

17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

ESTUDO DE CASO: ANÁLISES PROBABILÍSTICAS EM TALUDES DE CAVA EM DEPÓSITOS DE FERRO

Thaís Souza ¹; Lucas Figueiredo ²; Yan Santos ³; Felipe Vilela ⁴.

Resumo – As análises de estabilidade de taludes de cava por metodologias determinísticas são amplamente utilizadas nas práticas de engenharia convencional, a partir da obtenção de valores de fator de segurança (FS) como indicador de desempenho para avaliar a estabilidade. As análises probabilísticas têm como objetivo calcular e quantificar a probabilidade de falha (PF) da estrutura, de forma a auxiliar na gestão de risco. O estudo em questão teve como objetivo além de avaliar a estabilidade dos taludes, também quantificar a probabilidade de falha, a partir de estudo probabilístico introdutório para a cava Serra do Sapo, de propriedade da empresa Anglo American.

Abstract – The stability analysis of open pit slopes by deterministic methodologies are widely used in conventional engineering practices, based on obtaining values of factor of safety (FS) as a performance indicator to assess stability. Probabilistic analyzes aim to calculate and quantify the probability of failure (PF) of the structure, in order to assist in risk management. The study in question aimed, in addition to evaluating the stability of the slopes, also to quantify the probability of failure, based on an introductory probabilistic study for the Serra do Sapo pit, owned by the Anglo American company.

Palavras-Chave – Análise de estabilidade de cava, Análises Probabilísticas.

¹ Geól., Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte - MG, thaisalcsouza13@gmail.com
EMPRESA: WALM Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) 3234-4003, thaisa.souza@walmengenharia.com.br

² Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG, torrent.figueiredo@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 98402-2195, lucas.t.figueiredo@angloamerican.com

³ Geól., Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte - MG, yanlucas2002@gmail.com
EMPRESA: WALM Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) 3234-4003, yan.santos@walmengenharia.com.br

⁴ Geól., Universidade Federal do Espírito Santo: Alegre – ES, felipevilelageo@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 99871-0434, felipe.vilela@angloamerican.com

1. INTRODUÇÃO

Na avaliação de estabilidade de um talude de mineração devem ser definidos os parâmetros geotécnicos dos materiais envolvidos na análise. Essa definição não leva em consideração as incertezas dadas pela variabilidade natural e espacial do material, dados de amostragem limitados e erros embutidos nos ensaios geotécnicos, por exemplo.

Na abordagem probabilística, algumas das variáveis independentes envolvidas nas análises de estabilidade são assumidas como variáveis aleatórias, ou seja, seus comportamentos possuem variabilidades que podem ser expressas por distribuições probabilísticas e, dessa forma, é possível calcular e quantificar a probabilidade de falha de certa estrutura.

Este trabalho vem, por meio de um estudo de caso, ressaltar a relevância da aplicação prática de análises probabilísticas complementares às determinísticas, em análises de estabilidade.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Caracterização geológica

A cava avaliada neste estudo está localizada na Serra do Sapo que possui *trend* NNW-SSE e, assim como observado em escala regional, verifica-se uma inversão estratigráfica em virtude da estruturação tectônica caracterizada por um sistema de falhas de empurrão, as atitudes das foliações apresentam um subparalelismo em relação à direção das falhas, apresentando um mergulho baixo a moderado (cerca de 30°) de direção N-S e vergência para W.

A Figura 1 abaixo apresenta uma seção típica em que é possível observar a inversão estratigráfica e os principais domínios litológicos.

