



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS
NA DEFINIÇÃO DE SUPORTE EM MINA SUBTERRÂNEA**

Rafael Luciano Pereira Canabrava

MONOGRAFIA nº 320

Ouro Preto, junho de 2019

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DE PROPRIEDADES
GEOTÉCNICAS NA DEFINIÇÃO DE SUPORTE EM MINA
SUBTERRÂNEA**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hermani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca

MONOGRAFIA

Nº 320

AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS NA DEFINIÇÃO DE SUPORTE EM MINA SUBTERRÂNEA

Rafael Luciano Pereira Canabrava

Orientador

Prof. Dr. José Margarida da Silva

Co-Orientador

MSc. Túlio César Abduani Lima

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2019/1.

OURO PRETO

2019

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Rafael Luciano Pereira Canabrava

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

C212a

Canabrava, Rafael Luciano Pereira.

Avaliação de sensibilidade de propriedades geotécnicas na definição de suporte em mina subterrânea / Rafael Luciano Pereira Canabrava. – 2019

60f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador Prof. Dr. José Margarida Silva.

Coorientador: MSc. Túlio César Abduani Lima.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

1. Escavação subterrânea. 2. Estabilidade. 3. Estatística – Método FOSM. 4. Mecânica de rochas. I. Silva, José Margarida. II. Lima, Túlio César Abduani. III Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Avaliação de sensibilidade de propriedades geotécnicas na definição de suporte em mina subterrânea.

CDU: 624.131.1

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Avaliação de sensibilidade de propriedades geotécnicas na definição de suporte em mina subterrânea

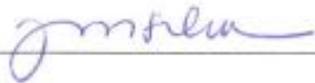
AUTOR: RAFAEL LUCIANO PERERIRA CANABRAVA

ORIENTADOR: JOSÉ MARGARIDA DA SILVA

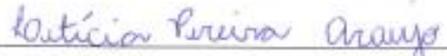
CO-ORIENTADOR: TÚLIO CÉSAR ABDUANI LIMA

Aprovado em: 13 de junho de 2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Margarida da Silva  DEMIN/UFOP

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar  DEGEO/UFOP

Eng.ª Leticia Pereira Araujo  NUGEO/UFOP

Ouro Preto, 13/06/2019

Agradecimentos

Agradeço a meu pai Marco e a minha mãe Gloria por sua dedicação e ensinamentos. Aos meus irmãos Rodrigo e Ricardo pela amizade e por estarem sempre presentes.

Aos amigos de Belo Horizonte, que se mantiveram sempre presentes, apesar da distância. Aos amigos da geologia, da república e do Aikido pelo companheirismo nas horas de trabalho e diversão.

As amigadas e professores da Universidade de Portsmouth na qual tive grandes experiências no Ciência sem Fronteiras.

Aos companheiros da AngloGold Ashanti, especialmente a toda equipe da Mecânica de Rochas sempre disponível a compartilhar conhecimento e boas experiências.

Agradecimento especial a meus orientadores José Margarida e Túlio Abduani pelo apoio e direcionamento.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, e seus professores, por terem me proporcionado um ensino superior de qualidade durante toda a minha graduação.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 JUSTIFICATIVA	2
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	2
1.4.1 Revisão bibliográfica.....	2
1.4.2 Análise estatística	3
2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL	5
2.1 LOCALIZAÇÃO.....	5
2.2 GEOLOGIA LOCAL	5
2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	8
3 PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DE MACIÇO	11
3.1 RESISTÊNCIA DA ROCHA.....	12
3.2 GRAU DE FRATURAMENTO	12
3.3 CONDIÇÃO DE DESCONTINUIDADES	13
3.3.1 RUGOSIDADE	13
3.3.2 GRAU DE ALTERAÇÃO	15
3.3.3 PERSISTÊNCIA	15
3.3.4 ABERTURA.....	15
3.3.5 PREENCHIMENTO	15
3.4 CONDIÇÃO DE TENSÃO.....	Erro! Indicador não definido.
3.5 PRESSÃO DE ÁGUA.....	16
4 ESCAVAÇÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	Erro! Indicador não definido.
4.1 PADRÕES DE CONTENÇÃO	19
4.2 INSTABILIDADE CONTROLADA POR ESTRUTURAS	20
4.2.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE	21
5 MÉTODO GEOESTATÍSTICO	25
5.1 INTRODUÇÃO.....	25

5.2 MÉTODOS ANALÍTICOS	Erro! Indicador não definido.
6 ANÁLISE DE DADOS	27
6.1 ANÁLISE DE DADOS	27
6.2 RECOMENDAÇÃO DE SUPORTE PELO SISTEMA Q.....	29
6.3 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE	30
7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	35
7.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	35
7.2 METODOLOGIA	Erro! Indicador não definido.
8 CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização da mina de Córrego do Sítio com acesso a partir de Belo Horizonte.	5
Figura 2.2 - Mapa geológico da porção central do Lineamento aurífero Córrego do Sítio (Lima 2012).....	7
Figura 2.3 - Projeção estereográfica das três principais famílias de descontinuidades presentes no lineamento Córrego do Sítio.	10
Figura 3.1 - Classificação de perfis de descontinuidade segundo a rugosidade (adaptado de Barton 1987).....	14
Figura 4.1 - Recomendação de suporte permanente com base no sistema Q (adaptado de NGI 2015).....	20
Figura 4.2 - Orientação das principais formas consideradas nas análises de fator de segurança do padrão de contenção.	23
Figura 6.1 - Gráfico de recomendação de (NGI 2015) com valores analisados para a variação de Q. Em verde valor médio de Q, em marrom valores da variação de Q por cada fator, em vermelho valor mínimo de Q esperado de ser encontrado.....	30
Figura 6.2 - Orientação das descontinuidades principais analisadas.....	31
Figura 6.3 - Disposição da escavação com azimute 040 e sistema de contenção padrão com cunhas formadas pelas descontinuidades médias.....	32

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Aspectos macroscópicos dos diques metabásicos do Lineamento aurífero Córrego do Sítio (adaptado de Lima 2012)	8
Tabela 6.1 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, das rochas presentes em CdS.	27
Tabela 6.2 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, da família de descontinuidades S1.	27
Tabela 6.3 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, da família de descontinuidades S2.	28
Tabela 6.4 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, da família de descontinuidades F3.	28
Tabela 6.5 - Resultados da análise pelo método FOSM para a influência dos parâmetros sobre o cálculo da classificação Q.....	29
Tabela 6.6 - Resultados da análise pelo método FOSM para a influência dos parâmetros geomecânicos para análise de estabilidade via equilíbrio limite.	33

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1 - Descrição de valores para o parâmetro SRF, adaptado de (NGI 2015).....	16
--	----

LISTA DE SIMBOLOS

a_i	Área da iesima junta
A	Resultante das forças deslocantes
B	Vetor da força de tracionamento dos tirantes
c	Coesão da descontinuidade
C	Vetor peso do suporte de face
DM	Direção de Mergulho de descontinuidade
E	Vetor da força sísmica
FS	Fator de Segurança
H	Vetor de resistência ao cisalhamento do concreto
J_a	Fator de grau de alteração de descontinuidade
J_i^S	Magnitude de resistência devido a junta i suportada
J_n	Fator de número de famílias de descontinuidades
J_v	Fator de contagem volumétrica de descontinuidade
J_r	Fator da rugosidade de descontinuidade
JRC	<i>Joint Roughness Coefficient</i>
J_w	Fator de presença de água em descontinuidade
M	Mergulho de descontinuidade
P	Resultante das forças passivas
Pp	Pressão de água
Q	<i>Rock Quality Index</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
SRF	<i>Stress Reduction Factor</i>
T_i	Magnitude da foça resistente devido à resistência a tração da junta i
U	Vetor da pressão de água
X	Vetor da força de pressão ativa
W	Vetor da força peso de cunha
Y	Vetor da força de pressão passiva
ϕ	Ângulo de atrito da descontinuidades
σ	Resistência a compressão da junta
τ	Força de cisalhamento da junta

Resumo

A garantia de estabilidade das escavações subterrâneas é de crucial importância na mineração, sendo prática comum a aplicação de diferentes métodos de contenção, projetados com base nas propriedades geomecânicas do maciço rochoso. Porém, em operações modernas, as necessidades de otimização de tempo e de recursos podem conferir empecilho à realização de estudos compreensivos que forneçam condições ao geotécnico de conhecer a variação dessas propriedades ao longo do maciço, dificultando a previsão de regiões de fraqueza, nas quais o sistema de contenção aplicado pode não ser eficiente. Como forma de acomodar as demandas operacionais foi proposto um estudo de sensibilidade das propriedades consideradas nas análises de estabilidade de forma a identificar aquelas cuja variação tenha maior efeito no risco de ruptura do maciço. O estudo de sensibilidade foi realizado com a utilização do Método FOSM (*First Order Second Moment*), para definir a influência dos parâmetros analisados dentro de sua variância padrão em torno da média. A metodologia foi aplicada em estudo de caso da Mina Córrego do Sítio, na qual foi possível avaliar a prevalência da orientação e geometria das descontinuidades sobre a eficiência da contenção. Discriminadas as propriedades de maior impacto é possível então focar as análises em campo de forma a prever a eficiências das contenções aplicadas.

Palavras-chave: Escavação subterrânea, Estabilidade, Estatística – Método FOSM, Mecânica de rochas.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O trabalho em escavações subterrâneas, em alguns casos indispensável para a exploração de minérios, acarreta riscos envolvendo a desestabilização do maciço rochoso ao redor. Essa pode ocorrer tanto em grandes escalas, com fechamentos de galerias ou túneis e comprometimento de todo o empreendimento, como em escala localizada com queda de blocos. Em ambos os casos existe constante exposição de pessoas e equipamentos, com alto potencial de perda.

Dessa forma, a geotecnia se desenvolveu, sobretudo nas últimas décadas, buscando compreender as propriedades geomecânicas envolvidas na estabilidade de escavações subterrâneas, chegando ao conceito atual de que a contenção auxilia o maciço a se auto suportar, explicitando o conceito de reforço. Esses conhecimentos são utilizados na indústria para a definição de padrões de contenção projetados para atender a demanda específica de cada operação mineral, como é o caso da mina de Córrego do Sítio, objeto deste estudo.

Porém, em operações minerárias modernas o ritmo de avanço dessas escavações dificulta o controle detalhado de todas as propriedades geomecânicas uma vez que tempo e recursos são limitados. Não obstante, em alguns casos, essas propriedades não seguem padrões comuns de variação no espaço, e como resultado uma mesma mina pode se deparar com situações geomecânicas diversas.

Como forma de acomodar as demandas operacionais na mina Córrego do Sítio, propõem-se um estudo estatístico da influência de cada propriedade geomecânica sobre a eficiência do padrão de contenção adotado na mina. Dessa forma será possível identificar as propriedades críticas para a estabilidade das escavações e que deverão assim ser controladas de forma mais detalhada. Esta identificação, por sua vez permitirá a tomada de decisões mais bem embasadas quanto a aplicação de contenção, localização de estruturas operacionais auxiliares (de sonda, estação de bombeamento, etc) e sentido de desenvolvimento preferência da rampa (isto é, rampas descendentes tendem a ter porções retilíneas mais longas).

