

Análise de Estabilidade de Taludes com Foco em Sistemas de Classificações Geomecânicas e Abordagens Probabilísticas na Mina de Fábrica (Minério de Ferro) – Vale S.A., Brasil

Henrique de Andrade Penido

Vale SA, Belo Horizonte, Brasil, henrique.penido@vale.com

SUMÁRIO: Este artigo apresenta estudo que utiliza métodos computacionais aplicados à avaliação da estabilidade dos taludes da Cava Final do Segredo localizada na Mina de Fábrica, no Quadrilátero Ferrífero-MG. O principal objetivo deste artigo é aplicar o sistema GSI nos maciços rochosos utilizando ferramentas estatísticas e interpretar os resultados. O estudo enfatiza a análise estatística e o sistema de classificação geomecânica GSI (Geological Strength Index). Foram realizadas análises de equilíbrio limite utilizando o código comercial Slide (Rocscience), sendo consideradas ferramentas estatísticas e levando em conta a variabilidade dos parâmetros geomecânicos. O sistema de classificação geomecânica de maciço rochoso utilizado pela Vale é discutido, bem como o uso do GSI. Os parâmetros de resistência utilizados foram os disponíveis no banco de dados das Gerências de Geotecnia de Minério de Ferro dos Sistemas Sul, Sudeste e parte do Norte da Vale S.A.. Projetos existentes e avaliações geotécnicas foram também analisados, bem como investigações geotécnicas e registros de instrumentação. O trabalho mostrou que o uso do GSI pode ser interessante para a aplicação nas cavas da Vale S.A. quando se visa à determinação de parâmetros geotécnicos para a realização de análises de estabilidade em maciços rochosos condicionados pelas estruturas/descontinuidades.

PALAVRAS CHAVE: Sistemas de Classificação Geomecânica, GSI - *Geological Strength Index*, Mecânica de Rochas, Análises de Estabilidade de Taludes, Análises Estatísticas.

1 INTRODUÇÃO

A Mina do Segredo está localizada no distrito de Miguel Burnier, em Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. Na Mina do Segredo, há quatro cavas:

- Cava do Ponto 2;
- Cava do Ponto 3;
- Cava do Segredo;
- Cava Área X.

Os objetivos deste artigo são:

- Implantação de análises de estabilidade de taludes, utilizando ferramentas estatísticas que consideram a variabilidade dos parâmetros geomecânicos;

- Avaliação das vantagens do GSI - Geological Strength Index, e sua possível adoção pela Vale S.A. (atualmente a empresa utiliza um RMR modificado);

- Equivalência dos resultados da classificação geomecânica realizada pela Vale S.A. (RMR modificado) para o sistema GSI, bem como a interpretação dos resultados;

- Avaliação do banco de dados de ensaios de campo e de laboratório disponíveis em diversas minas da Vale S.A..

Para o desenvolvimento das análises propostas o pacote de software utilizado foi o da Rocscience (Slide). Os parâmetros de resistência foram fornecidos pelas Gerências de Geotecnia de Minério de Ferro dos Sistemas Sul, Sudeste e parte do Norte da Vale S.A..

Projetos existentes e avaliações geotécnicas foram analisados, bem como investigações geotécnicas e registros de instrumentação.

2 MINA DE FÁBRICA

Após a aquisição da mina de Segredo em 2003 pela Vale, novas avaliações geotécnicas foram realizadas. A mais recente foi realizada em 2011 pela BVP. Este relatório apresenta os resultados do mapeamento lito-estrutural e geomecânico de toda área da cava em escala 1:2000 com 1834 pontos levantados espaçados em 20m.

Além da atualização geológico-geotécnica, este relatório subsidiou a avaliação da estabilidade das cavas operacionais e finais da Mina do Segredo. Embora a cava avaliada no relatório da BVP (Magalhães et al., 2011) não seja a atual, optou-se por utilizá-la de modo a ser possível a utilização de todos os dados lito-estruturais e análises cinemáticas e rupturas globais (plano-circulares e circulares) apresentadas no relatório.

2.1 Classificação e caracterização geomecânica

Para a classificação geomecânica, a Vale S.A. adota o sistema RMR - Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989) modificado, adaptado para suas cavas por grupo interno de especialistas que propôs modificações ao sistema RMR original, modificado para aplicações do os taludes de mineração de ferro.

