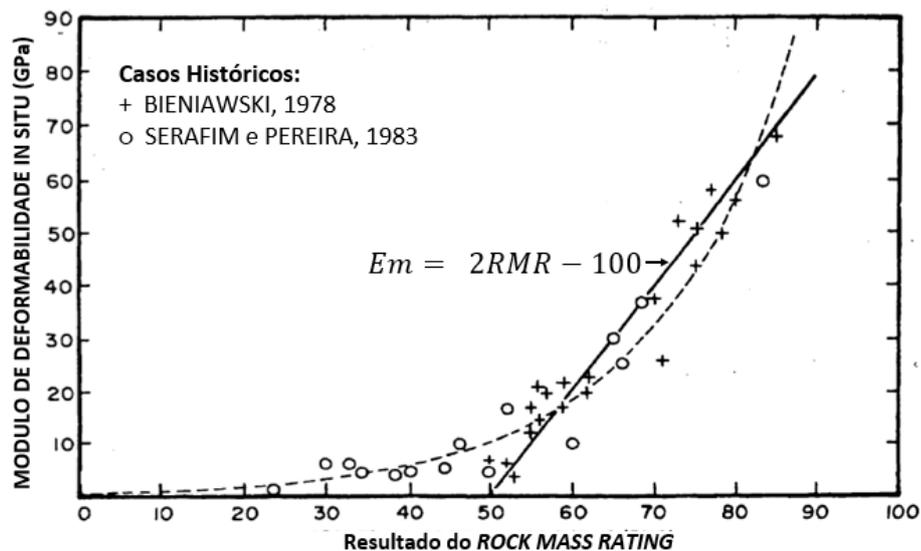


Figura 4 - Modelo de predição do módulo de deformabilidade.  
Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

Já para RMR resultante menor que cinquenta, Serafim e Pereira (1983) obtiveram a correção expressa na Equação 4.

$$Em = 10^{(RMR-10)/40} \quad \text{Equação 4}$$

### 2.3.2. INDUÇÃO DA COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO

Bieniawski (1989) expõe uma relação indutiva entre parâmetros de resistência, tais como a coesão e ângulo de atrito por meio da classificação geomecânica RMR.

Essa relação categórica está presente na Tabela 11.

Tabela 11 - Relação da coesão e ângulo de atrito com RMR.

Valor RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Coesão do Maciço (KPa)	>400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	<100
Ângulo de atrito do maciço (°)	>45	35 a 45	25 a 35	15 a 25	<15

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

### 2.4 ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A Análise de Componentes Principais (ACP) inicialmente estudada por Pearson, em 1901, posteriormente retomado em 1933 por Hottelling se consagrou como uma das técnicas matemáticas mais utilizadas na análise multivariada de dados da estatística, apesar de ter esperado entre os anos 30 e 40 pelo advento dos computadores que podiam resolver as aplicações da técnica (Andriotti, 1997; Jackson, 1991).

A ACP consiste em transformar linearmente um conjunto de variáveis originais, correlacionadas entre si, em outro conjunto menor de variáveis não correlacionadas. Essa transformação deve ocorrer com a menor perda possível de informação do conjunto inicial. Dessa forma, a aplicação desta técnica estatística requer um conhecimento preliminar do banco de dados, no que diz respeito a dependência de variáveis, ou seja, fatores que estejam interagindo concomitantemente no processo estudado.

Segundo Hongyu (2015), as componentes geradas pela transformação linear são ortogonais e não tem relação entre si, sendo chamados de componentes principais.

Já os novos valores das variáveis são as coordenadas principais que também são não correlacionadas. Desse modo, deve-se observar esta análise quanto ao número  $p$  de variáveis correlacionadas e originais e o resultado de  $p$  variáveis não correlacionadas. Além do mais a ordenação ocorre em função de suas variâncias, ou seja, de acordo com o comportamento e variação destas dentro da população.

É importante ressaltar, segundo Andriotti (1997) que a Análise de Componentes Principais é sensível à escala das variáveis tratadas. Tomando como exemplo uma variável cujos valores estão expressos em unidades de medida como ppm e outras em ppb, estes últimos valores terão 1000 vezes mais influência nos resultados da análise do que os outros valores em ppm, o que é indesejável. Para este problema, pode-se padronizar as variáveis, ou seja, transformar a média igual a zero e a variância à unidade, produzindo componentes principais adimensionais.

#### 2.4.1. CONSIDERAÇÕES MATEMÁTICAS

Cada componente principal gerada é uma combinação linear dos  $n$  componentes originais do banco de dados estudado, escrito na forma vetorial por:  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ . Esta combinação linear pode ser escrita da seguinte forma, considerando os pares autovalores-autovetores  $(\lambda_1, e_1), (\lambda_2, e_2), \dots, (\lambda_n, e_n)$ , onde  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ , segundo Johnson e Wichern (2007):

$$C_i = e_i'X = e_{i1}X_1 + e_{i2}X_2 + \dots + e_{in}X_n, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Equação 5}$$

Dessa maneira,

$$Var(C_i) = e_i' \Sigma e_i = \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Equação 6}$$

$$Cov(C_i, C_k) = e_i' \Sigma e_k = 0 \quad i \neq k \quad \text{Equação 7}$$

Os autovalores e autovetores da matriz de covariância são essenciais na análise de componentes principais. Os autovetores determinam as direções de máxima variabilidade, enquanto os autovalores especificam as variâncias, como pode-se observar pelas Equações 6 e 7 (Johnson e Wichern, 2007).

Pelos coeficientes ou autovetores, de acordo com Andriotti (1997), têm-se que a variância  $C_1$  é maior (e mais importante) que a variância  $C_2$  e assim consecutivamente até o componente principal de menor variância e menor importância. A maior variância corresponde ao máximo de variabilidade dos dados e

os últimos componentes correspondem a às direções de menor variabilidade. Outro ponto importante das componentes principais é o não correlacionamento destas, diferentemente do que ocorre com as variáveis do banco de dados original. (Johnson e Wichern, 2007).

#### 2.4.2. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS VIA MATRIZ DE CORRELAÇÃO

Como descrito anteriormente, para evitar o efeito escala onde há uma maior influência à determinadas variáveis, é necessário realizar uma padronização para se obter variância igual a um. Desse modo, o problema gerado pela diferença de escala entre as variáveis é amenizado. A padronização pode ser realizada via matriz de correlações na aplicação da técnica (Santos, 2016).

O uso da matriz de correlação como padronizador para as variáveis se dá onde uma matriz de correlação  $U_{uxu}$  das variáveis  $X_n$ , é padronizada pela equação  $Z_n = (X_i - \mu_i)/\sigma_i$ , onde  $i = 1; 2; 3; \dots u$  (Mingoti, 2005). Os autovalores da matriz  $U_{uxu}$  serão expressos em  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_u$  e os correspondentes autovetores normalizados  $e_1, e_2, \dots, e_u$ . Assim a  $n$ -ésima componente principal ( $C_n$ ) da matriz  $U_{uxu}$ , sendo  $n = 1; 2; 3; \dots u$ , será:  $C_n = e_{n1}Z_1 + e_{n2}Z_2 + \dots + e_{nu}Z_u$  (Mingoti, 2005).