1.2 OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo primário, mensurar o efeito da variação de cada propriedade geotécnica do maciço rochoso para a definição do padrão de contenção de escavações subterrâneas da

mina de Córrego do Sítio, da AngloGold Ashanti. Como objetivo secundário, comparar os resultados de sensibilidade entre o Sistema de classificação Q e as análises de equilíbrio limite. Finalmente como um terceiro objetivo, este trabalho buscou avaliar a eficiência do método FOSM em estudos de sensibilidade, ao mesmo tempo contribuindo para melhor entendimento do papel do sistema de classificação Q e da análise de Equilíbrio Limite na previsão da eficácia do padrão de contenção.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em uma operação mineira, pela realização de escavações longas, com grandes redes de galerias que se estendem por centenas de metros, lateral e verticalmente, são encontradas diversas condições distintas para o maciço rochoso. Isso porque as propriedades geotécnicas tendem a ser muito variáveis em pequenos espaços devido às litologias envolvidas, à evolução tectônica, às descontinuidades presentes, à hidrogeologia local e ao perfil de alteração local.

Como resultado, torna-se difícil o total controle do comportamento do maciço na escala de operação de uma mina subterrânea, com rápido desenvolvimento. Dessa forma, entender a influência da variação de cada parâmetro geomecânico, identificando os mais críticos, permitirá ao geotécnico focar os trabalhos em campo, realizando assim melhores previsões do comportamento do maciço e da eficácia do padrão de contenção. Esse conhecimento subsidiará as análises de estabilidade e a tomada de decisões estratégicas quanto ao desenvolvimento das escavações subterrâneas.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que fossem alcançados os objetivos traçados, este trabalho foi dividido em duas fases. Primeiramente foi realizado um estudo de revisão bibliográfica no qual se buscou ter maior conhecimento sobre os elementos envolvidos em uma análise de estabilidade, a destacar, a geologia local, a os parâmetros geotécnicos, e um estudo sobre os métodos matemáticos de avaliação de sensibilidade. A segunda fase foi então aplicar estes conhecimentos no estudo de caso sobre a sensibilidades das propriedades geotécnica na mina Córrego do Sítio.

1.4.1 Revisão bibliográfica

A consulta bibliográfica teve como objetivo contribuir com o melhor entendimento de como as propriedades do maciço rochoso determinam seu comportamento mecânico. Dessa forma, foi feito inicialmente um estudo de definição do maciço rochoso presente na mina Córrego do Sítio, principalmente em seu aspecto geológico. Em seguida foram estudados os principais fatores que condicionam o comportamento do maciço rochoso, a partir do qual são feitas as caracterizações de

qualidade do maciço. Essa revisão foi apoiada sobre o sistema de classificação Q, utilizado na mina e foco dos estudos deste trabalho.

Em seguida foram então avaliados os métodos matemáticos aplicáveis a análises de dados em problemas de engenharia. Foi considerar a técnica estatística para a avaliação da influência de diferentes fatores na efetividade de padrões de contenção.

Esta abordagem embasa-se no entendimento de que objetivo primário de um sistema de suporte é mobilizar e conservar inerentes as forças do maciço rochoso no entorno das escavações, que era anteriormente auto suportável. Dessa forma é crucial que se tenha um bom entendimento do maciço rochoso, para que possa ser dimensionado um suporte adequado.

1.4.2 Análise estatística

A segunda etapa foi o uso do método FOSM (*First Order Second Moment*) para calcular a sensibilidade do cálculo de fator de segurança à variância dos parâmetros geotécnicos do maciço. A partir do banco de dados de caracterização do maciço, fornecido pela AngloGold Ashanti, puderam ser calculados a média e o desvio padrão usados pelo método FOSM no cálculo da estabilidade.

Foram então estudados dois métodos para a definição do padrão de contenção, focando em contenção por ancoragem do maciço. O primeiro, usado como base comparativa, é a estimativa de suporte de face com base na classificação Q. O sistema Q de Barton é muito usado para avaliação da qualidade de face das escavações e aplicado em modelos estatísticos para a previsão das condições do maciço. Entende-se assim ser de interesse compreender a resposta do sistema Q às variabilidades das propriedades do maciço.

O sistema Q porém, não se propõe a substituir análises de estabilidade mais detalhadas. Desta forma, o método FOSM foi aplicado também à análise de equilíbrio limite. Com o auxílio do software Unwedge da Rocscience, foi possível simular as cunhas máximas possíveis de serem formadas pela interseção dos planos, e a partir dessa análise, fazer um estudo do fator de segurança com base no equilíbrio de forças que agem sobre esta cunha. Como as forças atuantes são função das propriedades geomecânicas, incluindo a orientação das descontinuidades que definem estes blocos em forma de cunha, foi possível realizar uma análise da influência que a variação de cada uma das propriedades geomecânicas tem sobre a eficiência do padrão de contenção. Essas análises foram então comparadas com as estimativas teóricas a partir da classificação Q com o objetivo de validar a sensibilidade do método.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

2.1 LOCALIZAÇÃO

A mina de Córrego do Sítio fica localizada no município de Santa Barbara entre as sedes das cidades de Barão de Cocais e Santa Bárbara. Pode ser acessada a partir de Belo Horizonte pela BR-381 sentido Espírito Santo e depois a MG-436 sentido Santa Bárbara como visto na Figura 2.1. A mina explora jazida ocorrente no Lineamento Aurífero Córrego do Sítio em região que compõe a porção Nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF) (Lima 2012).



Figura 2.1 - Localização da mina de Córrego do Sítio com acesso a partir de Belo Horizonte.

2.2 GEOLOGIA LOCAL

Na região da mina de Córrego do Sítio afloram rochas da sequência metavulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas e interpretado como um *greenstone belt* arqueano (Schorscher 1992). Dorr *et al.* (1957) subdividiram o Supergrupo Rio das Velhas nos Grupos Nova Lima, e Maquiné. O Grupo Nova Lima, inferior, é constituído por rochas metavulcânicas com intercalações

metassedimentares químicas e clásticas, e o grupo Maquiné, constituído por rochas metassedimentares clásticas.

No projeto de integração cartográfica do Quadrilátero Ferrífero QF, embasado em Dorr (1957), Baltazar *et al.*, (2005) definem o grupo Nova Lima, indiviso como consistindo “principalmente de xisto verde metassedimentar e metavulcânico e filito com intercalações de quartzito, grauvaca, dolomito, talco xisto e formação ferrífera”. Azevedo (2007) aponta que algumas subdivisões estratigráficas informais foram propostas por diversos autores, porém a intensa deformação, espessas camadas de intemperismo e limitação da base cartográfica de detalhe dificultam o estabelecimento de subgrupos (Noce 1995).

No Grupo Nova Lima está inserido o lineamento Córrego do Sítio, que “se caracteriza pela mineralização estilo veios de quartzo-carbonato-sulfeto com a paragênese ouro livre (Au), bertierita (FeSb_2S_4), arsenopirita (FeAsS), estibnita (Sb_2S_3), pirrotita (Fe_{1-x}S), pirita (Fe_2S), calcopirita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS), além de traços de outros sulfetos e sulfossais, hospedados em sequências de metagrauvas e metapelitos carbonosos, polideformados, ao longo de zonas de cisalhamento” (Lima 2012). Este lineamento tem orientação NE-SW e com extração mineral de ouro por diferentes minas ao longo de sua extensão. “Estes elementos permitem classificá-lo com um depósito aurífero do tipo *Iode gold* orogênico, no sentido de Groves (1998), conforme ocorre em diversas partes do mundo, a exemplo do “Lachlan Fold Belt” (RAMSAY *et al.* 1998), da Austrália” (Lima 2012).

Porto (2008) considera esse lineamento aurífero como um pacote ‘monótono’, por estarem os litotipos intercalados em escala de afloramento, não distinguíveis em mapa. Lima (2012), entretanto, os divide em três unidades de leste para oeste descritas a seguir e discriminadas em mapa na Figura 2.2:

- **Unidade Córrego do Sítio Superior:** Predominam metagrauvas com subordinadas lentes de filitos carbonosos organizados em ciclos de Bouma incompletos, em que o acamamento apresenta granodecrescência normal ou invertida, o que pode estar relacionado a dobras ou falhas de empurrão que invertem o empilhamento estratigráfico natural.

- **Unidade Córrego do Sítio Intermediária:** Constitui-se predominantemente por metapelitos carbonosos intercalados com metagrauvas e caracterizados por uma xistosidade anastomosada, densa trama de venulações quartzo-carbonáticas, de espessuras milimétricas a métricas, e por microdobramentos apertados, isoclinais e localmente transpostos segundo o plano axial de dobras assimétricas. Esta unidade contém o grosso da mineralização aurífera, onde os veios de quartzo-carbonato contém ouro, sulfetos e sulfossais disseminados. O contato superior e o inferior são bruscos.

- **Unidade Córrego do Sítio Inferior:** Caracteriza-se por uma espessa sequência de metapelitos carbonosos intercalados a camadas de metagrauva, localmente com ciclos de Bouma incompletos, e que contém subordinadas camadas e lentes métricas-decamétricas de formação ferrífera bandada, com raras camadas magnéticas, e abundantes intercalações de xisto carbonoso.

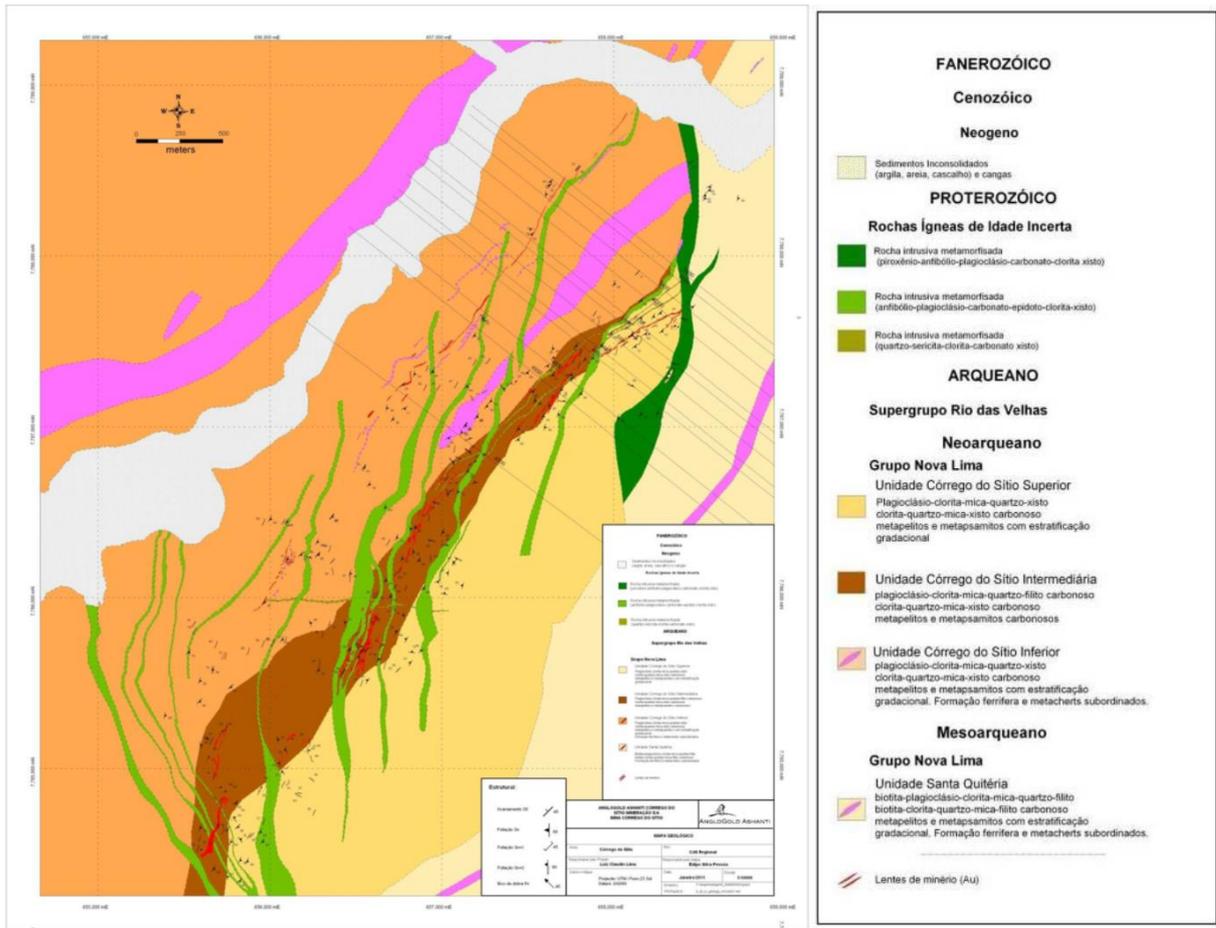


Figura 2.2 - Mapa geológico da porção central do Lineamento aurífero Córrego do Sítio (Lima 2012)