Em Magalhães et al. (2011), estão disponíveis os dados de: tipos de rocha, dados das estruturas planares e lineares, e os parâmetros geomecânicos.

Com essas informações pôde-se definir às seguintes características geomecânicas: litotipos principais; Grau de Alteração; Grau de Consistência; Grau de Fraturamento; e as principais descontinuidades e suas características, tais como o tipo, o grau de alteração das paredes, a rugosidade da superfície, o tipo de preenchimento e o RQD (Rock Quality Designation).

Visando a padronização da metodologia de cálculo e devido ao baixo número de informações dos parâmetros das descontinuidades nos dados de furos de

sondagens, somente os parâmetros de alteração, consistência e fraturamento foram utilizados para o cálculo das classes geotécnicas em superfície.

Para o cálculo do RMR modificado, foi definida por Magalhães et al. (2011), uma redistribuição dos pesos entre os nove parâmetros geotécnicos conforme a Tabela 1. As classes do RMR modificado são apresentadas na Tabela 2 e são idênticas ao RMR original.

Tabela 1: Tabela de redistribuição dos pesos para o cálculo do RMR modificado (Fonte: BVP, 2011).

GC	GA	Peso
0	1	5
0	2	5
0	3	0
0	4	0
0	5	0
0	6	0
1	1	8
1	2	8
1	3	5
1	4	5
1	5	5
1	6	5
2	1	11
2	2	11
2	3	8
2	4	8
2	5	5
2	6	5
3	1	27
3	2	27
3	3	14
3	4	14
3	5	11
3	6	11
4	1	36
4	2	36
4	3	27
4	4	27
4	5	22
4	6	22
5	1	55
5	2	55
5	3	44
5	4	44
5	5	33
5	6	33
6	1	55
6	2	55
6	3	55
6	4	55

6	5	51
6	6	51

GF	Peso
1	30
2	30
3	25
4	20
5	10
6	5
-	0

Tabela 2: Definição da classe do maciço rochoso de acordo como sistema RMR (1989) (Fonte: BVP, 2011).

Valores de RMR	Classe correspondente	Descrição
100-81	I	Excelente
80-61	II	Muito Boa
60-41	III	Boa
40-21	IV	Ruim
<20	V	Muito Ruim

Utilizando a interpretação das seções geológicas, dados de sondagens, mapeamento de superfície, mapas litológicos e topográficos das Cavas Atual e Final; o relatório BVP (2011) propôs um mapa lito-geomecânico da Cava Final. Noventa e quatro seções geomecânicas foram avaliadas. As seções de número 1 a 23 possuem a direção NW-SE e as seções de número 24 a 94 NE-SW.

O mapa lito-geomecânico da Cava Final mostra que 70% de sua totalidade classificada como um Maciço Rochoso Classe V - muito pobre. Na Classe IV, podemos ver pequenos corpos de materiais friáveis, Itabiritos Dolomíticos e Argilosos, Hematitas Friáveis, Xistos e Dolomitos. Na Classe III há corpos de consistência mais compactos, representada por Itabiritos Compactos e Dolomíticos e ainda mais restritamente, ocorrências de Itabiritos Compactos, classificados como Classe II.

2.2 Seções escolhidas para análise

Entre as seções disponíveis do relatório da BVP (2011), doze delas foram escolhidas para análise (Figura 1) devido à sua posição (perpendicular à face do talude) e, portanto, mais representativas. As seções escolhidas e seus respectivos domínios estruturais são listados abaixo:

- Seção 89 (Domínios A e B);
- Seção 77 (Domínios C e D);
- Seções 61 (Domínios F e D);
- Seções 6, 13, 30, 38, 45, 51, 67 e 72 (Domínio D);
- Seção 52 (Domínio E).