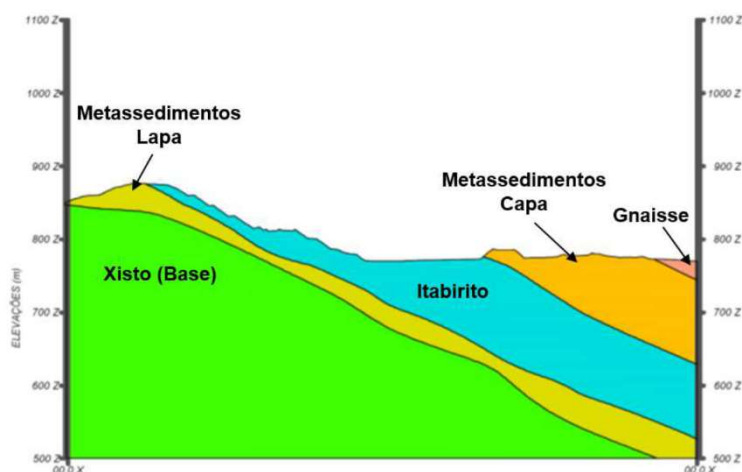


Figura 1. Seção típica da Serra do Sapo em que é possível observar a inversão estratigráfica e os principais domínios litológicos.

2.2. Mecanismos de Ruptura

Na cava da Serra do Sapo verifica-se que o mecanismo de ruptura é condicionado pela anisotropia de resistência condicionada pela foliação, por falhas paralelas à foliação e aos contatos geológicos. Nesses casos as rupturas possíveis de ocorrer são denominadas do tipo plano-circular, onde são mobilizadas resistências da matriz e da estrutura condicionante paralela à direção do talude ou da encosta. Em alguns softwares de análise de estabilidade esse tipo de ruptura é denominado como “não-circular”.

No contato de lapa entre o minério (itabirito) e o estéril (quartzitos) verifica-se uma zona de cisalhamento com presença de lentes de filitos intercaladas com o quartzito na transição desse

contato. Este material foi denominado como “filonito” e pode ocorrer tanto nessas zonas de contato, como também como lentes internas no itabirito.

A Figura 2 apresenta esquematicamente os mecanismos de ruptura que condicionam a estabilidade cava Serra do Sapo.