A Figura 2.2 contém o mapa de caracterização regional feita para o Lineamento Aurífero Córrego do Sítio aonde são realizadas as operações minerais da AngloGold Ashanti. A mina de Córrego do Sítio está inserida na unidade Córrego do Sítio intermediária, onde estão concentradas as lentes de minério aurífero. essa unidade é cortada por exames de diques intrusivos metabásicos subdivididos informalmente por Lima (2012) em três famílias com base puramente em suas características petrográficas, denominadas: metabásica incipientemente alterada com piroxênio relicto (MBpx); metabásica com alteração clorítica e carbonática (MBcl) e metabásica com alteração carbonática e moscovítica (MBcb). As características de cada uma destas famílias de diques estão descritas na Tabela 2.1. O autor ainda define o contato com as demais unidades como “brusco, oblíquo e marcado pelo desenvolvimento de halos de carbonatação, sericitização, muscovitização, silicificação e rara sulfetação nas encaixantes”.

Tabela 2.1 - Aspectos macroscópicos dos diques metabásicos do Lineamento aurífero Córrego do Sítio (adaptado de Lima 2012)

Subtipos/ Siglas	Descrição litológica	Espessura Média (m)	Características macroscópicas gerais
MBpx (DB4)	Metabásica com alteração incipiente, com relictos de piroxênio	60 a 100	-Intrusão espessa; -Associada com falhas responsáveis por deslocamentos quilométricos dos contatos; -Nas porções nordeste e sudoeste; -Interrompe a Unidade Córrego do Sítio e a mineralização aurífera; -Não apresenta clivagem de crenulação Sn+1
MBcl (DB1)	Metabásica com alteração intermediária clorítica e carbonática	10 a 40	-Intrusões de espessuras intermediárias; -Foliação nas bordas e porções centrais maciças ou com incipiente xistosidade; -Corpos zonados com diferenças mineralógicas, texturais e petrográficas entre as porções centrais e da borda das intrusões; -Alteração metassomática nas bordas e nas rochas metassedimentares encaixantes; -Posicionadas em zonas de falhas com deslocamento decamétrico sinistral. -Cortam zonas em que a mineralização está boudinada. -Apresenta clivagem de crenulação Sn+1
MBcb (DB2/3)	Metabásicas com alteração carbonática e muscovítica profunda	0.1 a 7	-Intrusões mais delgadas que as demais; -Ocorrem em enxames e localmente em direções radiais; -Falhas E-W cortam e deslocam seus contatos; -Não zonadas do centro para a borda; -Rocha maciça ou com incipiente xistosidade; -Cristais de carbonato euédricos dispersos em toda a rocha; -Vugs preenchidas por quartzo, carbonato, sulfetos e sulfossais Euédricos; -Apresenta, localmente, clivagem de crenulação Sn+1

2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

As regiões Sudeste e Leste do QF contêm importantes registros de um sistema de falhas de empurrão de idade brasileira associado a Falha do Fundão (Almeida 1977). Lima (2012) posiciona a área da mina de Santa Bárbara numa zona de cisalhamento do Anticlinal Conceição, a sul da Falha do Fundão, “sendo formada por uma sequência de sinclinais e anticlinais invertidos, limitados por zonas de cisalhamento de empurrão”.

As zonas de cisalhamento geram boudinagem da foliação S1 e múltiplos veios quartzo-carbonáticos deformados que com estruturas do tipo *pinch and swell*, dobras isoclinais e *tension gashes* (Canale 1999). Lima (2012) descreve o lineamento aurífero Córrego do Sítio como um corredor de grande heterogeneidade estrutural, marcado pela “transição de dobras apertadas, cilíndricas, assimétricas e desarmônicas, com cisalhamento em alto ângulo, e que variam até dobras isoclinais sem

cisalhamento” com presença de milonitos que “definem uma xistosidade milonítica responsável por grande fissibilidade da rocha”.

As rochas no lineamento Córrego do Sítio apresentam três principais estruturas condicionantes do comportamento do maciço, e são interpretadas por Pereira (2013) como três fases de deformações. A fase D_1 é responsável pela foliação regional S_1 mergulhando para SE consistida por “xistosidade contínua com sericita orientada preferencialmente, sendo plano axial das dobras assimétricas fechadas a isoclinais associadas a esta fase”. A fase D_2 é responsável por uma “foliação espaçada com micrólitos, denominada clivagem de crenulação S_2 , que se apresenta subhorizontal com mergulho para NW em alto ângulo com a foliação regional. “Esta clivagem é bem desenvolvida nos xistos e filitos da região, entretanto, em metagrauvas e diques pode ocorrer a refração desta foliação” (Pereira 2013). A fase D_3 é então caracterizada pela clivagem de fratura F_3 , subvertical, de orientação N-NW, comumente preenchidas por quartzo e feldspato.

A relação de orientação dessas três famílias de descontinuidades é mostrada pela projeção estereográfica da Figura 2.3. A foliação S_1 , avaliada por aproximadamente 4700 medidas de campo é mostrada em azul apresenta orientação média 125/66. A clivagem de crenulação S_2 , avaliada com aproximadamente 4300 medidas de campo é mostrada em verde com orientação média de 300/35. Finalmente a família de fratura F_3 , avaliada com 3700 pontos amostrais é mostrada em vermelho com orientação média 044/79

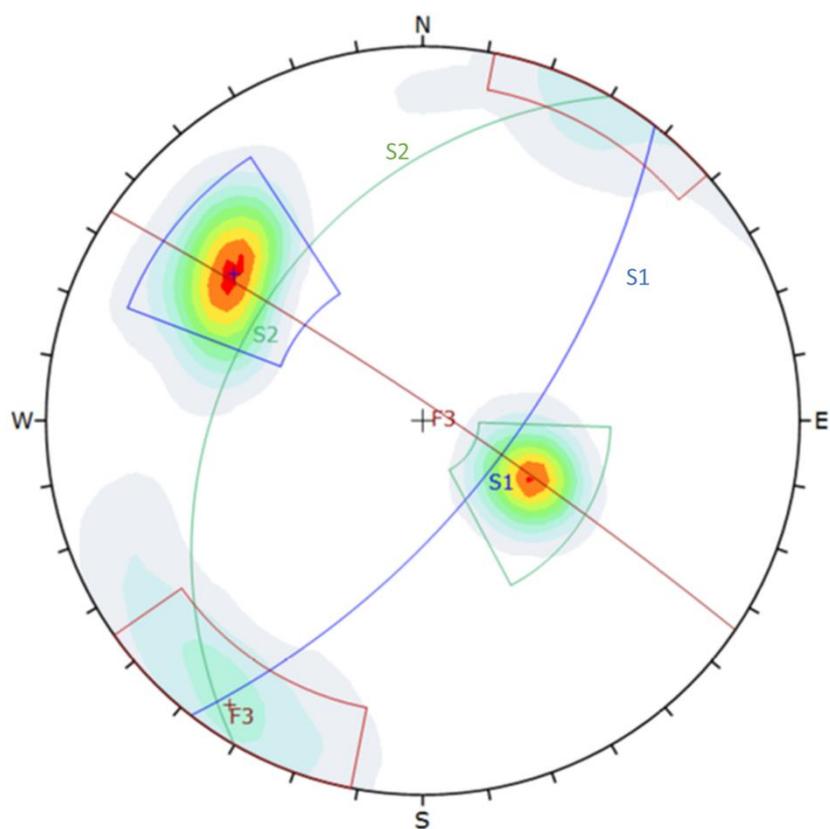


Figura 2.3 - Projeção estereográfica três principais famílias de discontinuidades presentes no lineamento Córrego do Sítio e mostrada em função da densidade de distribuição de seus polos e por seus respectivos planos médios. Em azul a orientação de S1, em verde os dados de S2 e em vermelho os dados de F3.

CAPÍTULO 3

PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DE MACIÇO

Os fatores principais que controlam a estabilidade de escavações subterrâneas, em maciços rochosos, são as propriedades e características inerentes ao maciço rochoso ao redor da escavação, as tensões principais *in situ*, as forças externas atuantes e a geometria das escavações (Silva 2018). Entende-se ainda, que o conjunto de propriedades mais influentes em condicionar o comportamento das escavações varia em função da geometria, orientação ou profundidade das escavações.

Destaca-se ainda que maciços com confinamento relativamente baixo, até algumas centenas de metros da superfície, comportam-se como meios descontínuos cujo comportamento mecânico é determinado pelas descontinuidades, sendo este o caso atual da mina de Córrego do Sítio. É por isso, essencial que a estrutura e a natureza das descontinuidades do maciço sejam cuidadosamente descritas, em adição à descrição litológica da rocha (Silva 2005). Neste capítulo, buscou-se desenvolver um entendimento sobre essas propriedades do maciço e das descontinuidades, servindo de fundamento para o estudo de sensibilidade aqui realizado.

Em trabalhos de caracterização, a influência das descontinuidades enquanto elementos estruturais do maciço é quantificada a partir de diversos parâmetros. Barton (1971) já reconhecia, entretanto que a maior dificuldade em trabalhos de mecânica das rochas é a obtenção confiável de medições de campo relevantes para esses parâmetros. Dessa forma, o objetivo dos sistemas de classificação de maciços é processar informação sobre propriedades do material rochoso, características de descontinuidades e geometria de escavação para obter valores representativos que propiciem uma base racional para decisões acerca da engenharia de rochas (Grimstad *et al* 1993).

O sistema Q foi então proposto para servir como uma classificação padronizada, que possa ser comparada entre diferentes *sites* (ou locais de trabalho), mesmo quando levantado por geotécnicos diferentes. Esse levantamento permitiu a criação de bancos de dados, a partir do qual são possíveis de se realizar estudos comparativos, e permite também estudos preditivos através de modelagens estatísticas.