A variância de  $C_n$  será igual ao autovalor correspondente para o caso  $\lambda_n$ . As variáveis do banco de dados original apresentam correlação com as componentes principais, sendo essa correlação equiparável a existente entre as variáveis padronizadas (Santos, 2016). A correlação é calculada pela Equação 8, onde é utilizada a componente do autovetor (Mingoti, 2005).

$$r_{C_n, Z_i} = r_{C_n, X_i} = e_{ni} \sqrt{\lambda_n} \quad \text{Equação 8}$$

Ao se obter os valores da correlação entre a variável e a componente, haverá a comparação entre as respostas, que resultará na hierarquização em função da intensidade de correlação, seja ela diretamente ou inversamente proporcional (Santos, 2016).

### 2.4.3. FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS

Este tópico apresentará o detalhamento das formulações matemáticas da construção da matriz de covariância até a obtenção das componentes. A elaboração teve como base Santos (2016).

A matriz de correlação é escrita conforme a Equação 9 onde  $r_{kk}$  é o resultado da correlação entre duas variáveis distintas.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 9}$$

A Equação 9 expressa a matriz R de onde se irá calcular os autovalores:  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ , e a variância total das variáveis é realizada através da Equação 10.

$$Var_{TOTAL} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad \text{Equação 10}$$

Já os autovetores são obtidos em função dos autovalores e da matriz R, podendo ser calculados de acordo com as equações na Tabela 12. Isto posto, as componentes são criadas através da combinação linear entre os autovalores e autovetores obtidos anteriormente nas formas expressas na Tabela 13.

Tabela 12 - Construção dos autovetores.

Autovetores ( $\hat{a}_1$ )			
$\hat{a}_1 = \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \\ \vdots \\ e_{1k} \end{bmatrix}$	$\hat{a}_2 = \begin{bmatrix} e_{21} \\ e_{22} \\ e_{23} \\ \vdots \\ e_{2k} \end{bmatrix}$	$\hat{a}_3 = \begin{bmatrix} e_{31} \\ e_{32} \\ e_{33} \\ \vdots \\ e_{3k} \end{bmatrix}$	$\hat{a}_k = \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \\ e_{k3} \\ \vdots \\ e_{kk} \end{bmatrix}$

Tabela 13 - Construção da Componentes.

Componentes (C)	$C1 = e_{11}Z_1 + e_{12}Z_2 + e_{13}Z_3 + \dots + e_{1k}Z_k$					
	$C2 = e_{21}Z_1 + e_{22}Z_2 + e_{23}Z_3 + \dots + e_{2k}Z_k$					
	$C3 = e_{31}Z_1 + e_{32}Z_2 + e_{33}Z_3 + \dots + e_{3k}Z_k$					
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$Ck = e_{k1}Z_1 + e_{k2}Z_2 + e_{k3}Z_3 + \dots + e_{kk}Z_k$					

#### 2.4.4. OBTENÇÃO DO NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Santos (2016) salienta que a determinação do número de componentes é regida pelo pesquisador, podendo ser norteada pela representatividade da variância acumulada explicada, pela análise da qualidade de aproximação da matriz de correlação ou por análise prática das componentes. A escolha pode ser ponderada por um ou mais métodos dos três métodos citados.

A análise pela variância acumulada explicada é regida pela porcentagem que cada componente obtém dentro da variância total do banco de dados (Santos, 2016). Não é discutida uma variância acumulada ideal na literatura que seja abrangente a todos os casos. Mingoti (2005) relata que existem casos de apenas duas componentes principais já explicarem cerca de 90% da variância existente no banco de dados analisado. Já Santos (2016), alerta quanto à importância de se entender que não existe um valor padrão, e cita que 50% da variância acumulada pode ser suficiente para explicar a variância global em um espaço multivariável.

O critério de Kaiser (1958), utiliza os autovalores maiores que 1 e é utilizado como uma análise da qualidade de aproximação da matriz de correlação. Dessa forma, são selecionadas as combinações lineares que conseguem explicar pelo menos a quantidade da variância de uma variável original padronizada (Mingoti, 2005). Ainda com critério de qualidade de aproximação da matriz de correlação, Cattell (1966) propõem que a escolha seja feita a partir da identificação do primeiro ponto de inflexão na curva do *scree plot* (Figura 5) – Autovalores *versus* Componentes. Para Cattell

(1966) as componentes locadas após o primeiro ponto de inflexão podem ser desconsideradas na escolha, uma vez que as mesmas já tendem a resultante de autovalor igual a zero.

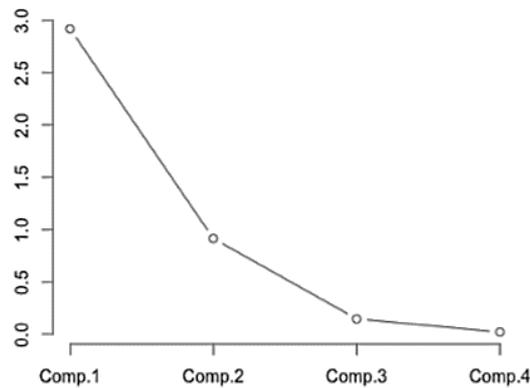


Figura 5 - Exemplo de *Scree Plot*.  
Fonte: Santos (2016)

Ainda em relação aos métodos de seleção das componentes principais, tem-se a análise prática das componentes. Segundo Santos (2016), é realizado quando o pesquisador detém uma variável de interesse prévio, onde o mesmo poderá selecionar o número de variáveis em função da ordem que a variável possui na ACP.

#### 2.4.5. APLICAÇÕES DE ACP NAS GEOCIÊNCIAS

A técnica ACP é encontrada na literatura com uma grande interdisciplinaridade. A aplicação é vastamente utilizada em bancos de dados de alimentos, fármacos, solos, além de estudos na área de ecologia, dentre outros.

A utilização da análise de componentes principais em solos pode ser observada em Manlay *et al.* (2000) que relacionam as propriedades bióticas e abióticas do solo no Senegal. Em Lips e Duivenvoorden (1996) há uma discussão quanto aos padrões regionais em amostras de solo da Amazônia colombiana. Gomes *et al.* (2004) trazem como meta caracterizar e comparar diferentes solos locados no leste de Goiás, noroeste de Minas, e triângulo Mineiro para fim de gerar uma distinção mais detalhada das paisagens sob condições naturais. Outro exemplo de aplicação da ACP na geoquímica é a utilização para a pesquisa sobre minerais pesados na Folha Passo do Salsinho no estado do Rio Grande do Sul, onde foi possível delimitar as unidades litológicas, além de ampliar os conhecimentos geológicos da área.

Ainda na grande área das Geociências, Santos (2016) traz a aplicação das técnicas de ACP para o estudo da condição de estabilidade de taludes a fim de se estabelecer um modelo de predição. Assim, Santos (2016) faz um estudo de grande valia para a elaboração do presente trabalho. Isso deve-se a forte ligação na aplicação do método estatístico, tendo vista que a aplicação da ACP é pouco explorada na literatura em pesquisas ligadas a estabilidade de maciços rochosos.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo possui como escopo a descrição dos materiais e métodos utilizados na construção da monografia. Desta forma, o capítulo está subdividido em materiais e método aplicado.