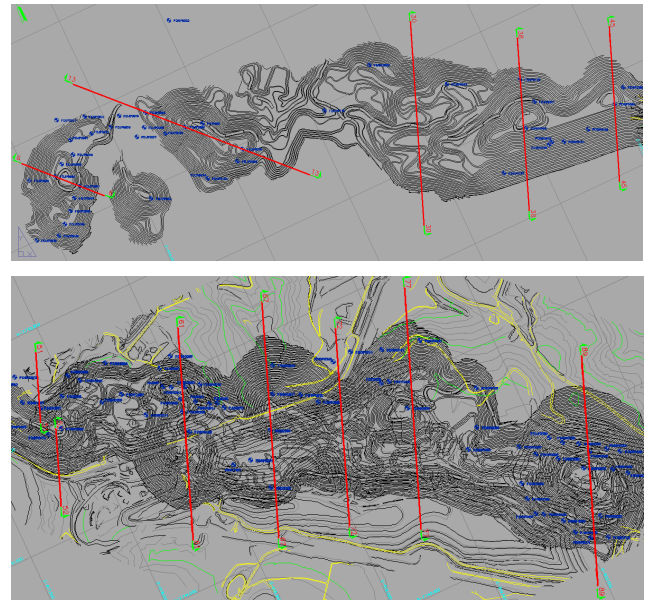


Figura 1: Seções escolhidas para análise da Cava Final da Mina do Segredo

2.3 Análises de Estabilidade

A Tabela 3 apresenta informações das seções de análise segundo Magalhães et al. (2011).

Tabela 3: Seções de análise (Modificado de Penido, 2012).

Seção	Lado da Ruptura	Tipo de ruptura	Classe do maciço
6	Dir.	Planar	V
6	Esq.	Planar	IV/V
30	Esq.	-	II/III/V
38	Dir.	-	IV/V
38	Esq.	Planar	V
45	Dir.	Planar	V
45	Esq.	Planar	V
51	Dir.	Planar	V
61	Esq.	Planar	III/V
67	Dir.	Planar	III/V
67	Esq.	Planar	IV/V
77	Dir.	-	III/IV/V
77	Esq.	Planar	V
89	Dir.	-	V
89	Esq.	Planar	V

Após a definição das seções de análise, as novas análises de estabilidade foram realizadas com dois grupos de parâmetros: o primeiro, determinado a partir dos resultados disponíveis de ensaios laboratoriais em materiais semelhantes; o segundo, por análise utilizando parâmetros obtidos a partir dos dados do RMR modificado disponíveis em Magalhães et al. (2011), transformados em GSI (Geological Strength Index).

A resistência do maciço rochoso depende das propriedades da rocha intacta e também da liberdade dos blocos deslizarem e rotacionarem sob diferentes condições de tensões. Essa liberdade é governada pela forma geométrica dos blocos de rocha intacta, assim como pelas condições das superfícies que definem suas faces. Blocos de rocha angulosos, com descontinuidades rugosas e não-preenchidas irão resultar em um maciço mais resistente do que outro que contenha partículas arredondadas envoltas por materiais intemperizados e alterados. De uma maneira geral, pode-se dizer que a resistência e a deformabilidade do maciço podem ser obtidas por uma redução dessas mesmas propriedades referentes à rocha intacta, levando-se em conta as características geológico-geotécnicas (Penido, 2006). O sistema GSI foi definido por Hoek (1995) justamente com o objetivo de obter parâmetros geomecânicos de maciços rochosos e estimativas da redução da resistência sob diversas condições geológicas.

Como o GSI não considera a orientação do mergulho das estruturas geológicas, este tipo de abordagem só pôde utilizado em rupturas circulares, não sendo utilizado nas análises estruturais (Penido, 2012). Observa-se a importância da avaliação detalhada de cada seção e do tipo de material que a superfície de ruptura está passando, analisando os seus parâmetros, para então definir se estes podem ou não ser utilizados.

2.4 Água Subterrânea

Para todas as análises realizadas optou-se por adotar o nível de água futuro previsto por

bombeamento. A premissa da Vale é que o nível de água seja mantido sempre 10m abaixo do fundo da cava, para permitir a escavação e operação da mina.

2.5 Consolidação dos parâmetros de resistência a partir de ensaios de laboratório

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de resistência utilizados nas análises de Magalhães et al. (2011).