Para alcançar este fim, o sistema Q simplifica a estrutura da rocha em parâmetros descritivos das propriedades mecânicas julgadas mais importantes. Estes parâmetros são organizados em três critérios que compõem os fatores da equação (3.1) de Barton *et al* (1974) e que se referem a:

- I. Tamanho relativo dos blocos (RQD/J_n)
- II. Resistência ao cisalhamento entre Blocos (J_r/J_a)

III. Estado de tensão (J_w /SRF)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}. \quad (3.1)$$

Dessa forma o primeiro parâmetro, medido pelo método de *Rock Quality Designation* (RQD) e pelo número de famílias de fraturas (J_n) “pode ser interpretado como uma análise de aspectos estruturais do maciço rochoso” que remete “ao tamanho dos blocos constituintes do maciço rochoso” (Lima 2016). O segundo parâmetro, medido pelo índice e rugosidade (J_r) e alteração (J_a) das descontinuidades principais reflete “a resistência de cisalhamento entre os blocos” (Lima 2016). Já o terceiro parâmetro é estimado com base na presença de água e no *Stress Reduction Factor* (SRF) permitindo “uma análise de volume de água que circula no maciço rochoso e do estado de tensão in situ e, assim, estimam a tensão ativa no maciço rochoso classificado” (Lima 2016).

Para que fosse possível fazer a análise da sensibilidade das propriedades geomecânicas, se fez necessário um estudo que buscasse compreender melhor cada uma dessas, sendo apresentadas suas definições a seguir.

3.1 RESISTÊNCIA DA ROCHA

Este parâmetro representa a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e está inerentemente ligada à composição da rocha, a presença de microfraturamentos (Singh & Goel 2011). Este é um parâmetro muito importante e amplamente utilizado na caracterização de maciços rochosos, e por isso aqui mencionado. Porém este não é diretamente considerado nas análises realizadas neste trabalho, isso pois como anteriormente ressaltado, a mina de Córrego do Sítio é relativamente rasa (algumas centenas de metros), sendo a instabilidade controlada pelas descontinuidades, e não pela falha da rocha intacta.

Como é mostrado no item 3.5, a resistência da rocha é considerado de forma indireta pela classificação Q através da avaliação do SRF ao ser definida a competência da rocha.

3.2 GRAU DE FRATURAMENTO

O fraturamento está relacionado primeiramente ao tamanho relativo dos blocos. Deere (1963) elaborou o sistema RQD (*Rock Quality Designation*), que qualifica o maciço pela razão entre a soma do comprimento dos blocos maiores que 10 cm e o comprimento total do testemunho recuperados em testemunhagem de diâmetro de pelo menos 54.7 mm (tamanho NX). Em campo, esse parâmetro pode ser calculado através da relação de Palmstrom (1982, 2006), com base no espaçamento relativo de cada uma das famílias de descontinuidades presentes, segundo o par de equações (3.2).

$$RQD = 115 - 3.3j_v \rightarrow \text{para } j_v > 4,5 \quad (3.2)$$

$$RQD = 100 \rightarrow \text{para } j_v < 4,5$$

J_v é um contador volumétrico de blocos definido segundo a equação (3.3) em que S_n é o espaçamento relativo de cada família de descontinuidade.

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \dots + \frac{1}{s_i} \quad (3.3)$$

O número de famílias de juntas (J_n) é outro parâmetro para avaliar o fraturamento da rocha. Nesse caso, ao invés de ser considerada a densidade de fraturamento, pondera-se sobre o efeito da presença de fraturas em orientações distintas, uma vez que estas definirão possíveis blocos a serem formados, podendo vir a comprometer a estabilidade da escavação. Como mostrado na equação (3.1), o sistema Q combina ambos os parâmetros para determinar o fator de tamanho relativo dos blocos.

3.3 CONDIÇÃO DE DESCONTINUIDADES

As descontinuidades podem ser descritas em função de sua rugosidade, grau de alteração, persistência, abertura e preenchimento. Esses 5 parâmetros serão discutidos a seguir e têm influência direta sobre as propriedades de ângulo de atrito e coesão das descontinuidades. Para definir o fator de resistência ao cisalhamento entre blocos o sistema Q apenas considera a rugosidade e grau de alteração, como já apresentado na equação (3.1).

3.3.1 RUGOSIDADE

A rugosidade é uma avaliação quantitativa da amplitude aproximada do plano ao longo de um dado comprimento (Silva 1998). Estudos realizados por Patton (1966) sobre as propriedades geomecânicas das descontinuidades, concluíram que a descrição de descontinuidades deve diferenciar irregularidades de 1ª e 2ª ordem para que seja possível a definição de parâmetros de resistência realísticos. Dessa forma sua descrição para o sistema Q é feita segundo seu comportamento em escala métrica e milimétrica como mostrado no diagrama da Figura 3.1.

Descrição Milimétrica	Descrição Métrica	J_r	JRC 200mm	JRC 1 m
Rugosa		4	20	11
Lisa		3	14	9
Espelhado		2	11	8
	Irregular			
Rugosa		3	14	9
Lisa		2	11	8
Espelhado		1.5	7	6
	Ondulado			
Rugosa		1.5	2.5	2.3
Lisa		1.0	1.5	0.9
Espelhado		0.5	0.5	0.4
	Planar			

Figura 3.1 - Classificação de perfis de descontinuidade segundo a rugosidade (adaptado de Barton 1987).

O método mais utilizado para descrição de rugosidade de descontinuidades é o *Joint Roughness Coefficient* (JRC), mostrado na Figura 3.1 nas colunas 4 e 5. A definição do JRC pode ser feita por testes laboratoriais com auxílios de padrões ou por comparação visual com os perfis padronizados ISRM (Silva 1998), que são mostrados na segunda coluna da Figura 3.1.

A grande importância desse parâmetro vem da relação direta entre rugosidade e ângulo de atrito (ϕ). Silva (1998) aponta que o estabelecimento do parâmetro de rugosidade, permite através das classificações de como ‘lisa’ e ‘rugosa’ “a previsão de características como a resistência ao cisalhamento que depende da rugosidade” (Silva 1998).

Para estudar essa relação, Barton (1971) realizou testes de cisalhamento em amostras idealizadas, simulando diferentes rugosidades. Para baixas tensões normais foi observada uma relação linear cuja inclinação é relativa ao ângulo do adentamento da superfície. Com o aumento da tensão normal aplicada, o comportamento do cisalhamento passa por transição para uma segunda relação linear

em que todas as amostras apresentam inclinação de 30°, coincidente com o ângulo de fricção residual. O ponto de transição bi-linear, porém, varia em função da área da base das endentações, de forma que endentações com menor base, fraturam em menor tensão normal, logo, atingindo o ponto de transição bi-linear mais facilmente. Foi daí postulado que para juntas reais, as asperezas mais graves (*steepest*) podem ser rompidas em condição de tensão normal mais baixas (Barton 1971) com implicações para estudos em estados de tensão elevados.

3.3.2 GRAU DE ALTERAÇÃO

Ambos os sistemas consideram a alteração das descontinuidades. O sistema Q o faz como quociente do fator de resistência ao cisalhamento (Eq 1). A alteração das descontinuidades reduz a resistência ao cisalhamento do maciço por gerar perda de coesão e ângulo de atrito, por gerar uma assembleia de minerais secundários (Assis 2001) que tendem a ter menor resistência mecânica e assim lubrificam as juntas.

3.3.3 PERSISTÊNCIA

O sistema RMR considera também a persistência das descontinuidades, que diz respeito à extensão do traço de uma descontinuidade observável em afloramento. A persistência de uma descontinuidade está diretamente relacionada a probabilidade de ruptura em rocha sã em baixos níveis de tensão (Assis 2001).

3.3.4 ABERTURA

É a distância que separa as paredes de uma descontinuidade, preenchida por ar ou água. Além de influenciar na condutividade hidráulica do maciço, descontinuidades abertas podem facilitar ruptura por apresentarem espaço para a mobilização do maciço.

3.3.5 PREENCHIMENTO

O sistema RMR de Bieniawski (1989) considera o tipo do material que separa as paredes como um penalizador da qualidade das descontinuidades, classificando-o com base em sua espessura e resistência. Isso porque a qualidade dos materiais que preenche as descontinuidades afeta seu comportamento. O comportamento físico do preenchimento depende principalmente da mineralogia, tamanho das partículas, relação de sobre adensamento, presença de água e permeabilidade (Assis 2001).

3.4 CONDIÇÃO DE TENSÃO

O sistema Q utiliza o *Stress Reduction Factor* (SRF) que, de maneira geral, descreve a relação entre o estado de tensão e a resistência da rocha nos arredores da escavação (NGI 2015). Palmstrom and Bronch (2006) definem o SRF como “a) alívio de tensão em caso de zonas de fraqueza interceptando a escavação; b) tensão em rochas competentes e problemas por excesso de tensão em rochas rúpteis; c) deformação lateral para rochas incompetentes; d) carga por expansividade causada por reação química com a água”. O SRF pode ser estimado para diversos cenários com base no Quadro 3.1.

Quadro 3-1 - Descrição de valores para o parâmetro SRF, adaptado de (NGI 2015)

a) Zonas de fraqueza intersectando em aberturas, podendo causar alívio				SRF
A	Ocorrências múltiplas contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (qualquer profundidade)			10
B	Múltiplas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de argila e com blocos desagregados de rocha (qualquer profundidade)			7.5
C	zonas singulares de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (profundidade de escavação < 50 m)			5
D	Ocorrência de juntas abertas e intenso fraturamento do maciço (qualquer profundidade)			5
E	Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (profundidade da escavação > 50 m)			2.5
Nota 1) Reduza os valores de SRF de 25 a 50% caso zonas de fraqueza apenas influenciem mas não intersectem a escavação.				
b) Rochas competentes (comportamento rígido as deformações)				SRF
		(σ_e/σ_1)	(σ_e/σ_c)	
F	Tensões baixas, sub-superficiais, juntas abertas	>200	<0,01	2,5
G	Tensões Moderadas, favoráveis	10-200	0,01-0,3	1
H	Tensões elevadas (eventuais problemas de estabilidade das paredes)	5-10	0,3-0,4	0,5-2*-5
J	"Lasqueamento" ou "lageamento" moderado após >1h em rocha maciça	3-5	0,5-0,65	5-50
K	Lasquamento ou "rock burst" após alguns minutos em rocha maciça	2-3	0,65-1	50-200
L	Intenso <i>rock burst</i> e imediata deformação dinamica em rocha maciça	<2	>1	200-400
Nota 2) Para campo de tensão fortemente anisotrópico: quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$: reduzir σ_c para $0,75\sigma_c$; $\sigma_1/\sigma_3 > 10$: reduzir σ_c para $0,5\sigma_c$. Quando σ_c : resistência de compressão não confinada, σ_1 e σ_3 são as tensões principais maiores e menores, e σ_e : tensão tangencial maxima (estimado a partir da teoria elastica)				
3) Quando a profundidade da coroa abaixo da superfície é menor que a extensão; sugerir aumento da SRF de 2,5 para 5 (veja caso F)				
c) Rochas incompetentes (comportamento plástico às deformações)				SRF
			(σ_e/σ_c)	
M	Tensão moderada		1-5	5-10
N	Tensão elevada		>5	10-20
Nota 4) Determinação de condições de rocha com deformação lateral deve ser feita de acordo com literatura relevante (i.e. Singh et al. 1992 e Bhasin e Grimstad 1996)				
d) Rochas expansivas (atividade expansiva química dependente da presença da água)				SRF
O	Tensão moderada			5-10
P	Tensão elevada			10-15

3.5 PRESSÃO DE ÁGUA

Segundo Barton (2002), o parâmetro J_w fornece uma representação grosseira de problemas de estabilidade devidos à presença de pressões de água, uma vez que a presença de poro-pressão reduz a tensão efetiva, que de outra forma atuaria no sentido de fechar as descontinuidades, aumentando a resistência a tração e cisalhamento do maciço. Quanto maior a quantidade de água entre as juntas, maior a poro-pressão que este é capaz de exercer e o parâmetro J_w avalia isso a partir do fluxo de água observável.