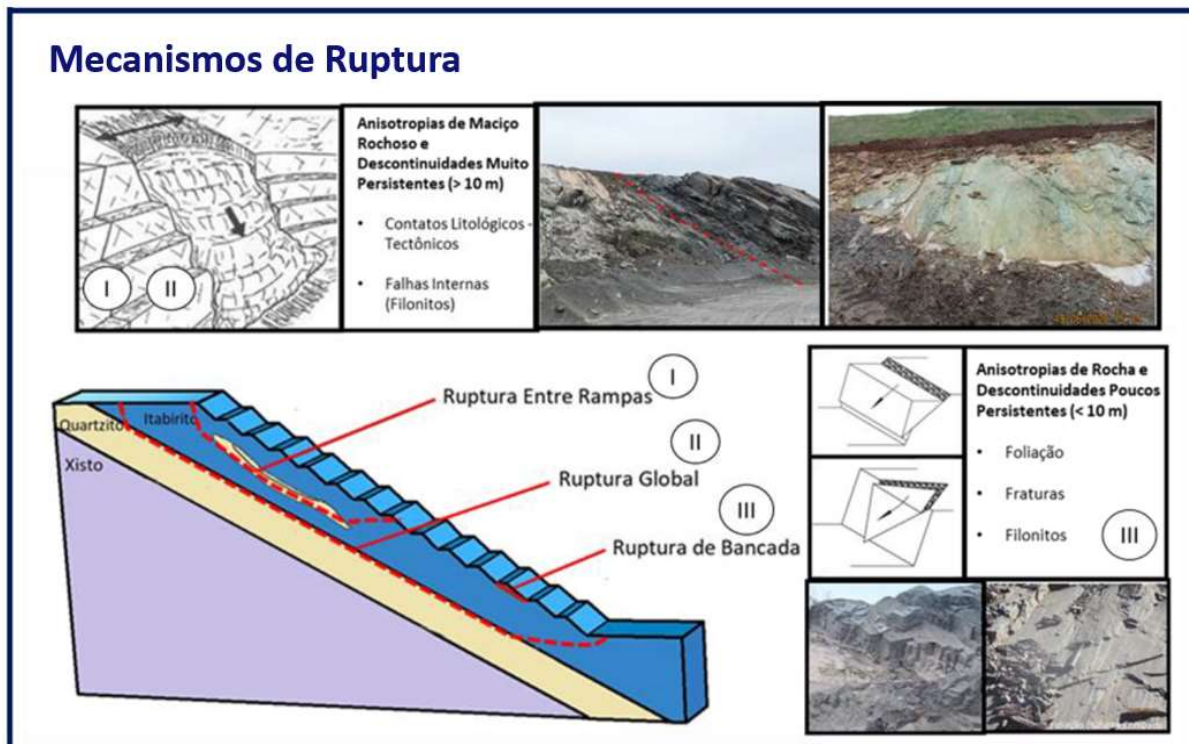


Figura 2. Principais condicionantes para as rupturas nos taludes da cava Serra do Sapo.

3. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

3.1. Parâmetros Médios

Os parâmetros de resistência foram definidos a partir de diversas campanhas de ensaios concluídas na Serra do Sapo e realizadas pelos laboratórios IPT, FURNAS, UFV e UFMG.

- Campanhas de Ensaios Litotipos Compactos

Em 2011 foram realizados ensaios pelo laboratório do IPT, em 2020/2021 foram realizados ensaios pelo laboratório da UFMG e em 2021 foram realizados ensaios de *Tilt Test* pela empresa WALM em conjunto com a Anglo American.

- Campanhas de Ensaios Litotipos Friáveis

Em 2014 foram realizados ensaios pelo laboratório da UFV, em 2016 foram realizados ensaios pelo laboratório de FURNAS, em 2016 foram realizados ensaios pelo laboratório da UFV e em 2020/2021 foram realizados ensaios pelo laboratório da UFV.

Para os litotipos friáveis foi considerado o critério de resistência de Mohr-Coulomb. Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros adotados para os litotipos friáveis para a Cava de Serra do Sapo.

Tabela 1. Parâmetros de resistência para os litotipos friáveis - Cava Serra do Sapo.

Litotipo	ID	Parâmetros						Quantidade de Ensaios					
		Caracterização		Resistência Ortogonal		Resistência Paralela		Triaxial CIUsat		Triaxial CIDsat		Cisalhamento Direto	
		γ_{seco} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c' (KPa)	Φ' (°)	c' (KPa)	Φ' (°)	Par.	Oblíq.	Par.	Oblíq.	Par.	Oblíq.
Itabirito Friável	IF	22	24	50	36	25	29	0	0	0	0	7	7
Quartzito Sericítico Friável	QTSF	18	20	56	34	14	23	6	3	1	1	2	2
Filito Friável	FIF	19	21	25	28	24	23	2	2	0	0	4	4
Xisto Friável ("Iapa")*	XIF_L	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0
Intrusiva Friável	INF	18	20	55	32	-	-	2	1	0	0	0	0

* O litotipo XIF_L ainda não possui ensaios, uma vez que ainda não aflora na cava atual. Adotou-se os mesmos parâmetros do filito friável.

Para a resistência ortogonal dos maciços rochosos optou-se pela envoltória não linear de ruptura de Hoek & Brown (2002) e adotou-se os parâmetros básicos: UCS, GSI, mi e D. Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros compilados para os litotipos compactos e semi compactos.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos para os litotipos compactos e semi-compactos.

PARÂMETROS – RESISTÊNCIA OBLÍQUA							Quantidade de Ensaios	
Materiais		Peso Específico (KN/m ³)	UCS (MPa) (1)	GSI (2)	mi (1)	D (3)	Ensaios Oblíquos à Foliação	
Descrição	Cód.						Uniaxial	Triaxial
Itabirito Compacto	IC	32	289	75	20	0	21	10
Quartzito Compacto	QTC	27	221	70	22	0	21	29
Xisto Compacto	XIC	27	138	60	14	0	14	14
Itabirito Semi Compacto	ISC	30	40	50	20	0	0	0
Quartzito Semi Compacto	QTSC	25	30	50	22	0	0	0
Xisto Semi Compacto	XISC	25	29	45	14	0	0	0

- (1) Os parâmetros de UCS e μ foram obtidos a partir da avaliação de todos os ensaios disponíveis em conjunto (UCS/triaxial/tração). Inicialmente obteve-se a média do parâmetro UCS de acordo com a resistência mobilizada (oblíqua ou paralela), e da mesma forma a média dos ensaios de tração, quando este foi realizado para o material avaliado. Posteriormente na avaliação dos ensaios triaxiais, adotou-se a média da tração como negativa, a média do UCS como confinante igual a 0 e lançou os demais ensaios triaxiais. A partir dessa avaliação obteve-se o valor de UCS e de μ .