Tabela 4: Parâmetros utilizados nas análises determinados a partir de ensaios de laboratório e estudos realizados em materiais similares

Litologia	RMR (1989)	Orient. foliação	c (kPa)	ϕ' (°)	γ (seco) (KN/m ³)	γ (sat) (KN/m ³)
IF	IV	-	34	36	27	29
IF	V	Paralela	21	35	27	29
IF	V	Perpend.	62	37	27	29
IFA	IV	-	422	11	22	23
IFA	V	-	123	30	20	22
IM	IV	Paralela	31	34	22	23
IM	IV	Perpend.	84	40	22	23
HF	IV	-	220	42	33	36
HF	V	-	80	37	34	40
HC	II	-	367	44	42	46
Dol.	III	-	100	45	27	-
Filito	IV	-	141	141	19	20
Filito	V	-	65	65	20	-
Xisto	IV	-	70	34	20	21
Xisto	V	Paralela	20	24	20	21
Xisto	V	Perpend.	77	28	20	21

2.5 Obtenção do GSI

2.5.1 Considerações

- Conforme descrito anteriormente, a Vale S.A. utiliza a sua própria classificação geomecânica, um RMR modificado que visa caracterizar da melhor forma possível os maciços rochosos presentes no Quadrilátero Ferrífero (formações ferríferas e rochas encaixantes), que se encontram, em sua maior parte bastante alterados.

- Par a obtenção do GSI foram considerados os parâmetros: Grau de Consistência (GC), Grau de Fraturamento (GF) e o Grau de Alteração (GA).

- O GF é utilizado no RMR (mod. Vale S.A.) para a determinação do espaçamento entre as descontinuidades, sendo exatamente o mesmo parâmetro utilizado na determinação do RMR original em relação às descontinuidades.
- É aceitável considerar o parâmetro GC como equivalente ao UCS (Resistência à Compressão Uniaxial) do RMR original. Os parâmetros utilizados para a determinação do GC baseiam-se nos padrões de reconhecimento mundial pela ISRM (Brown, 1981) na descrição da resistência do maciço rochoso.
- O GA que está incluído no RMR (mod. Vale S.A.) não é considerado na RMR original (1989). No entanto, este parâmetro é baseado nas classificações utilizadas pela ISRM para a caracterização de campo de maciços rochosos.
- Devido às considerações acima, e ao fato de que a maioria das amostras classificadas pelo sistema RMR (mod. Vale S.A.), terem alcançado valores de classificação menores que 23, concluiu-se que a relação proposta pela relação 1 (Hoek, 1995) não é aplicável para calcular o GSI para a maioria das litologias, visto que esta relação foi proposta somente para valores de RMR (1989) acima de 23, (RMR>23).

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (1)$$

- Para os valores RMR<23, o índice GSI deveria ser obtido utilizando a fórmula (2), proposta por Hoek, 1995. Como esse grupo inclui os maciços rochosos de Classe V (muito alterado), também não foi possível calcular o GSI devido à falta do índice Q de Barton pela utilização da fórmula. Para estes valores, o GSI só pôde ser calculado pela metodologia proposta por Penido (2012), que será apresentada a diante.

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (2)$$

- Para as análises de estabilidade utilizando o Software Roclab (Rocscience), que considera o critério de Hoek e Brown (1980), são necessárias as definições dos parâmetros: GSI, *m* (constante que para a rocha intacta depende

exclusivamente do tipo litológico), UCS (resistência à compressão uniaxial da rocha) e D (fator dependente do grau de distúrbios causados no maciço rochoso devido aos abalos de detonações), conforme definido por Hoek et al. (1995; 2002), que revisaram o critério de Hoek & Brown (1980) com o objetivo de ampliar a sua aplicação à maciços rochosos fraturados.

Para a conversão das classificações RMR (mod. Vale S.A.) para o GSI, considerando os parâmetros de classificação disponíveis (GA, GC, GF), Penido (2012) propôs o seguinte critério:

- O UCS pode ser obtido com o GC;
- A constante *m* sendo determinada diretamente pela tabela de Hoek & Brown;
- O coeficiente de dano com valor D = 0 (o maciço rochoso sempre é danificado);
- O GA sendo correspondente à linha que classifica a Condição de Superfície do quadro do GSI (Figura 3). Esta linha pode variar desde a classificação “Muito boa” (relacionada ao GA com valor máximo – nota 1, rocha fresca), até a classificação “Muito Ruim” (que pode ser relacionada ao GA com valor mínimo – notas entre 4 a 6, transição em maciço altamente alterado à solo residual);
- O GF sendo correspondente à coluna que classifica a Estrutura no quadro do GSI (Figura 3). Esta coluna pode variar desde a classificação de rocha “Intacta/Massiva” (relacionada ao GF com valor máximo – nota 1, rocha maciça), até a classificação de rocha “Laminada/Cisalhada” (que pode ser relacionada ao GF com valor mínimo – nota 6, maciço fragmentado).