#### 3.1. MATERIAIS

O presente trabalho abrangeu como materiais o banco de dados e os *softwares* utilizados para as análises estatísticas e estudos em geral.

O banco de dados foi fornecido por uma mineração, sendo resultado de um levantamento sistemático de pontos ao longo de frentes de lavra, com parâmetros relativos ao sistema de classificação RMR (Rock Mass Rating). Assim os parâmetros são litologia, resistência a compressão uniaxial, espaçamento das descontinuidades, alteração do maciço rochoso e condições das descontinuidades.

Para a manipulação do banco de dados e cálculo do RMR usou-se o *software* Excel versão 2018. O *software* utilizado para as análises de estatística básica e multivariadas foi o Minitab versão 2018.

#### 3.2. METODOLOGIA APLICADA

Inicialmente o banco de dados foi analisado a fim de verificar se todo o espaço amostral estava com as variáveis devidamente indicadas. Em seguida as variáveis foram convertidas para o sistema de pontuação utilizado no RMR para que o indicador da condição geomecânica das amostras fossem gerados.

O RMR foi calculado conforme procedimento descrito no Capítulo Revisão Bibliográfica desta pesquisa, de acordo com Bieniawski (1989). Entretanto, não foi ponderado o parâmetro de condição da direção e do mergulho. Isso deve-se ao fato

que esse parâmetro é mais proveitoso quando se trabalha em projetos subterrâneos, com uma maior ocorrência de tensões atuantes.

Em posse dos resultados, foram estimadas as propriedades dos maciços e iniciaram-se as análises estatísticas descritivas a fim de descrever e sumarizar o conjunto de resultados obtidos. A Figura 6 exprime a linha de fluxo da pesquisa.

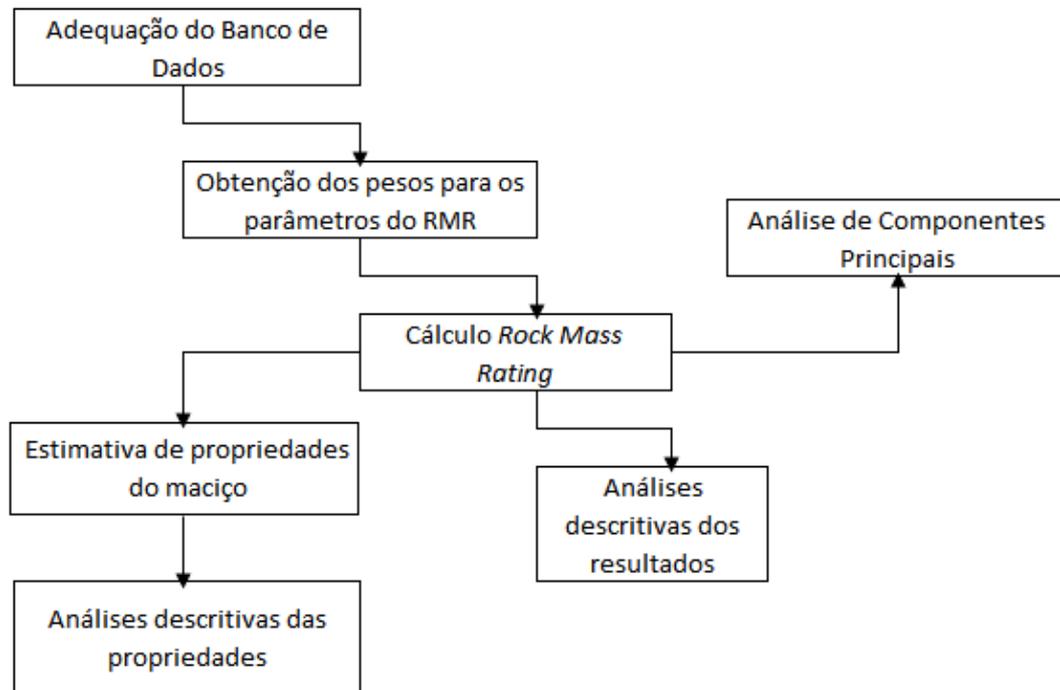


Figura 6 - Etapas para a obtenção dos resultados

A análise estatística multivariável foi aplicada com a intenção de se estudar o comportamento das variáveis entre si e com relação a resposta obtida na classificação via RMR. A análise de componentes principais deteve o objetivo de encontrar um meio de condensar a informação contida nas variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas. A Figura 7 traz a organização metodológica dentro da análise de componentes principais.

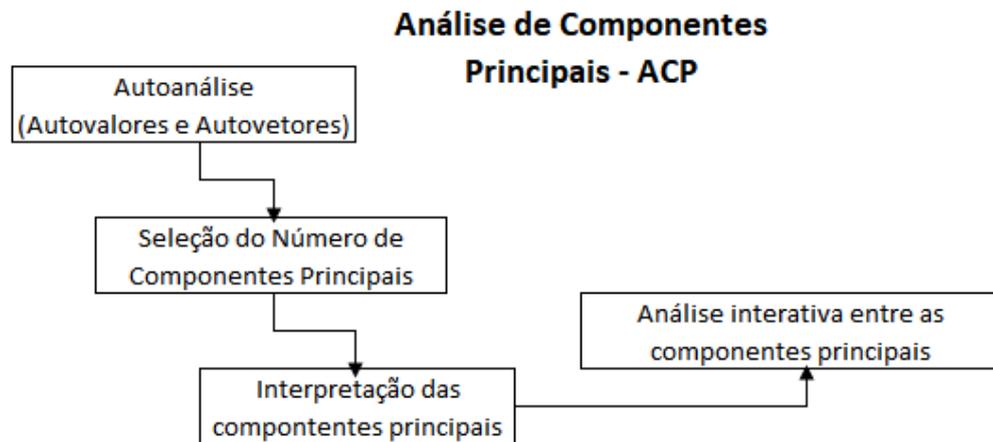


Figura 7 - Etapas da ACP.

Com embasamento à Figura 7, a ACP foi realizada inicialmente com a apuração da importância de cada componente gerada na autoanálise. A importância é discutida em função da proporção acumulada da variância atribuída a cada componente que explica a variância total do banco de dados. Em seguida, é selecionada a quantidade de componentes que serão priorizadas com base em sua importância (autoanálise) e pelo método de análise gráfica proposto por Cattell (1966). Por fim, são realizadas as interpretações de cada componente principal e da interação entre as mesmas para a predição da resposta da condição geomecânica dos maciços rochosos.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados e discussões obtidos pela metodologia aplicada e estudos propostos são apresentados. Assim estão apresentados os resultados da classificação RMR dos pontos em estudo, bem como um estudo do comportamento dos pontos amostrados de acordo com o RMR e em seguida o resultado da aplicação da técnica de componentes principais com o objetivo de estudo da influência dos parâmetros geomecânicos no RMR.

##### 4.1. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – RMR

Após a classificação geomecânica aplicada dentro do banco de dados em estudo, foram obtidas três diferentes classes para os maciços estudados, sendo elas: a classe II maciço bom, correspondente a 67% da base de dados; a classe I muito boa, 15,5%; e a classe III, maciço razoável, 17,5%. A Figura 8 apresenta um histograma acerca dos resultados descritos.