Os materiais semi compactos não possuem ensaios e dessa forma os valores de UCS foram estimados a partir de valores de médias ponderadas dos parâmetros grau de alteração e resistência, adquiridos durante as descrições geotécnicas de sondagens. O parâmetro μ dos semi compactos foi o mesmo do respectivo litotipo compacto, uma vez que se refere a rocha intacta.

- (2) GSI calculado a partir dos dados de furos de sondagens e dos dados de mapeamento, foi utilizado o critério de Hoek et al (2013), pela relação: $GSI = 1,5 \times JCond89 + RQD / 2$.
- (3) Foi adotado o D (Disturbance Factor) com o valor de 0, uma vez que o GSI já realiza a atribuição de depreciação dos parâmetros da rocha intacta e irá representar muito bem o maciço rochoso, sem a necessidade da depreciação deste pelo D.

Para a resistência paralela dos litotipos rochosos como Itabirito, Quartzito e Xisto compactos e semi compactos que possuem uma anisotropia dada pela foliação e ou bandamento foi utilizado o critério de Barton e Bandis (1982). Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros de resistência paralela à foliação.

Tabela 3. Parâmetros de Resistência Paralela à Foliação – Barton & Bandis.

PARÂMETROS – RESISTÊNCIA PARALELA							Quantidade de Ensaios		
Materiais		Peso Específico (KN/m ³)	JCS (50 mm) (MPa) (1)	JCS (1m) (MPa) (1)	JRC (1m) (2)	ϕ (°) (3)	Ensaios Paralelos à Foliação		
Descrição	Cód.						Uniaxial	Triaxial	Tilt Test
Itabirito Compacto	IC	32	113	94	2	28	7	0	2
Quartzito Compacto	QTC	27	64	53	2	27	16	0	3
Xisto Compacto	XIC	27	57	50	1.5	27	11	6	2
Itabirito Semi Compacto	ISC	32	-	12	2	28	0	0	0
Quartzito Semi Compacto	QTSC	27	-	10	2	27	0	0	0
Xisto Semi Compacto	XISC	27	-	10	1.5	27	0	0	0

- (1) Os parâmetros de JCS (Joint Compressive Strength) foram a partir dos valores médios dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial (UCS), na condição paralela à foliação. Vale ressaltar que este parâmetro foi corrigido em função dos efeitos de escala propostos por Barton & Bandis (1982), conforme equação: $JCS_n \approx JCS_o (\ln/L_o)^{-0.03 JRC_o}$. O índice 0 é utilizado para representar amostras em escala de laboratório e o índice n é o que representa a escala corrigida para as dimensões do problema. No presente estudo o valor de L_o foi igual a 50 mm e o valor de L_n igual a 1 metro (sendo a escala das dimensões do problema).
- (2) Os valores de JRC (Joint Roughness Coefficient) foram definidos com base na caracterização da rugosidade da foliação/bandamento obtidos pelos dados estatísticos de descrição de furos, visita de campo e alinhamento com equipe de geotecnia de mina.
- Itabirito Compacto e Semi-Compacto: Plano Lisa/Rugosa (JRC = 2,0)
 - Quartzito Compacto e Semi-Compacto: Plano Lisa/Rugosa (JRC = 2,0)
 - Xisto Compacto e Semi-Compacto: Plano Lisa (JRC = 1,5)

- (3) Os valores de ângulo de atrito residual (ϕ_{ir}) foram definidos a partir dos resultados dos ensaios *Tilt Test*, em que foram obtidos os valores médios do ângulo de atrito básico (ϕ_{ib}). De acordo com Barton & Bandis (1982) os valores de ϕ_{ib} podem ser considerados iguais aos de ϕ_{ir} no caso de descontinuidades sãs.