Estas são as propriedades relevantes avaliadas na mina Córrego do Sítio. A partir da análise combinada destas propriedades é possível classificar e avaliar o comportamento mecânico do maciço, como visto no Capítulo 4.

CAPITULO 4

ESCAVAÇÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

Para que seja estimado o padrão de contenção, é necessário que sejam determinados os modelos de desarticulação esperados, e então aplicado contenção em medida suficiente para que se este sejam estabilizados. Seguindo o padrão utilizado na mina de Córrego do Sítio, este estudo assumirá apenas contenção do tipo ancoragem que consiste, segundo Silva (2018) na introdução de barra de aço rígida (tirante, parafuso) ou flexível (cabo, cordoalha) com preenchimento ou não do espaço anular entre a barra e a parede do furo com argamassa de cimento não retrátil ou com resina. Na mina Córrego do Sítio a contenção de escavações temporárias e permanentes é feita com a aplicação de tirantes com protensão e espaço anular preenchido com resina.

4.1 PADRÕES DE CONTENÇÃO

A indústria da escavação está em crescimento com milhares de quilômetros de túneis desenvolvidos para diversos propósitos. Sendo assim técnicas de contenção são constantemente desenvolvidas. É importante entender o efeito da qualidade do maciço na estabilidade das escavações de forma a ser possível antecipar métodos de contenção mais adequados. Com isso, Grimstad e Barton (1993) propuseram um diagrama de recomendação de suporte com base no Sistema Q (Figura 4.1) a partir do estudo de diversos casos reais com sucessivas revisões. O objetivo desse diagrama é fornecer uma expectativa da contenção necessária para projetos em que se tem pouco conhecimento acumulado sobre o maciço, geralmente utilizado nas fases iniciais de operação.

O uso desse diagrama fornece uma expectativa do suporte necessário em condições em que o maciço é pouco conhecido. É então possível estimar suporte permanente para túneis com base na qualidade do maciço e da geometria da escavação, essa, mais usada em projetos de engenharia civil (Barton 2002). Este sistema trabalha com uso de ancoragens por atirantamento e concreto projetado.

No diagrama de suporte, da Figura 4.1, o valor de Q é plotado no eixo horizontal e as dimensões equivalentes da escavação, no eixo vertical no lado esquerdo. O diagrama é então dividido em áreas de acordo com o tipo do suporte recomendado. Para o caso do maciço de Córrego do Sítio, como mostrado na seção 6.2, será aplicada a categoria de contenção “3” definida como, ‘atirantamento sistemático, concreto projetado em camada de 5 a 6cm’ (traduzido de NGI 2015). Sendo assim, o comprimento dos tirantes é lido no eixo vertical direito e o espaçamento entre eles pode ser definido sem uso de concreto

projetado (linha de baixo) ou com tirantes com concreto projetado (curva superior). Para este estudo, as estimativas serão lidas utilizando a linha de baixo.

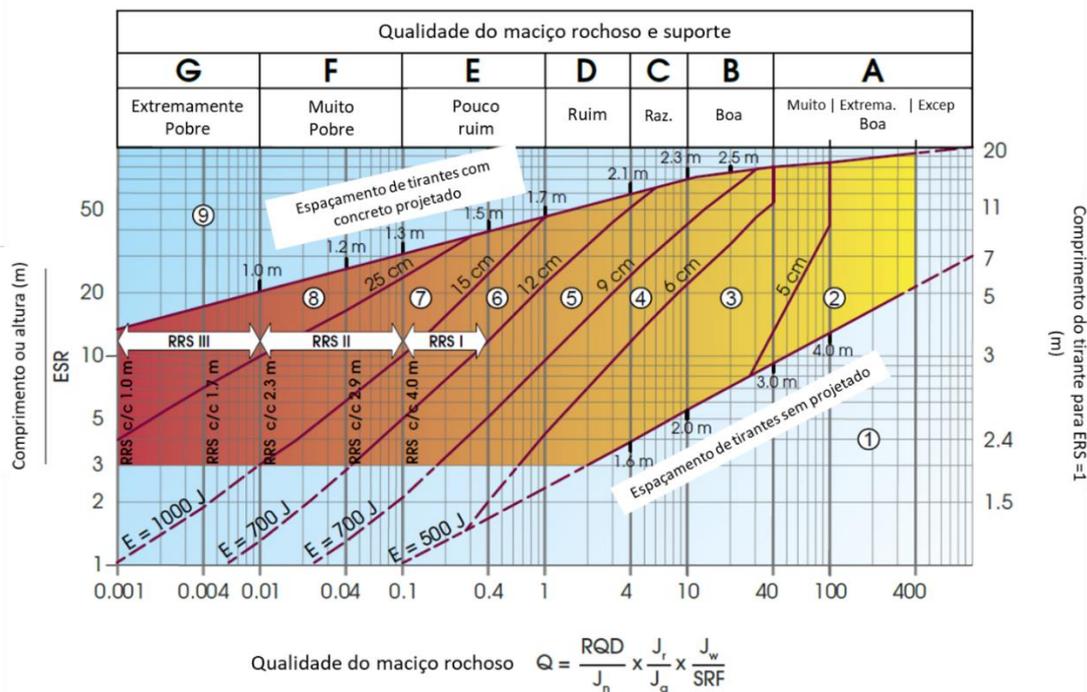


Figura 4.1 - Recomendação de suporte permanente com base no sistema Q (adaptado de NGI 2015)

4.2 INSTABILIDADE CONTROLADA POR ESTRUTURAS

A formação de cunhas por controle estrutural é o sistema de instabilidade mais comum em escavações em rochas fraturadas em baixa profundidade (Hoek 1995). As cunhas são formadas pela interseção de descontinuidades tais como acamamento, juntas e outros e a menos que medidas sejam tomadas para suportar essas cunhas, a parede das escavações pode se desestabilizar rapidamente.

Para lidar com este problema é necessário identificar cunhas potenciais com base no tamanho da galeria e na orientação das estruturas e calcular o fator de segurança das cunhas, dependendo do modo de ruptura. Essa análise depende das diversas propriedades geomecânicas das descontinuidades para calcular a força deslocante.

O padrão de contenção da mina subsolo de Córrego do Sítio, é atualmente avaliado por instabilidade controlada por estruturas segundo o método de Equilíbrio Limite considerando o modelo de Mohr-Coulomb para definir a resistência ao cisalhamento. Neste, uma vez estimadas as maiores cunhas possíveis, é calculado qual o tipo de suporte necessário para estabilizar estas cunhas sendo adotados fatores de segurança de pelo menos 1,3 em galerias temporárias e 1,5 em galerias permanentes

segundo a equação (4.1) (Hoek *et al.* 1995, Unwedge 2018, Li 2017). Para o caso da mina Córrego do Sítio adota-se fator de segurança 1,5 para todas as escavações.

$$Fator\ de\ Segurança\ (FS) = \frac{Forças\ Resistêntes}{Forças\ Deslocantes} \quad (4.1)$$

4.2.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

O método de equilíbrio limite é uma análise determinística em que o fator de segurança é calculado para cada uma das cunhas possíveis considerando as forças deslocantes e resistentes atuantes sobre o corpo. Como forças deslocantes entendem-se as forças ativas que tendem a iniciar movimentação no bloco, tais quais peso, pressão de água e tensão do maciço. As forças resistentes são aquelas cuja ação auxilia na estabilidade no bloco, tais como atrito e coesão das discontinuidades e o suporte ativo (força originada na instalação de tirantes com protensão). A estabilidade destes é calculada com o uso do programa Unwedge, da RocScience, que calcula o fator de segurança de três métodos com enfoques em forças distintas.

Para efeito de simplificar o estudo de sensibilidade, foi escolhido trabalhar com o cálculo do fator de segurança com suporte, que considera a atuação das forças resistentes provenientes das juntas e da contenção.

A resultante das forças deslocantes (A) é definida pela soma vetorial mostrada na equação (4.2).

$$A = W + C + X + U + E \quad (4.2)$$

W = Vetor da força peso da cunha;

C = Vetor do peso do suporte de face (concreto projetado);

X = Vetor da força de pressão ativa;

U = Vetor da pressão de água;

E = Vetor da força sísmica.

A resultante das forças passivas (P) provenientes da contenção aplicada é definida pela soma vetorial mostrada na equação (4.3):

$$P = H + Y + B \quad (4.3)$$

H = Vetor de resistência ao cisalhamento do concreto;

Y = Vetor da força de pressão passiva;

B = Vetor da força de tracionamento dos tirantes.

O fator de segurança é então calculado com base nas forças de tensão e cisalhamento, as forças de suporte e as forças resistentes do sistema de juntas segundo a equação (4.4):

$$FS = \frac{-P \cdot \hat{S} + \sum_{i=1}^3 (J_i^S + T_i)}{A \cdot \hat{S}} \quad (4.4)$$

FS = Fator de segurança;

J_i^S = Magnitude da resistência devido a junta i suportada;

T_i = magnitude da força resistente devido à resistência a tração da junta i;

\hat{S} = Direção de queda.

O termo J_i^S computa a resistência à deformação por deslizamento de cada descontinuidade envolvida na formação da cunha a partir da equação (4.5):

$$J_i^S = \tau_i a_i \cos \theta_i \quad (4.5)$$

τ_i = Força de cisalhamento da iesima junta;

a_i = Área da iesima junta;

θ_i = Ângulo formado entre o sentido de deslizamento e a iesima junta.

A resistência a compressão deve ser definida pelo critério de Mohr-Coulomb ou pela *Power Curve Strength*. Ela age na direção normal ao plano da junta e é computada segundo a equação (4.6)

$$T_i = \sigma_{ti} a_i \sin \theta_i \quad (4.6)$$

σ_{ti} = resistência a compressão da iesima junta;

a_i = Área da iesima junta;

θ_i = Ângulo formado entre o sentido de deslizamento e a iesima junta.

A orientação das principais forças consideradas é demonstrada na Figura 4.2.

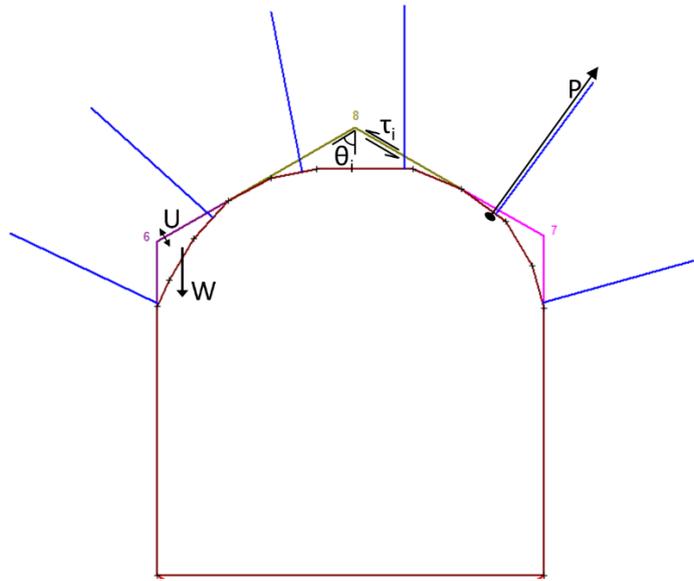


Figura 4.2 - Orientação das principais formas consideradas nas análises de fator de segurança do padrão de contenção.