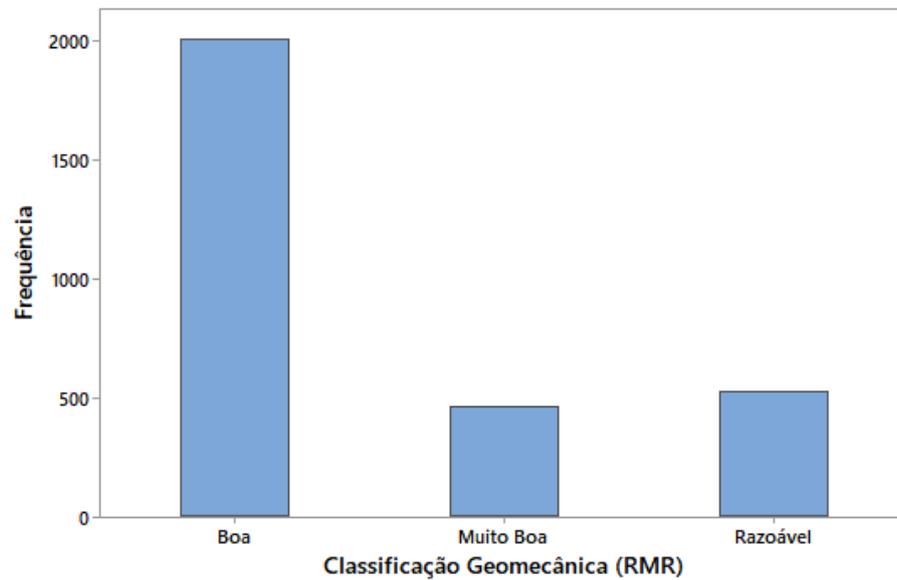


Figura 8 - Frequência do resultado categórico RMR.

A partir da Figura 8 é possível identificar o comportamento geomecânico predominante nas frentes de lavra em estudo, sendo em geral rochas de maior competência, haja vista que a maioria dos pontos estão relacionados a classe II, maciço bom.

Além das características referentes às condições do maciço e suas descontinuidades, também foram fornecidas as coordenadas dos pontos amostrados. A Figura 9 retrata as amostras dispersas em dois planos bidimensionais e estão segmentadas em função de sua classificação geomecânica.

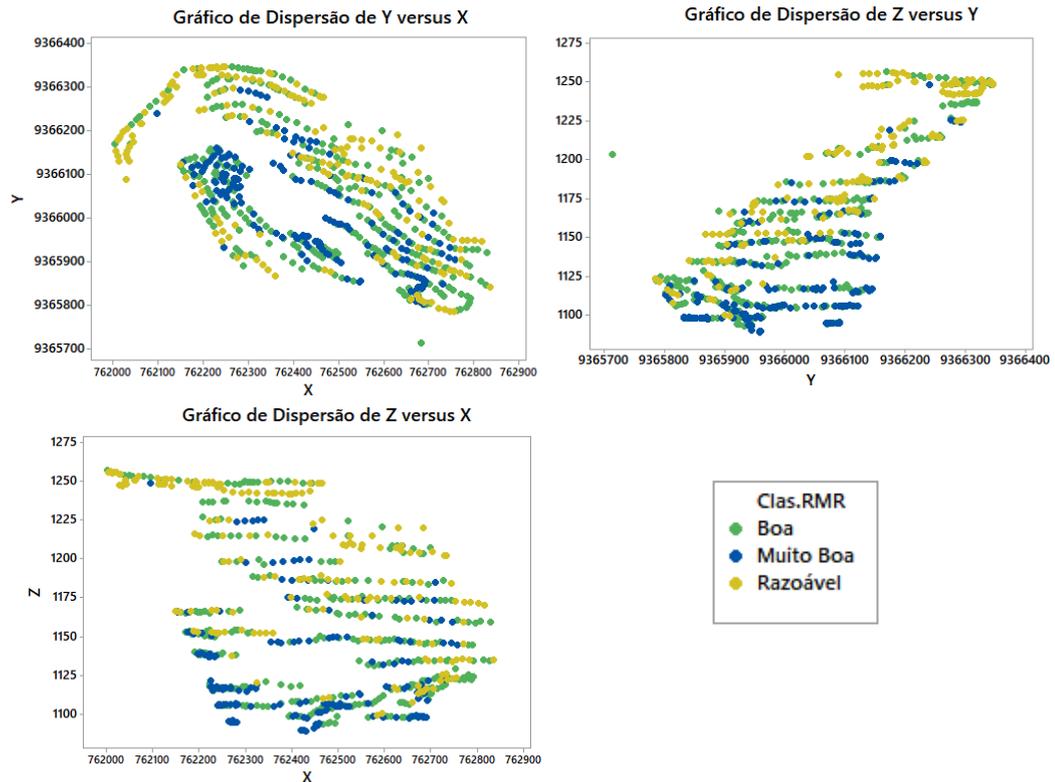


Figura 9 - Distribuição dos resultados em coordenada X,Y, e Z.

O banco foi dividido em três grupos de forma equidistantes em referência ao eixo Z setorizando a cava de acordo com a profundidade, com o objetivo de verificar o comportamento do RMR de acordo com a profundidade da cava. A Figura 10 traz o gráfico de dispersão das amostras segmentadas pelos grupos criados em função de sua cota.

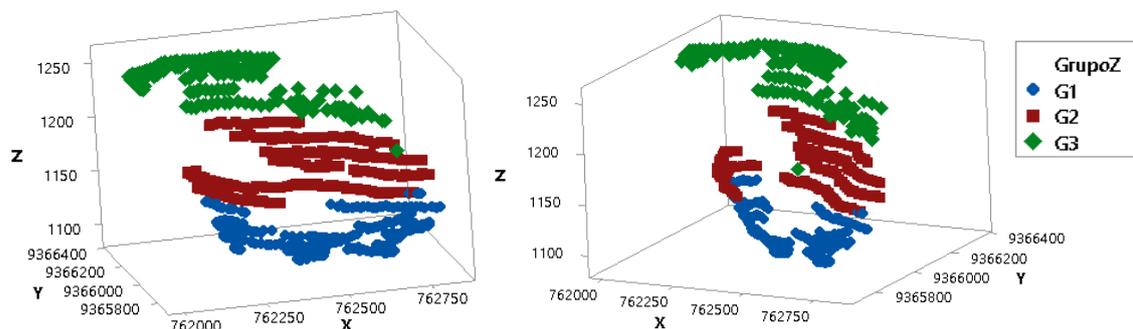


Figura 10 - Setorização da cava em função da profundidade.

Após a setorização, foi realizado um levantamento de modo a se obter as características dos três grupos de setorização. O histograma presente na Figura 11

descreve a distribuição ajustada construída para fim de observação do comportamento dos grupos em função da classificação geomecânica.