É importante deixar claro que essa transformação do RMR (mod. Vale S.A.) (aplicável às suas minas) para o GSI (utilizando a metodologia acima ou a fórmula Hoek & Brown) irá resultar em um GSI modificado, aplicado às minas da Vale S.A. Desta forma, torna-se necessário considerar que não estamos lidando com o RMR e o GSI originais, e que os resultados com os sistemas originais poderiam ser diferentes.

Há na literatura disponível diversas discussões sobre o uso do sistema GSI aplicado

aos maciços rochosos muito pobres, como exemplo o GSI modificado proposto por Osgoui et al (2010). No entanto, devido à restrição de dados não foi possível aplicação desta abordagem. Para tal, seria necessário um mapeamento específico com esta finalidade, de modo a se obter os dados de entrada.

A Tabela 5 apresenta o critério proposto para comparação entre o RMR (mod. Vale S.A.), o RMR original e o Sistema GSI (mod. Vale S.A.); apresentada por Penido (2012).

Tabela 5: Comparação entre o RMR (mod. Vale S.A.), o RMR (1989) e o GSI (mod. Vale S.A.).

RMR (1989)	RMR (mod. Vale)	GSI (mod. Vale)
UCS	GC	UCS
RQD	RQD	-
Espaçamento Desc.	GF	Estrutura
Condição Desc.	Condição Desc.	-
Condição Água Sub.	-	-
Ajuste Orient. Desc.	-	-
-	GA	Condição da Superfície

2.5.2 GSI adotado para cada litotipo

Com base na análise dos histogramas presentes em Magalhães et al. (2011), que analisaram os parâmetros GA, GC e GF para cada litotipo, e pela metodologia apresentada no item anterior, foi possível a determinação dos valores do índice GSI que são apresentados na Tabela 6.

Visando uma maior representatividade das rochas do Quadrilátero Ferrífero, foi utilizado o quadro modificado do GSI, aplicado a rochas metamórficas (Hoek, 2000). Exceção para os materiais Dolomito e Hematita Compacta, para os foram utilizados o quadro convencional do GSI (Hoek, 2000). Os dados abaixo e a Figura 3 apresentam como exemplo a determinação do índice GSI para os Itabiritos Friáveis de Classes IV e V.

- mi: 20

- UCS: 0.25 to 25 MPA (valores retirados dos histogramas do relatório da BVP 2011)

- 51% dos dados estão entre 1 e 5 MPa

- 32% dos dados estão entre 5 e 25 MPa

Valores adotados:

Itabirito Friável IV: UCS = 15 MPa; GSI = 25

Itabirito Friável V: UCS = 3 MPa; GSI = 15

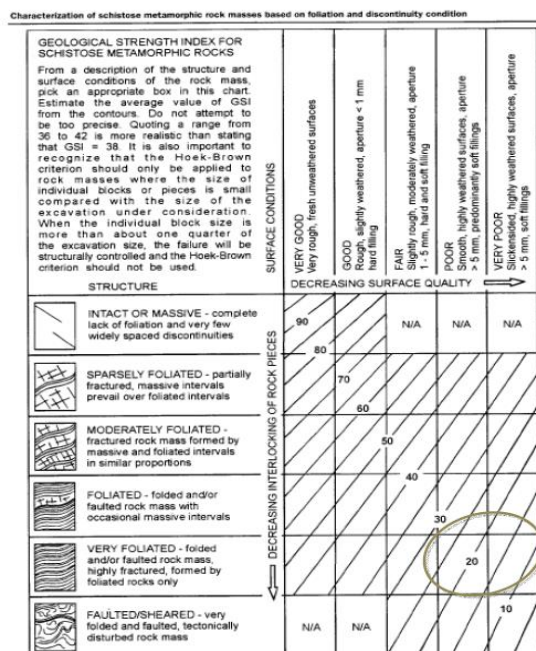


Figura 3: Determinação do GSI para o Itabirito Friável (Fonte: Modificado de Hoek, 2001)