5.1 INTRODUÇÃO

Ang & Tang (1975), reconhece que as propriedades geotécnicas dos solos e maciços rochosos são inerentemente variáveis afetando significativamente as propriedades do maciço e consequentemente, o comportamento de escavações realizadas neste, resultando em risco de instabilização. Desta forma, diversas alternativas matemáticas são buscadas para a solução de problemas analíticos em engenharia em que diversas forças são envolvidas.

A maior limitação das abordagens matemáticas, entretanto é que as cargas que agem sobre as estruturas não são constantes durante toda a vida útil da escavação (pois as tensões são redistribuídas a medida que as escavações progridem) e que as propriedades dos materiais nem sempre são determinados previamente com acurácia desejável (Denoel 2007). Uma abordagem para enfrentar o problema de qualidade de informações de entrada, é compreender em que medida estes dados podem influenciar as análises realizadas.

Para este fim, o método *First Order Second Moment* (FOSM) é amplamente utilizado em problemas de engenharia. Maskey e Guinot (2010) apontam que este método auxilia na estimativa de incerteza em problemas de engenharia. O método utiliza uma linearização da função que relaciona variáveis de entrada com as variáveis de saída (resposta). Wong (1985) destaca ainda que esse é um método de superfície de resposta, compatível com técnicas de modelagem numérica.

5.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO FOSM

Os métodos de estudo para parâmetros de contenção aqui vistos, são cálculos que dependem de variáveis aleatórias independentes para chegar ao valor final. Entende-se por variáveis aleatórias os parâmetros do maciço que apresentam valores incertos ou imprevisíveis segundo uma função definida no espaço amostral em que cada resultado possível corresponde a um valor numérico (Kottegoda & Rosso 1997). Dessa forma, é importante entender a variância dos parâmetros do maciço e a sensibilidade, que os métodos de avaliação de contenção, têm em relação a eles.

Para isso será utilizado o método (FOSM). A base deste é o truncamento da Série de Taylor, desenvolvida para a determinar a “probabilidade de uma função com um número de variáveis aleatórias” (Assis 2002). Ainda segundo Assis (2002), esse truncamento é uma aproximação para fins práticos que

despreza os efeitos do terceiro e quarto momentos probabilísticos. O método consiste em avaliar a função f para todos os pontos médios de todas as variáveis independentes e, em seguida, avaliar a variância de “ f ” a partir dos desvios padrões de cada uma das variáveis independentes, segundo a equação (5.1).

$$V[f] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad (5.1)$$

Sendo:

$V[FS]$ = variação do fator de segurança;

$\sigma[x_i]$ = variância de x_i .

Assim os valores de $V[FS]/\sigma[x_i]$ são obtidos calculando a equação (5.1) “ n ” vezes sendo que para cada cálculo somente um dos parâmetros é variado dentro de seu desvio padrão, enquanto os demais são mantidos fixos no valor de média. Este cálculo foi realizado de duas formas: a sensibilidade do suporte estimado a partir do sistema Q; e a sensibilidade do suporte calculado a partir da equação (4.4) usada pelo software Unwedge. Estes puderam ser então discutidos e comparados.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DE DADOS

6.1 ANÁLISE DE DADOS

Para a análise do método FOSM, foi necessária a realização do cálculo de média e da variância de todos os parâmetros avaliados para os xistos presentes na mina de Córrego do Sítio (CdS). Estas análises foram realizadas a partir do banco de dados geotécnicos da AngloGold Ashanti, estando os resultados expressos nas Tabelas 6.1 a 6.4. Como este estudo está focado nas escavações em condições normais da mina, as condições excepcionalmente ruins foram retiradas do banco de dados. Estas constituem casos de falhamento persistente com maior grau de alteração ou percolação de água, que ocorrem localmente na mina e cujo tratamento e contenção exigem acompanhamento da equipe de geotecnia, não estando estes casos abrangidos pelo padrão de contenção generalizado da mina.

Tabela 6.1 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, das rochas presentes em CdS.

Parâmetros do maciço	Condição	\bar{x}	σ_x	Unidade
RQD		75	22	%
Jn	2f+	6	3	
SRF		1.25	0.25	
Jw	Seco	1	0.3	
Pressão de água (Pp)	Seco	0.0	0.1	MPa

Tabela 6.2 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, da família de descontinuidades S1.

Parâmetros de S1	Condição	\bar{x}	σ_x	Unidade
ϕ (ângulo de atrito)		35	10	°
c (Coesão)		6	3	t/m ²
JRC	Plano Liso	9	-	
Jr (Rugosidade)	Plano Liso	1	0.5	
Ja (Alteração)	Inalterado	1	0.25	
Persistência	Infinita	-	-	m
Mergulho (M)		66	15	°
Direção de mergulho (DM)		125	23	°

Tabela 6.3 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, da família de descontinuidades S2.

Parâmetros de S2	Condição	\bar{x}	σ_x	Unidade
ϕ (ângulo de atrito)		45	10	°
C (Coesão)		7	3	t/m ²
JRC	Plano Rugoso	11	-	
Jr (Rugosidade)	Plano Rugoso	1.5	0.5	
Ja (Alteração)	Inalterado	1	0.25	
Persistência		8	4	m
Mergulho (M)		35	20	°
Direção de mergulho (DM)		300	15	°

Tabela 6.4 - Descrição dos parâmetros geotécnicos, em valores médios e desvio padrão, da família de descontinuidades F3.

Parâmetros de F3	Condição	\bar{x}	σ_x	Unidade
ϕ (ângulo de atrito)		45	10	°
C (Coesão)		7	3	t/m ²
JRC	Plano Rugoso	11	-	
Jr (Rugosidade)	Plano Rugoso	1.5	0.5	
Ja (Alteração)	Inalterado	1	0.25	
Persistência		6	3	m
Mergulho (M)		79	20	°
Direção de mergulho (DM)		44	15	°

Para os parâmetros descritos de forma qualitativa (número de famílias de descontinuidades, alteração, rugosidade, fluxo de água), foram atribuídos os valores numéricos, de acordo com o cálculo do sistema Q, para que fosse possível a avaliação estatística destes parâmetros. O RQD foi calculado a partir das medidas diretas realizadas em testemunhos de sondagem e das medidas de fraturas por metro coletadas em campo adaptadas segundo o par de equações de Palmstrom (1982) [Eq 3.2]. O parâmetro Q de referência foi alcançado através de estimativa a partir dos parâmetros médios de todos os componentes de seu cálculo.

As avaliações de mergulho e direção de mergulho foram feitas com auxílio do programa Dips, da Rocscience. A coesão das descontinuidades, foi estimada a partir de ensaios de compressão triaxial com descontinuidades orientadas no sentido da ruptura, esses valores foram então comparados a valores teóricos para rochas semelhantes. Os ângulos de atrito foram estimados a partir de valores teóricos calculados a partir da relação de JRC.

Vale ressaltar que, segundo a equação 4.4, espera-se uma influência da resistência à tração (T_i) da junta para a definição do fator de segurança de blocos, principalmente quando não suportados. Entretanto não existem ensaios para determinar estes parâmetros na mina. Na ausência de valores

factíveis para tal parâmetro, adotou-se trabalhar com o mesmo zerado. Entende-se ser essa uma decisão razoável por ser esse o procedimento adotado atualmente na mina e ser esse a favor da segurança.

6.2 RECOMENDAÇÃO DE SUPORTE PELO SISTEMA Q

O primeiro método a ser analisado foi o Sistema Q. Os parâmetros definidos nas Tabela 6.1 e 6.2 foram utilizados para calcular a classificação Q. Essa classificação é feita apenas segundo a descontinuidade principal S1 por haver a compreensão de que está é a descontinuidade mais crítica. Como ponto de partida, todas as variáveis de entrada foram consideradas em seus valores de média, obtendo-se como resultado, uma estimativa de Q com valor igual a 10. A partir deste, segundo a metodologia FOSM, cada valor foi variado individualmente em seu range máximo, com objetivo de determinar seu fator de influência segundo mostrado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Resultados da análise pelo método FOSM para a influência dos parâmetros sobre o cálculo da classificação Q.

	\bar{X}	σ_x	Q Calculado	Q inicial	Influência (%)
RQD	77	22	7.1	10	16.4
J _n	6	3	6.7	10	18.6
J _r	1	0.5	5.0	10	27.9
J _a	1	0.25	8.0	10	11.2
J _w	1	0.3	7.0	10	16.7
SRF	1.3	0.25	8.3	10	9.3

Analisando os resultados na tabela, é possível observar que o parâmetro com maior influência sobre a classificação Q é o fator J_r com uma influência de 27,9%. É esperada a grande influência deste parâmetro se considerado seu efeito tanto no ângulo de atrito quanto na coesão das descontinuidades. Os fatores J_n e RQD também apresentam grande influência uma vez que têm papel importante na definição de cunhas que possam a vir a se movimentar.

No gráfico de recomendação de suporte mostrado na Figura 6.1 podem ser vistos os valores calculados de Q pela altura da escavação. Em verde observa-se o valor de Q para todos os parâmetros médios e em marrom valores da variação de Q ao variar cada fator individualmente dentro de seu limite de desvio padrão. Em vermelho foi plotado também o valor mínimo de Q esperado de ser encontrado. Este foi calculado reduzindo os parâmetros de RQD, J_n, J_r e J_a para o mínimo resultando em Q igual a 1,9. Os fatores de J_w e SRF não foram reduzidos por se tratar de uma mina normalmente seca e porque o SRF é dependente do estado de tensão, não sendo esperadas grandes variações em seu valor.