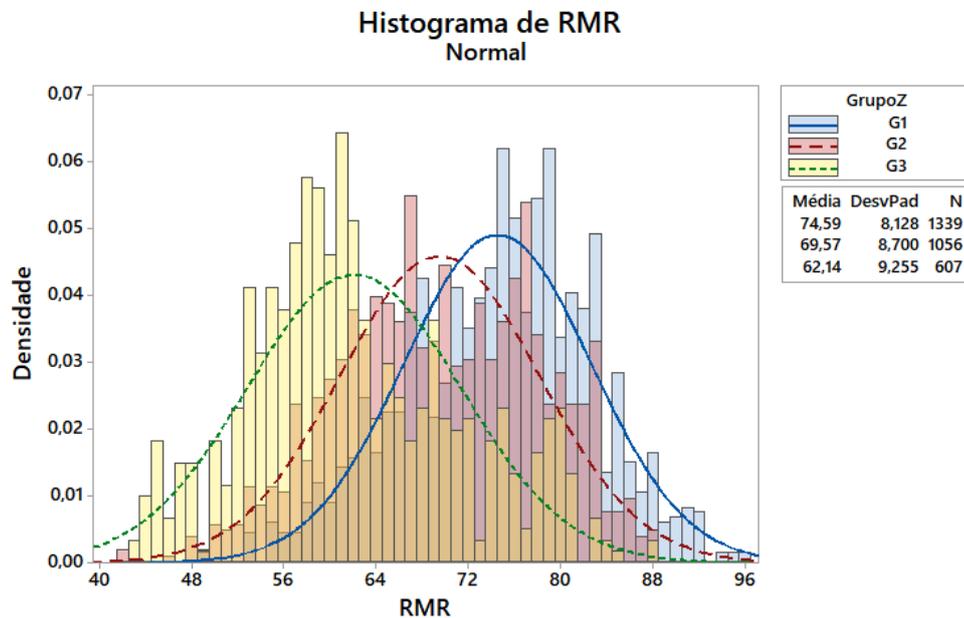


Figura 11 - Comportamento dos grupos em função do RMR.

Na análise dos grupos não houve uma distinção significativa relacionando a classe RMR com a cota ou profundidade, entretanto, é possível identificar uma tendência onde as amostras locadas na área mais profunda da cava (G1) apresentam maiores taxas de densidade nos maiores valores de RMR, enquanto o grupo G3 que detém maior proximidade da superfície possui sua curva de distribuição mais deslocada aos menores valores de RMR e conseqüentemente detém piores qualidades de maciços rochosos. Em conformidade, o grupo G2 estaria em uma zona de transição com média amostral entre os dois outros grupos citados.

O resultado apresentado na Figura 11 mostra que os pontos levantados nas áreas mais superficiais da cava apresentam RMR mais baixo em relação aos pontos levantados em profundidade da cava. Diversos fatores explicam esse fenômeno, tais como a taxa de exposição a fatores intempéricos, ou seja, os pontos na superfície estão expostos a mais tempo a agentes desencadeadores de intemperismo. Outro ponto é o condicionamento do maciço rochoso, que pode estar ligado a geologia local, onde a parte mais profunda do maciço rochoso apresenta características de maciço mais competente.

## 4.2. ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DO MACIÇO ROCHOSO

Na posse dos resultados numéricos e categóricos referentes à classificação geomecânica dos maciços rochosos, foram estimadas propriedades através de relações matemáticas propostas na literatura. Como dito, as propriedades possuem caráter de indução.

### 4.2.1. MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

O cálculo para o módulo de deformabilidade ( $E_m$ ) é descrito no subitem 3.3.1. A Tabela 14 retoma as equações utilizadas.

Tabela 14 - Equações para a determinação do módulo de deformabilidade.

RMR	Equação
<50	$E_m = 2RMR - 100$
>50	$E_m = 10^{(RMR-10)/40}$

A Figura 12 expressa um histograma com a frequência de amostras em função do módulo de deformação. A média global do  $E_m$  não traz um resultado substancial, visto que a densidade de amostras em diferentes regiões da mina não é homogênea e com isso possui forte impacto em uma possível média global para a cava.

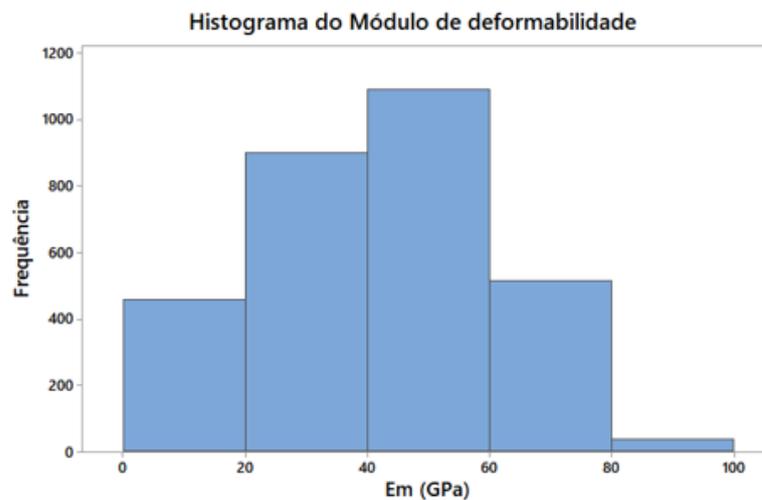


Figura 12 - Frequência do Módulo de deformação.

O módulo de deformabilidade também foi analisado em função dos grupos criados em função da posição Z das amostras. A Figura 13 retrata por meio de um histograma a densidade dos resultados para os grupos.

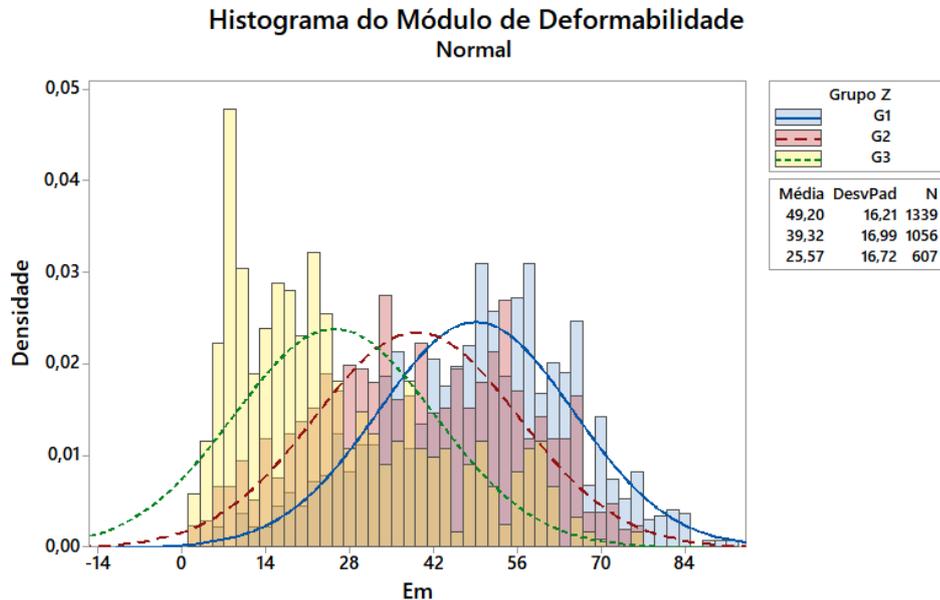


Figura 13 - Densidade do  $Em$  em função dos grupos Z.