2.5.3 Discussão dos resultados

Comparando os resultados do GSI obtidos pela aplicação da fórmula com os resultados obtidos a partir do GA e do GC, apresentados na Tabela 6, pôde-se verificar que no geral os resultados são compatíveis para todas as classes. No entanto, para os maciços rochosos de Classes I, II e III, os valores do GSI determinados a partir do GA e do GC são geralmente menores do que os calculados a partir da fórmula (1). A Tabela 7 apresenta os parâmetros de laboratório utilizados e os parâmetros calculados a partir do GSI (mod. Vale S.A.). A Tabela 8 apresenta os resultados das análises realizadas para 3 seções utilizando os parâmetros de laboratório e do GSI calculado a partir do RMR (mod. Vale S.A.).

O uso de ferramentas estatísticas é bastante interessante por poderem gerar resultados que levam em conta a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Entretanto, o uso destas ferramentas somente é possível se houver informações suficientes, incluindo uma base de dados completa de ensaios de laboratório, mapeamento geomecânico e geológico-estrutural, furos de sondagens com mapeamentos específicos, etc.

Tabela 6: Índices GSI definidos para cada litotipo

Litologia	RMR	GSI	mi	UCS	GSI (fórmula)
IF	IV	25	20	15	23
IF	V	15	20	3	-
IFA	IV	25	20	15	23
IFA	V	15	20	3	-
IM	IV	30	20	38	25
HF	IV	30	28	15	23
HF	V	15	28	3	-
HC	II	50	28	250	65
HC	III	40	28	175	46
HC	IV	30	28	75	29
Dol.	I	60	9	150	82
Dol.	II	50	9	100	67
Dol.	III	40	9	75	47
Filito	III	45	7	50	46
Filito	IV	30	7	15	26
Filito	V	15	7	3	-
Xisto	III	35	12	60	44
Xisto	IV	27	12	15	23
Xisto	V	20	12	3	-

Tabela 7: Parâmetros de Mohr-Coulomb utilizados nas análises determinados pelo GSI calculado a partir do RMR (mod. Vale S.A.)

Lito	RMR	Orient.	c (kpa) GSI	ϕ' (°) GSI
IF	IV	-	492	31
IF	V	Paral.	-	-
IF	V	Perpen d.	200	18
IFA	IV	-	433	33
IFA	V	-	168	20
IM	IV	Paral.	-	-
IM	IV	Perpen d.	681	41
HF	IV	-	704	34
HF	V	-	269	20
HC	II	-	3395	58
Dol.	III	-	985	41
Filito	IV	-	301	27
Filito	V	-	102	13
Xisto	IV	-	353	30
Xisto	V	Paral.	-	-
Xisto	V	Perpen d.	155	18

Tabela 8: Resultados de análises realizadas utilizando os parâmetros de laboratório e do GSI calculado a partir do RMR (mod. Vale S.A.)

Seção	Lado da ruptura	Classe maciço	Parâmetros	FS
45	Esq.	V	Lab.	1,56
45	Esq.	V	GSI	1,36
51	Direita	V	Lab.	1,44
51	Direita	V	GSI	1,38
77	Direita	III/IV/V	Lab.	1,32
77	Direita	III/IV/V	GSI	1,31

2.6 Análises Probabilísticas

Este tipo de análise foi realizado utilizando as ferramentas estatísticas (análise probabilística) disponível no Software Slide. Nessa análise foram considerados: a média e o desvio-padrão dos ângulos de atrito e dos valores de coesão (paralelos e perpendiculares à folheação/bandamento). Foram consideradas apenas rupturas circulares e plano-circulares, com o objetivo de coletar informações para subsidiar a comparação entre as seções avaliadas com o índice GSI. A Figura 4 exemplifica a análise realizada para a Seção 6.