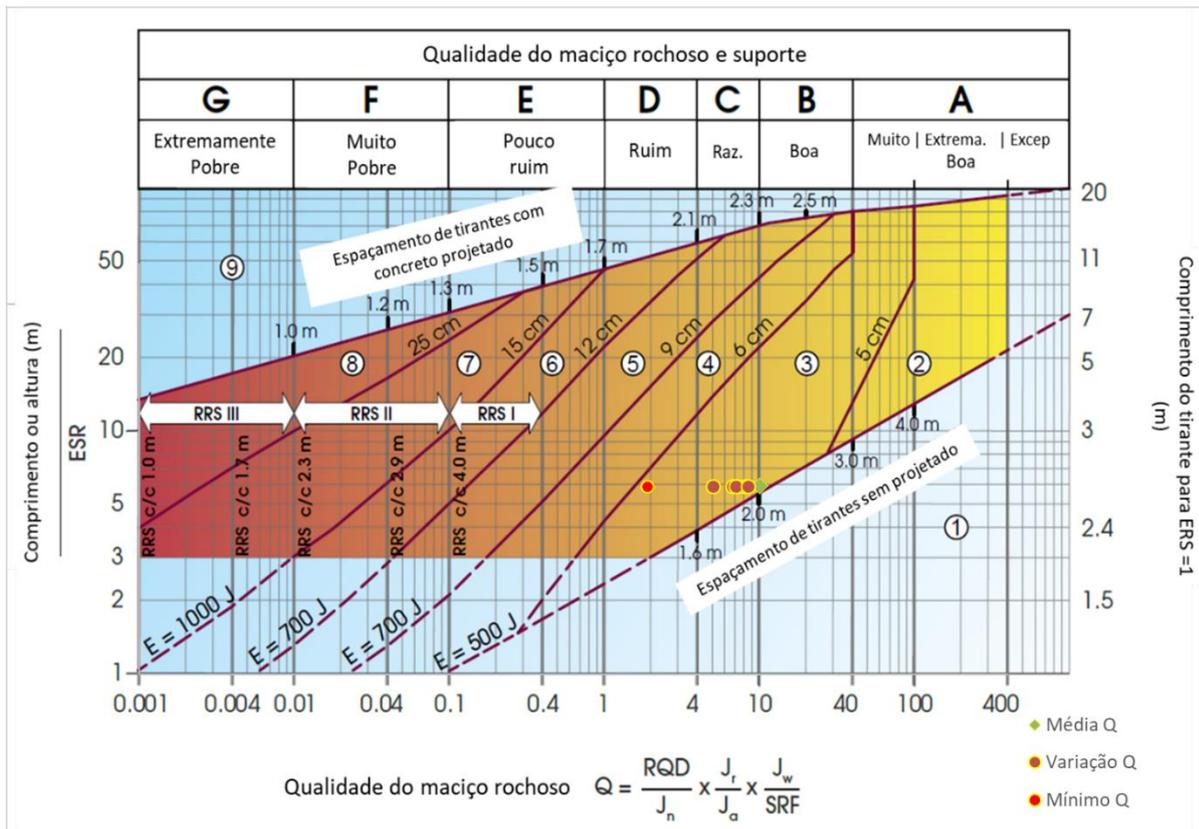


Figura 6.1 - Gráfico de recomendação de (NGI 2015) com valores analisados para a variação de Q. Em verde valor médio de Q, em marrom valores da variação de Q por cada fator, em vermelho valor mínimo de Q esperado de ser encontrado.

Analisando o valor mínimo de Q, tem-se para a dimensão da galeria de 6 m de altura, uma recomendação de suporte com tirantes espaçados em malha de 1,5m com comprimento mínimo de 2,6 m, sem a necessidade de aplicação de suporte de face na forma de concreto projetado, muito próximo dos valores utilizados atualmente na mina.

6.3 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

A avaliação pelo método de equilíbrio limite, considerando resistência ao cisalhamento das descontinuidades pelo modelo de Mohr-Coulomb, foi realizada com o auxílio do programa Unwedge 4.0, da Rocscience. Foi escolhido trabalhar com o critério Mohr-Coulomb por ser esse o utilizado atualmente na mina e pelo fato de os dados disponíveis serem mais adequados para esse modelo.

Foi simulada uma escavação horizontal de azimute 040 de acordo com a orientação média do lineamento aurífero Córrego do Sítio, o que coincide com as galerias de minério, sendo assim a orientação mais frequente das escavações. O comprimento da galeria foi arbitrado em 30 m ressaltando-se que, acima deste comprimento, não há efeito sobre as cunhas formadas. A densidade média da rocha é de 2.7 t/m³ e não foi considerada a atuação de forças sísmicas.

As análises de influência foram realizadas considerando a média dos fatores de segurança de todas as cunhas geradas e não apenas da cunha crítica. Isso pois alguns parâmetros podem não ter sua influência expressa na cunha crítica, e não se tratando de uma análise de estabilidade, esta não é a única cunha de interesse. Tal medida garantiu que todos os parâmetros tenham seus pesos considerados.

Nestas análises não foram incluídas as condições de tensão *in situ*. Isto pois estas dependem diretamente da profundidade das escavações e não devem ser utilizadas em análises de longo prazo (Unwedge 2018). Ressalta-se também que, como para o caso de Córrego do Sítio, a mina é relativamente rasa, as tensões atuam apenas no sentido de prender as cunhas aumentando os fatores de segurança, não sendo observada ruptura da resistência do maciço. Assim sendo, e observando que as informações sobre as tensões *in situ* são limitadas, e este estudo se propõe a aplicações de longo prazo, escolheu-se por não trabalhar com este parâmetro.

As análises foram feitas considerando as famílias de descontinuidades principais mostradas na Figura 6.2. Suas propriedades iniciais foram definidas de acordo com as médias definidas nas

Tabela 6.2 a 6.4. O padrão de contenção utilizado para as análises foi de acordo com o utilizado atualmente na mina Córrego do Sítio. O padrão de contenção para vãos com abertura de até 6 m é constituído por tirantes de 2,4 m e 22 mm de diâmetro, com 27 toneladas de capacidade nominal de resistência a tração, dipostos em malha estagiada com espaçamento de 1,5 m, com protensão e aplicação de resina, como visto na Figura 6.3.

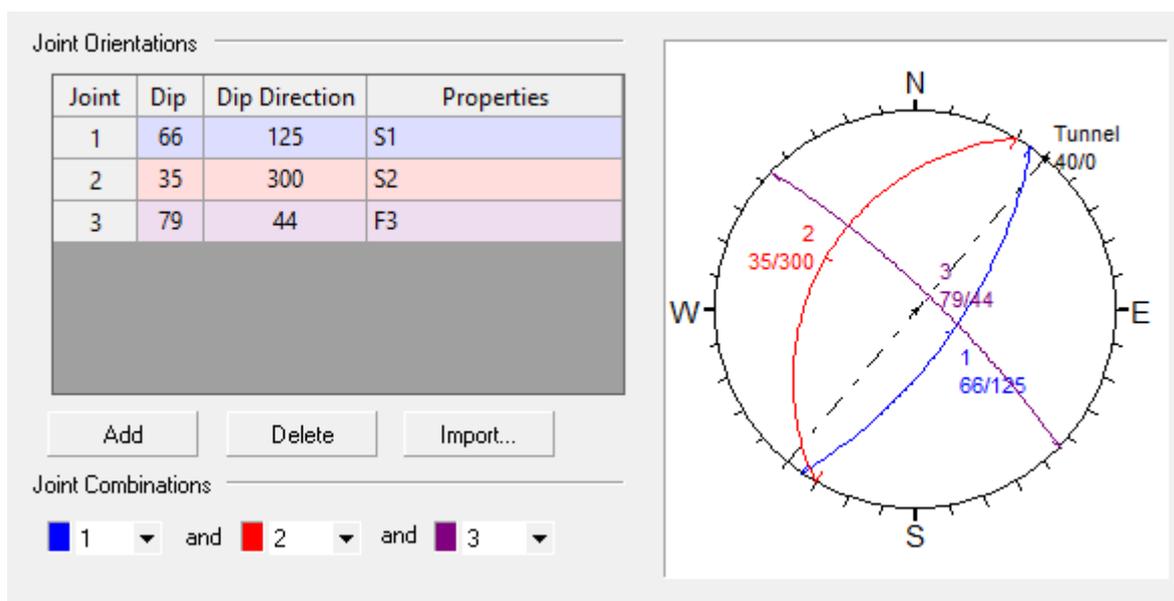


Figura 6.2 - Orientação das descontinuidades principais analisadas.

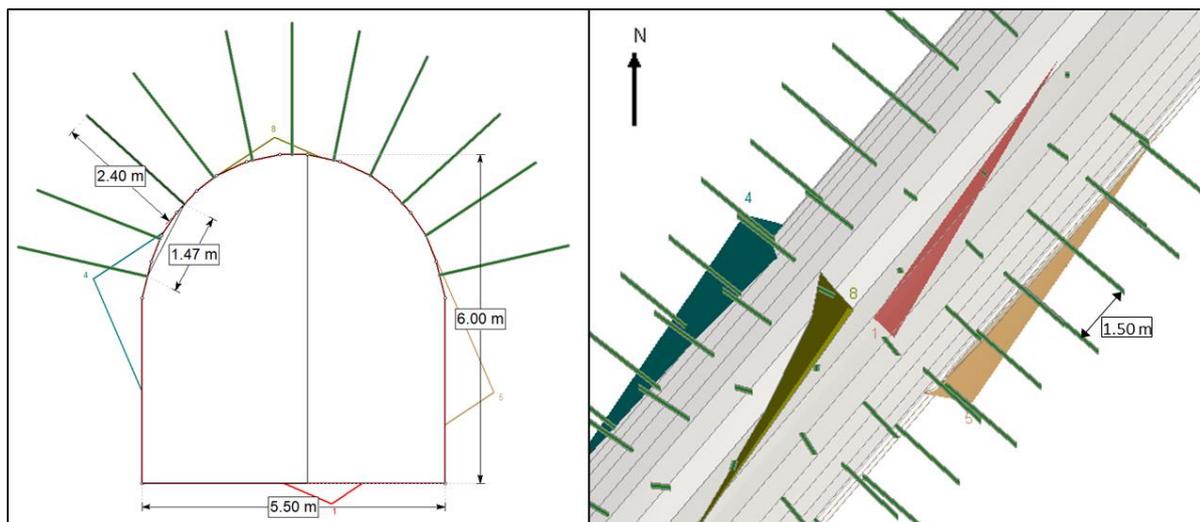


Figura 6.3 - Disposição da escavação com azimute 040 e sistema de contenção padrão com cunhas formadas pelas descontinuidades médias.

Variando os parâmetros individualmente, segundo o método FOSM, foi possível estabelecer as influências individuais de cada um dos parâmetros para o cálculo da estabilidade via equilíbrio limite (Tabela 6.6). Nesta análise foram variados os parâmetros de orientação das descontinuidades, orientação de desenvolvimento da galeria (azimute e caimento), coesão, ângulo de atrito e poro pressão das três descontinuidades e persistência de S2 e F3. A persistência de S1 não foi alterada porque Tabela 6.2 ela é considerada infinita por se tratar de uma foliação bem marcada. Todos os parâmetros foram variados para cima e para baixo, exceto poro pressão em que a média é zero, por se tratar de uma mina seca.

Nestas condições é possível observar que os parâmetros tiveram influências fortemente variáveis de 0,03 a 23,8%. O parâmetro com maior influência é o comprimento do traço de S2, uma família de fraturas de clivagem sub-horizontais. Regiões que apresentem traço de S2 maior que a média tem comportamento pouco piorado, porém, regiões com traço menor que a média apresenta uma condição muito melhorada chegando a 23,8% de influência. De forma semelhante, os parâmetros de orientação das três famílias de descontinuidade, apesar de apresentarem uma significativa variação de influência entre si, podem ser entendidos de forma conjunta como um fator de grande influência, acumulando cerca de 50%. Essas duas condições são esperadas por se tratar de uma análise cinemática na qual as cunhas formadas têm papel principal na definição da estabilidade. Pelo mesmo motivo, a orientação da galeria também apresentou grande influência, tanto quanto ao sentido de avanço, quanto ao mergulho.

É interessante observar que pouca influência é aferida para os parâmetros de coesão de descontinuidade e ângulo de atrito, havendo prevalência da coesão sobre o ângulo de atrito. A poro

pressão também apresentou baixa influência. Estes são assim interpretados pela baixa variação destes parâmetros, em particular a poro pressão.

Tabela 6.6 - Resultados da análise pelo método FOSM para a influência dos parâmetros geomecânicos para análise de estabilidade via equilíbrio limite.