Quanto maior o módulo de deformabilidade, maior é a inclinação da porção linear da curva de tensão *versus* deformação do corpo (Panitz, 2007). Dessa forma, menor é a deformação do maciço para uma crescente aplicação de tensão.

Em vista a Figura 13, é notório que o grupo G3 possui uma distribuição mais densa nos menores valores de  $Em$ , enquanto o grupo G1 obteve média aproximadamente duas vezes maior do que a do grupo G3. Tal conclusão é coerente com a discussão trazida em Panitz (2007), onde o intemperismo contribui de forma significativa para a redução do módulo de deformabilidade. Sendo o grupo G3 o conjunto de amostras que possui maior proximidade com a superfície, infere-se que maior foi o contato com os agentes intempéricos, explicando assim seu resultado mais baixo para  $Em$ .

#### 4.2.2. COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO

Os valores de coesão e ângulo de atrito são tabelados em função da classificação geomecânica de estabilidade do maciço rochoso. A Tabela 11 expressa essa relação. Assim, foi adotado o valor considerando o pior cenário dentro do intervalo obtido na categoria do RMR.

A Figura 14 apresenta o histograma de frequência em função do ângulo de atrito das amostras (a) e a frequência das amostras em função da coesão do maciço rochoso (b). Como 67% das amostras foram classificadas como “Boas” via RMR, conseqüentemente essa predominância também é aparente para a distribuição da coesão e ângulo de atrito.

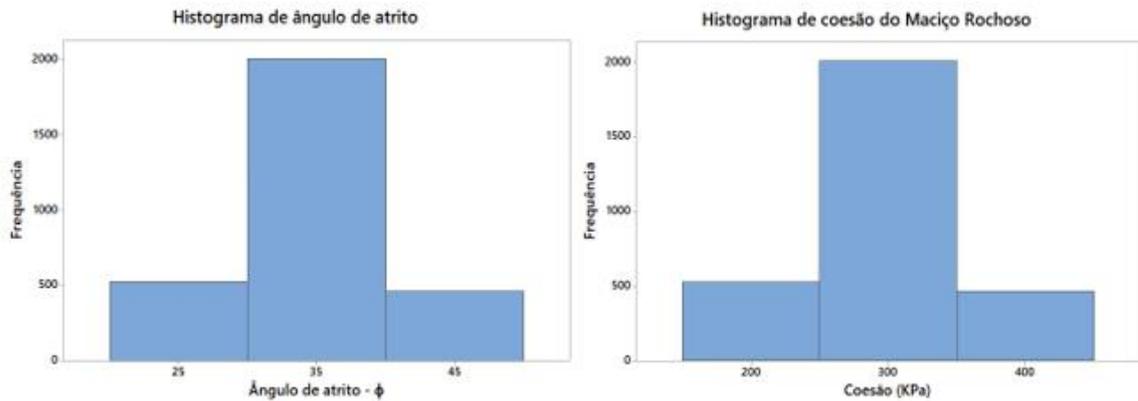


Figura 14 - Frequência dos resultados de ângulo de atrito e coesão das amostras.

#### 4.3. MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS E O VALOR DE RMR.

A matriz de correlação entre pares de itens (variáveis mais a resposta RMR) foi realizada com o fim de se observar o quanto uma variável é correlata para com a outra e com a resposta final da classificação geomecânica. Essa matriz é expressa na Tabela 15.

Tabela 15 - Matriz de Correlação.

	Resistência	RQD	Espaçamento	Comprimento	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Alteração
RQD	0,181							
Espaçamento	-0,02	0,204						
Comprimento	-0,014	0,036	0,127					
Abertura	0,017	0,03	-0,065	-0,171				
Rugosidade	0,221	0,072	-0,02	0,235	0,002			
Preenchimento	0,347	0,079	-0,148	0,013	0,28	0,145		
Alteração	0,729	0,075	-0,071	-0,061	0,136	0,218	0,494	
<b>RMR</b>	<b>0,777</b>	<b>0,456</b>	<b>0,37</b>	<b>0,192</b>	<b>0,263</b>	<b>0,354</b>	<b>0,512</b>	<b>0,685</b>

Visto que a resposta RMR é uma função somatória e todas as variáveis correspondem a valores iguais ou maiores que zero, entende-se que todas as variáveis tendem então a possuir correlação positiva com a resposta (RMR). Entretanto, algumas variáveis demonstram uma maior correlação para com a mesma, isso pode estar ligado à importância da variável para a condição de estabilidade do talude como também da interação dela com outras variáveis. A escala de cores foi realizada em formatação automática onde há variações de vermelho à verde alertam a variação dos menores valores aos maiores valores.

A partir da Tabela 15 para o resultado da classificação geomecânica RMR, é observado duas interações com maior força, as variáveis “resistência” e “alteração” além de possuírem os mais altos valores de correlação para com a resposta, também possuem uma forte correlação entre si. A resistência do maciço realmente possui ligação direta com a alteração, onde, quanto maior as ocorrências de alterações intempéricas, menor será a resistência do mesmo. A correlação não é expressa como negativa devido ao banco de dados ser formado por critério de notas (maiores notas geram maior condição de estabilidade).

Os demais itens com valor de correlação mais próximo de zero revelam uma não interdependência de um ao outro.

#### 4.4. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.

Os resultados obtidos na ACP realizada no *software* Minitab foram organizados em três subitens. É levantada primeiramente a proporção da variância para todas as componentes obtidas na análise. Em seguida é discutida a escolha das componentes principais e conseqüentemente a interpretação das componentes escolhidas.

##### 4.4.1. RELEVÂNCIA DAS COMPONENTES

O primeiro resultado obtido na aplicação da análise das componentes é expresso na Tabela 16 por uma autoanálise (autovalores e autovetores) via matriz de correlação não paramétrica. A proporção da variância exalta a importância das componentes na manutenção das informações (variância total) do banco de dados.

Tabela 16 - Autoanálise das componentes principais.

	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8
Proporção da Variância	0,281	0,175	0,142	0,121	0,096	0,090	0,065	0,030
Proporção da Variância Acumulada	0,281	0,456	0,597	0,719	0,815	0,905	0,970	1,000

Tendo vista a Tabela 16, entende-se como proporção da variância o quanto a componente em questão explica a variância total do banco de dados. Sendo assim, 28,1% da variância do espaço amostral é explicada pela componente 1, e de forma correlata, a soma (acumulada) da proporção da variância de todas as componentes corresponde a 100% da variância da base de dados. Observa-se ainda que a metade do número de componentes explica mais de 70% da variância total.

#### 4.4.2. Escolha do número de componentes principais

O *Scree Plot* dos autovalores por componente pode ser observado na Figura 15 e foi utilizado para construção do critério de seleção das componentes principais.