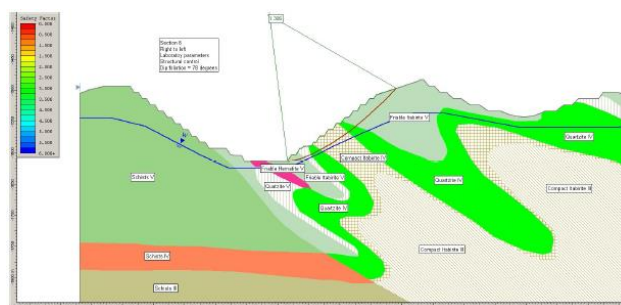


Figura 4: Seção 6, análise probabilística considerando os parâmetros de resultados dos ensaios de laboratório – FS = 1,3

2.7 Análises de Sensibilidade

Usando a ferramenta de análise de sensibilidade também disponível no software Slide, foi possível determinar a influência de cada um dos parâmetros geotécnicos no Fator de segurança. A Figura 7 apresenta o exemplo do Itabirito Friável, Classe V, onde o ângulo de atrito é o parâmetro que possui a maior influência no FS, nos mostrando a grande importância na determinação correta deste parâmetro.

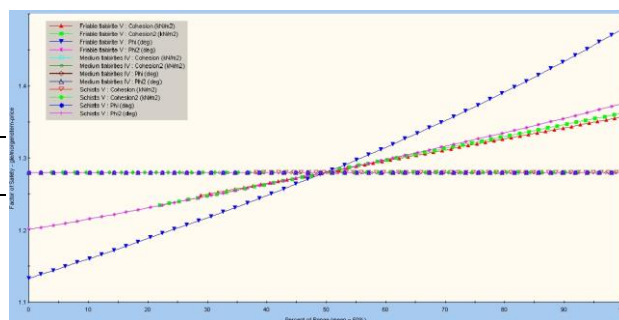


Figura 7: Seção 6, Influência de cada parâmetro geotécnico no FS

3 CONCLUSÕES

Os FS das análises utilizando o GSI calculado a partir do RMR (mod. Vale S.A.) e os FS das análises utilizando os parâmetros laboratoriais foram muito próximos na maioria das seções avaliadas, concluindo-se que seu uso poderia ser interessante para a aplicação nas cavas da Vale S.A., quando se visa à determinação de parâmetros geotécnicos para a realização de análises de estabilidade. No entanto, o GSI não considera a orientação do mergulho das estruturas geológicas. Desta forma nos casos em que as descontinuidades são relevantes o GSI deve ser utilizado com cautela. Para a aplicação de forma confiável do GSI para esses casos, torna-se necessária a realização de uma avaliação cinemática prévia baseada em um mapeamento geológico-estrutural completo.

A metodologia proposta para transformar os dados de classificações das rochas do Quadrilátero Ferrífero-MG realizadas em RMR (mod. Vale S.A.) para o sistema GSI, foram consideradas satisfatórias, visto que os fatores de segurança encontrados nas análises foram próximos.

Apesar dos FS serem muito próximos, na maior parte das seções os parâmetros de Mohr-Coulomb obtidos foi diferente, principalmente nos valores de coesão.

Para as seções que a análise cinemática prévia indicou um alto FS, o GSI pôde ser utilizado com sucesso. Já para as seções que possuem os FS mais baixos condicionados pelas estruturas do maciço (rupturas planares, cunhas ou tombamento), não foi possível a utilização do GSI.

REFERÊNCIAS

- Hoek E., Karzulovic A.. (2000) Rock mass properties for surface mines. Published in Slope Stability in Surface Mining, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), pages 59-70.
- Magalhães, F.S. et al., (2011). Mapeamento Litoestrutural e Geomecânico da Mina do Segredo. BVP Engenharia.
- Osgoui, R. et al. (2010). An assistant tool for the Geological Strength Index to better characterize poor

and very poor rock masses - Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., vol. 47, pp 690-697.

Penido, H.A., (2006). Modelagem computacional de túneis: o caso dos túneis da mina de Fábrica Nova. Dissertação de Mestrado - UFOP.

Penido, H.A., (2012). Slope Stability Analysis Focusing on Rock Mass Classification Systems and Probabilistics Approach in Fabrica Iron Ore Mine (VALE S.A., Brasil). École des Mines de Paris, França, 148p.