	\bar{X}	σ_x	FS Calculado	FS inicial	Influência (%)
S1 DM	125	23	6.4	9.3	5.18
S1 M	66	15	10.2	9.3	1.57
S2 DM	300	15	14.8	9.3	9.58
S2 M	35	20	7.3	9.3	3.62
F3 DM	44	15	10.2	9.3	1.48
F3 M	79	20	9.1	9.3	0.48
S1 DM	125	-23	8.2	9.3	2.06
S1 M	66	-15	13.3	9.3	6.94
S2 DM	300	-15	7.5	9.3	3.19
S2 M	35	-20	17.0	9.3	13.51
F3 DM	44	-15	11.0	9.3	2.88
F3 M	79	-20	9.3	9.3	0.13
Sentido de desenvolvimento	40	180	4.9	9.3	7.92
Caimento	0.0	14	7.6	9.3	3.15
φ S1	35	10	9.5	9.3	0.22
c S1	6	3	10.4	9.3	1.87
φ S2	45	10	9.6	9.3	0.48
c S2	7	3	10.2	9.3	1.60
φ F3	45	10	9.4	9.3	0.05
c F3	7	3	9.6	9.3	0.45
φ S1	35	-10	9.2	9.3	0.17
c S1	6	-3	8.3	9.3	1.87
φ S2	45	-10	9.2	9.3	0.34
c S2	7	-3	8.4	9.3	1.60
φ F3	45	-10	9.3	9.3	0.03
c F3	7	-3	9.1	9.3	0.45
Persistência S2	8	4	8.6	9.3	1.28
Persistência F3	6	3	9.3	9.3	0.00
Persistência S2	8	-4	22.8	9.3	23.84
Persistência F3	6	-3	8.9	9.3	0.84
Pp S1	0.0	0.1	8.4	9.3	1.68
Pp S2	0.0	0.1	8.5	9.3	1.48
Pp F3	0.0	0.1	9.3	9.3	0.05

7.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

O estudo de equilíbrio limite pelo critério de Mohr-Coulomb foi concordante, com uma margem de erro pequena, com a estimativa de contenção pelo Sistema Q, quando considero o pior cenário provável. Isso mostra que o Sistema Q é sim um método interessante para avaliar a contenção na forma como é usada em modelagens numéricas para prever, as condições pela qual a mina se desenvolverá, servindo assim como boa ferramenta de apoio.

As limitações do Sistema Q entretanto, estão relacionadas a este não considerar a orientação relativa das descontinuidades nem seu traço. Esta limitação pode resultar em análises excessivamente otimistas ou pessimistas. A aplicação do método FOSM na análise de equilíbrio limite mostra uma grande dominância desses dois fatores na definição do padrão de contenção. Dessa forma entende-se que mesmo o uso preditivo do Sistema Q deve ser considerado com cautela pois as condições encontradas podem diferir do que foi modelado.

Nas condições encontradas na mina de Córrego do Sítio, o traço da descontinuidade S2 é um dos fatores mais influentes na estabilidade de escavações e deve ser monitorado quando se for tomar decisões a respeito do posicionamento e orientação das escavações. É possível também perceber que quando S1 e S2 apresentam tendência a horizontalização, (chegando a mergulhos de 51° e 15° respectivamente) o fator de segurança médio das cunhas formadas tende a aumentar. Finalmente observa-se que as orientações de S1 e S2 têm maior influência que a orientação de F3 dentro do range de desvio padrão destas descontinuidades dessa forma, é necessário maior esforço em mapear suas variabilidades locais. A influência da orientação relativa das descontinuidades é observada também em ao ser variado o sentido de desenvolvimento e caimento da escavação considerada, mostrando ser relevante a orientação relativa das descontinuidades não apenas entre si, mas também com a escavação.

Os efeitos da coesão, ângulo de atrito e poro pressão se mostraram bastante reduzidos na análise de equilíbrio limite, ao contrário da análise segundo o sistema Q. Entende-se que essas forças apesar de importantes, tem influência reduzida se comparada com a variação do peso das cunhas possível em análise.

7.2 ANÁLISE DO MÉTODO FOSM

O uso do método FOSM se mostrou de grande aplicabilidade quando se busca compreender o efeito de cada parâmetro na eficiência do sistema de contenção. Este entendimento pode ser aplicado na tomada de decisões sobre a alocação correta de galerias auxiliares, ou direcionar o sentido ideal de desenvolvimento das porções longas da rampa (direções a qual a rampa se desenvolve em trecho mais retilíneo).

Esta mesma metodologia pode ser aplicada em outras situações buscando melhor entender os controles geomecânicos mais influentes das diversas intervenções geotécnicas. Dessa forma possibilitando melhor direcionamento dos estudos e a tomada de medidas para contornar possíveis problemas.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Considerando a metodologia FOSM para análise de influência, aplicada análise de equilíbrio limite em estabilidade de cunhas em escavações subterrâneas, é notável o controle da estabilidade de cunhas pela orientação relativa das descontinuidades, entre si e à galeria, e pelo traço das descontinuidades formadoras das cunhas em especial da foliação S2. Entende-se que, em condições normais, locais onde as descontinuidades de S1 e S2 tem seu mergulho variado segundo seu desvio padrão, no sentido de se horizontalizar (chegando a mergulhos de 51° e 15° respectivamente) e locais onde o traço de S2 for menor, apresentarão maior estabilidade.

O Sistema de classificação Q se mostra limitado por não considerar estas propriedades. A incoerência entre a resposta à influência da influência para Jr e a resposta para influência para coesão e ângulo de atrito via equilíbrio limite reforça que o uso de sistema que deve ser feito com cautela. Ainda assim, entende-se que esse método é suficiente para previsão de condições por meio de modelagens numéricas .

Fica claro também que as decisões referentes á posicionamento de estruturas auxiliares ou sentido de desenvolvimento da porção longa de rampa devem ser embasadas na orientação relativa das descontinuidades e pelo traço, principalmente de S2, e não pela classificação padronizada do maciço feita pelo Sistema Q.

Entender em que escala cada parâmetro geomecânico influencia a estabilidade em escavações subterrâneas é de grande importância para o planejamento de rampas e galerias de acesso, e particularmente para a alocação de galerias auxiliares tais como praça de sonda, estações de bombeamento, etc. Para este fim, o método FOSM se mostrou uma ferramenta eficaz em estudos de sensibilidade.

Para trabalho futuros, é sugerido estudos para entender qual o modelo de resposta do material a tensão, mais adequado para as análises de equilíbrio limite, testando os critérios de resistência Mohr-Coulomb, Barton-Bandis, para avaliar as diferenças nos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ang, A.H.S. & Tang, W. 1975. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles*. John Wiley & Sons, New York, USA, vol. 1, 422 p.
- Assis, A.P. 2001 *Mecânica das rochas: Estabilidade de Taludes*. Mestrado Profissional Geotecnia de Barragens – UFOP. Ouro Preto. Brasil.
- Assis, A.P. 2002. *Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental. Brasília. Brasil.
- Azevedo U.R. 2007. *Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Potencial para a Criação de um Geoparque da UNESCO*. PhD Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 211p.
- Baltazar O.F, Baars F.J., Lobato L.M., Reis L.B., Achtschin A.B., Berni G.V., Silveira V.D. 2005. Mapa Geológico com nota explicativa em escala 1:50000. In: *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG*.
- Barton N.R. 1987. *Predicting the behaviour of underground openings in jointed rock*. In: 4th Manual Rocha Memorial Lecture. Lisboa.
- Barton N.R. 1971. *A relationship between joint roughness and joint shear strength*. Rock Fracture-Proc, Int. Symp. on Rock Mechanics. Nancy: France, p. 1-8.
- Barton N.R. 1974. *A review of the shear strength of filled discontinuities in rock*. Norwegian Geotech.
- Barton N.R., Lien R., & Lunde J. 1974. *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mechanics **6**:189-236.
- Barton N.R. 2002. *Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences **39**:185-216.
- Canale A.L. 1999. *Geologia do Depósito Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero (MG), e Caracterização Mineralógica do Minério Sulfetado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 142p.
- Deere D.U. 1963. *Technical description of rock cores for engineering purpose*. Rock Mechanics and Engineering Geology, p. 17-22.
- Denoel V. 2007. *An introduction to reliability Analysis*. University of Liege. Disponível em <https://orbi.uliege.be/bitstream>. Acessado em 08 jun 2019.
- Dorr II J.V.N., Pomerene J.G., Rynearson G.A. 1957. *Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero*. Departamento Nacional da Produção Mineral - Divisão de Fomento da Produção Mineral, p. 1-31.
- Grimstad E., Barton N.R., Loset, F. 1993. Rock mass classification and NMT support design using a new Q-system chart. *World Tunnelling*.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawder W.F. 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema. Holanda.
- Kottogoda N.T., Rosso R. 1997. *Statistics, Probability, and Reliability for Civil and Environmental Engineers*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA, 735 p.
- Li C.C. 2017. Principles of rockbolt design. *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, **9**:396-414.

- Lima L.C. 2012. *Geologia do depósito LODE Au-As-Sb Laranjeiras, em mataturbiditos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. PhD Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 323p.
- Lima T.C.A. 2016. *Análise técnica e econômica para utilização de cabos duplos em realces de sublevel na mina pequizão – Mineração Serra Grande, Crixás – GO*. MS Dissertation. Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, 188p.
- Maskey S., Guinot V. 2010. *Improved first-order.second.moment method for uncertainty estimation in flood forecasting*. Hydrological Sciences Journal, **48:2**:183-196.
- NGI. 2015. *Using the Q-system – Rock mass classification and support design*. Norwegian Geotechnical Institute. Oslo, Noruega. 56p.
- Noce C.M. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, 128p.
- Palmstrom A. 1982. *The volumetric joint count – A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing*. In: IV Congress International Association of Engineering Geology. Nova Deli, **2**:221-228.
- Palmstrom A., Broch E. 2006 *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system*. Tunnelling and Underground Space Technology, **6**:575-593.
- Patton F.D. 1966. *Multiple modes of shear failure in rock and related materials*. Tese de Ph.D. Universidade de Illinois, Illinois.
- Porto C.G. 2008. *A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o enxame de diques metamórficos no corpo Cachorro Bravo – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Silva J.M. 1998. *Análise da determinação da rugosidade da superfície de descontinuidades rochosas*. MS Dissertation. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Silva J.M. 2005. *Estudo do fluxo de material fragmentado na mineração subterrânea, com o uso de modelos físicos*. PhD Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Silva J.M. 2018. *Sustentação de Escavações Subterrâneas Civis e de Mineração*
- Singh, B. & Goel, R. K. 2011. *Engineering Rock Mass Classification – Tunneling, Foundations, and Landslides*. Elsevier Inc. USA.
- Schorscher J.H.D. 1992. *Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos pré-cambrianos do sudeste de Minas Gerais: quadrilátero ferrífero, espinhaço meridional e domínios granito-gnáissicos adjacentes*. Tese (Livre Docência em Mineralogia e Petrologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 274p.
- UNWEDGE 2018 *Manual de Teoria do Unwedge – Cálculo do Fator de Segurança*. Disponível em https://www.rocscience.com/downloads/unwedge/unwedge_theory.pdf. Acessado em 03 nov 2018
- Wong, F.S. 1985. *First-order, second-moment methods*. Computers & Structures, **20.4**:779-791.