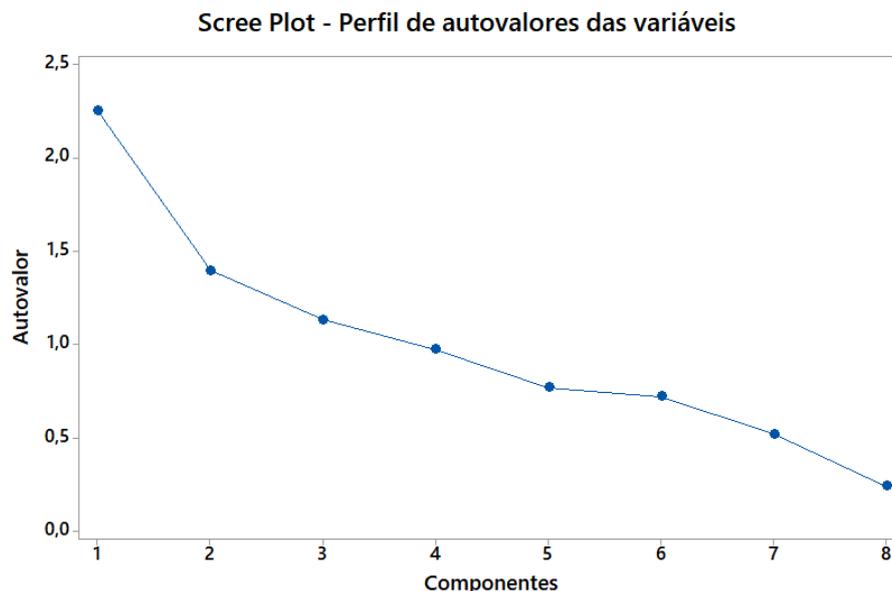


Figura 15 - Perfil dos autovalores das variáveis.

Por meio da Figura 15, aplicando o método gráfico, sugerido por Cattell (1966), considera-se como as componentes principais aquelas anteriores ao ponto de inflexão da curva. Com isso, tem-se como componentes principais as duas primeiras componentes que explicam 45,6% da variância total da base de dados. Posto isso, a

presente pesquisa extraiu duas componentes principais para sequência do estudo proposto.

#### 4.4.3. Interpretação das componentes

A partir da seleção das componentes obtém-se a combinação linear dos autovalores e autovetores descritos na Tabela 17.

Tabela 17 - Componentes principais.

Variável		1	2	3	4	5	6	7	8
Componentes	CP1	0,545	0,149	-0,089	-0,011	0,187	0,262	0,475	0,586
	CP2	0,121	0,345	0,465	0,567	-0,409	0,369	-0,162	-0,022

Embasado na tabela 17 foram criadas as equações das componentes onde:

- V1 = Resistência;
- V2 = Valor RQD;
- V3 = Espaçamento;
- V4 = Persistência;
- V5 = Abertura;
- V6 = Rugosidade;
- V7 = Preenchimento;
- V8 = Alteração;
- CP = Componente Principal

$$CP1 = 0,545.V1 + 0,149.V2 - 0,089.V3 - 0,011.V4 + 0,187.V5 + 0,262.V6 + 0,475.V7 + 0,586.V8 \quad \text{Equação 11.}$$

$$CP2 = 0,121.V1 + 0,345.V2 + 0,465.V3 + 0,567.V4 - 0,409.V5 + 0,369.V6 - 0,162.V7 - 0,022.V8 \quad \text{Equação 12.}$$

A partir da Equação 11 (CP1), é visível que as variáveis que apresentaram maior peso para a construção da componente 1 foram respectivamente, a alteração, resistência do maciço, e o preenchimento da descontinuidade. Analisando essas variáveis, tanto

a alteração da parede como o preenchimento da descontinuidade são variáveis que impactam diretamente a resistência do maciço. Ações intempéricas tendem a alterar o maciço, tornando a rocha mais friável e com comportamentos semelhantes ao dos solos (baixa resistência). Já o preenchimento das descontinuidades possui importante impacto na caracterização geomecânica do maciço visto que o tipo de preenchimento condiciona a descontinuidade aos atributos de resistência do próprio material preenchido. De forma geral, essa componente pode então ser entendida como uma indicadora da resistência da rocha.

A segunda componente presente na Equação 12 é representada por cinco variáveis: Índice RQD; espaçamento; persistência; abertura; e rugosidade. Das cinco variáveis citadas, quatro possuem relação direta com o grau de fraturamento do maciço. O índice RQD, espaçamento, persistência e abertura são variáveis estratificadas do grau de fraturamento da rocha que indica o volume/quantidade de fraturas por unidade de distância. Dessa maneira, temos que a união das duas principais componentes para a classificação geomecânica são representadas principalmente pela resistência do maciço e o grau de fraturamento da rocha. Correspondendo a 45,6% da variância presente no banco de dados estudado.

Os escores relativos às duas principais componentes principais estão presentes na Figura 16. Os pontos estão dispersos em CP1 e CP2 além de estarem agrupados em função da sua classificação de estabilidade geomecânica – RMR.

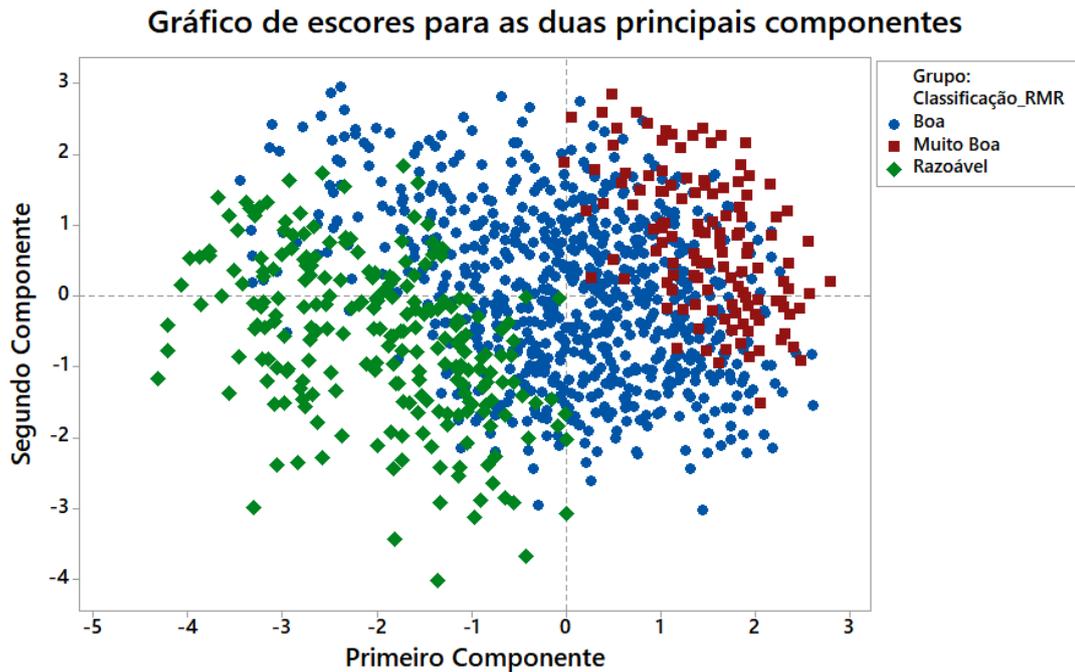


Figura 16 - Dispersão dos resultados para as duas componentes principais.

Observando a Figura 16, percebe-se que os pontos onde ambas as componentes são negativas é predominante a classe RMR “Razoável”, enquanto a classe “Muito Boa” está em sua maioria dispersa nos valores positivos para as componentes. A classe de estabilidade “Boa” se encontra dispersa por todos os quadrantes de forma a ser uma transição entre as duas outras classes como já era esperado.

Ainda com base na interpretação do gráfico presente na Figura 16, é possível inferir que os coeficientes das variáveis positivos nas equações das componentes CP1 e CP2 possuem o potencial de elevar a classificação para uma melhor condição de estabilidade de maneira a gerar resultantes positivas às duas componentes. De forma análoga e contrária, os itens negativos tendem a gerar uma resultante menor que zero às componentes e conseqüentemente uma forte tendência à classe Razoável na classificação de estabilidade via RMR.

## 5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa cumpriu seu principal objetivo ao elaborar um estudo da influência do comportamento dos parâmetros geomecânicos na concepção do RMR. As duas primeiras componentes destacadas como principais na ACP explicam 45,6% da variância total da base de dados. Essas componentes alancam os parâmetros resistência do maciço, e grau de fraturamento da rocha como as mais fortes condicionantes para a composição da resposta, assim, obtém-se a situação da estabilidade de taludes em critério geomecânico. Consequente, a análise de componentes principais obteve sucesso em seu findo de conhecer a estrutura de dependência das variáveis no sistema *Rock Mass Rating* e ao enaltecer os parâmetros mais significativos.

Uma análise em função da localização das amostras também foi realizada, onde foi identificado uma tendência que qualifica de forma mais favorável os maciços locados nos pontos mais baixos da cava. Este resultado teve como explicação a ocorrência de menor intensidade de intemperismo além do condicionamento do maciço rochoso ligado a geologia área estudada.

O sistema *Rock Mass Rating* se mostrou uma metodologia de manejo inteligível e com grande reconhecimento de eficácia na literatura para a classificação de maciços rochosos. Os resultados do RMR gerados para a cava foram discutidos em parâmetros estatísticos descritivos, no qual induziu-se que o intemperismo possuiu forte influência para a variação da resposta em função da coordenada Z das amostras. Assim também para o módulo de deformabilidade do maciço.

A partit dessa pesquisa, tem-se como sugestão para trabalhos futuros a elaboração de um modelo preditivo simplificado do RMR para o banco de dados utilizados. Tal modelo estaria em função dos dois parâmetros levantados como mais importantes para a conjuntura da resposta. No entanto, é prudente testar outras técnicas estatísticas multivariadas no banco no intuito de se obter uma descrição mais completa do universo amostral, e por fim estabelecer o modelo preditivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo. 1998.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Análise de componentes principais: Fundamentos de uma técnica de análise de dados multivariada aplicável a dados geológicos**. Porto Alegre: Acta Geológica Leopoldensia. 1997. p.27-50.

ÁVILA, C. R. **Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas: uma comparação entre os diversos métodos de classificação**. 2012.

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. **Engineering classification of rock masses for the design of rock support**. Rock Mechanics 6, pp. 189-236. 1974.

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

CAICEDO, A.J.C. **Análise de descontinuidades e classificação geomecânica de um maciço rochoso na mina Rio dos Bugres, Santa Catarina**. 1995.

CATTEL, R. B. **The scree test for the number of factors**. Multivariate behavior research. v.1, p. 245-276. 1966.

DEERE, D. U.; HENDRON, A. J., Jr.; PATTON, F. D.; CORDING, E. J. **Design of Surface Near Surface Construction in Rock**. In Failure and Breakage of Rock, C. Fairhurst, Ed. Society of Mining Engineers of AIME. New York. 237-302p. 1967.

DEERE, D.U. **Rock quality designation (RQD) after 20 years**. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station. 1989.

FLEURY, S. V.; ASSIS, A. P. **Análise da distribuição de tensões em descontinuidades de rocha utilizando a técnica da fotoelasticidade**. 147 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Brasília. 2001.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade**. 2002.

FREITAS, S. B. N. **Caracterização geomecânica e classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de maciços rochosos em taludes do Funchal**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade da Madeira, Portugal. 2011.

GOMES, J. B. V. et al. **Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 1, p. 137-153. 2004.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Practical estimates of rock mass strength**. International journal of rock mechanics and mining sciences, v. 34, n. 8, p. 1165-1186. 1997.

HOEK, E.; KAISER, P.K.; BAWDEN, W. F. **Support of underground excavations in hard rock**. CRC Press. 1993.

HONGYU, K. **Comparação do GGEbiplot ponderado e AMMI-ponderado com outros modelos de interação genótipo x ambiente**. 2015. 155p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2015.

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

ISRM (International Society for Rock Mechanics). **Rock Characterization, Testing and Monitoring**. In Brown, E.T. (Ed.), ISRM Suggested Methods. Pergamon, Oxford. 1981.

JACKSON, J.E. **A User's Guide to Principal Components**. New York: Wiley. 1991.

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

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. Madison: Prentice Hall International, 6th ed. 794p. 2007.

KAISER, H. F. **The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis**. Psychometrika, 23, p. 187-200. 1958.

LIPS, J.M. & DUIVENVOORDEN, J.F. **Regional patterns of well drained upland soil differentiation in the middle Caquetá basin of Colombian Amazonia**. Geoderma, 72:219- 257. 1996.

LAUBSCHER, D.H., JAKUBEC, J., **The MRMR rock mass classification for jointed rock masses**. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies, p. 474–481. Society of Mining Engineers, AIME, New York. 2001.

MANLAY, R.J.; CADET, P.; THIOULOUSE, J. & CHOTTE, J. **Relationships between abiotic and biotic soil properties during fallow periods in the sudanian zone of Senegal**. Appl. Soil Ecol., 14:89-101. 2000.

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

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Editora UFMG. 2005.

PALMSTROM, A. **The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of the Degree of Jointing**, IV th Int. Congress IAEG, New Delhi, 221-228p. 1982.

PANITZ, J. S. P. **Desenvolvimento e implementação de metodologias para a determinação da deformabilidade e tensões em maciços gnáissicos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2007.

PRIEST, S. D., HUDSON, J. A. **Discontinuity spacings in rock**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 135–148p. 1976.

REDONDO, F. **Classificação probabilística do padrão geomecânico de um maciço rochoso mineralizado com base no índice RQD**. 2003.

SANTOS, A. E. M. **Predição da condição de estabilidade de taludes de mina por meio de estatística multivariada**. 2016.

SERAFIM, J. L. & PEREIRA, J. P. **Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski**. Proceedings, International Symposium on Engineering Geology in Underground Construction, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. 1983.

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

STAGG & ZIENKIEWICZ. **Mecanica de Rocas en la Ingenieria Practica**. espanhola. Madrid: Editorial Flame, 1970.

VARGAS, C. A. L. **Modelo probabilístico de distribuição tridimensional de descontinuidades em maciços rochosos fraturados**. 2001. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2001. Disponível em: < <https://geotecnia.unb.br/downloads/teses/08A-2001.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2019.

VIDAL, F. W. H.; BESSA, M. F.; LIMA, M. A. B. **Avaliação de rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas**. 1999.

VILES, H., GOUDIE, A., GRAB, S., & LALLEY, J. **The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis**. Earth surface processes and landforms, p. 320-333. 2010.

ZACARIAS, C.M. **Classificação de maciços rochosos na mina de Córrego do Meio aplicado às operações de perfuração e desmonte**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Eng. Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2003.