3.2. Parâmetros Probabilísticos

Verificou-se que a partir das campanhas de ensaios que foi possível obter uma distribuição estatística para alguns litotipos friáveis. Contudo para os demais litotipos, que possuem uma quantidade de ensaios relativamente baixa, sendo, em geral, um máximo de 3 resultados válidos para as resistências nas direções oblíquas ou paralelas, não foi possível assim estabelecer um diagrama de frequência para estes materiais.

Dessa forma, como nestes casos não há dados amostrais suficientes para uma estimativa confiável do desvio padrão, utilizou-se de coeficientes de variação (CV) tabelados, que têm sido reportados na literatura, assim como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de coeficientes de variação CV para algumas propriedades geotécnicas. Modificado de Assis (2020).

Propriedade	Faixas de CV (%) e Valor mais provável (em negrito)	Referências
Peso Específico γ	3-7 < 10 5	Harr (1984); Kulhawy (1992); Uzielli et al. (2007)
Coesão c	20-80 40	Baecher & Christian (2003)
Ângulo de Atrito ϕ	2-13 5-15 10	Harr (1984); Kulhawy (1992); Baecher & Christian (2003); Uzielli et al. (2007)

Para a obtenção dos parâmetros probabilísticos considerou-se como variáveis aleatórias os parâmetros de resistência do material, coesão e ângulo de atrito, bem como seu peso específico e ângulo de mergulho, cujos parâmetros médios, suas variabilidades, truncamentos e tipo de distribuição adotado são mostrados na Tabela 5. Os coeficientes de variação destacados em azul são tabelados, ou seja, de 10% para o ângulo de atrito e 40% para a coesão. Para o ângulo de mergulho, foi adotada uma faixa de valores decorrente do mapeamento geológico de campo, entre de ± 3 com valor da média de 30 graus, assim como já adotado nas análises determinísticas.

Tabela 5. Valores estatísticos das variáveis aleatórias dos dados de entrada para os litotipos friáveis da cava Serra do Sapo.

Lito	Resistência Mobilizada	Variável	Valor Médio	CV (%)	Desvio Padrão	Truncamento Estatístico (3x desvio padrão)	Truncamento de Engenharia	Distribuição de Probabilidade	Relativos Mínimos e Máximos	
IF	Resistência Ortogonal	c' (kPa)	50	80	40.0	-70	0	Normal	50	
		Φ' (°)	36	12	4.3	170	120		70	
	Resistência Paralela	c' (kPa)		25	69	17.3	23.04	23	Normal	13
							48.96	40		4
		Φ' (°)		29	5	1.5	-26.75	0	Normal	25
							76.75	77		52
					24.65	25	Normal	4		

Lito	Resistência Mobilizada	Variável	Valor Médio	CV (%)	Desvio Padrão	Truncamento Estatístico (3x desvio padrão)	Truncamento de Engenharia	Distribuição de Probabilidade	Relativos Mínimos e Máximos	
						33.35	33		4	
QTSF	Resistência Ortogonal	c'(kPa)	56	40	22.4	-11.2	0	Normal	56	
		Φ' (°)	34	10	3.4	123.2	120		64	
	Resistência Paralela	c'(kPa)		14	40	5.6	23.8	24	Normal	10
							44.2	40		6
		Φ' (°)		23	10	2.3	-2.8	0	Normal	0
							30.8	31		31
FIF	Resistência Ortogonal	c'(kPa)	25	40	10.0	-5	0	Normal	25	
		Φ' (°)	28	10	2.8	55	55		30	
	Resistência Paralela	c'(kPa)		24	40	9.6	19.6	20	Normal	8
							36.4	36		8
		Φ' (°)		23	10	2.3	-4.8	0	Normal	24
							52.8	53		29
INF	Resistência	c'(kPa)		55	40	22.0	-11	0	Normal	55
							121	100		45
		Φ' (°)		32	10	3.2	22.4	22	Normal	10
							41.6	42		10

Vale ressaltar que foi aplicado o truncamento de engenharia de forma a definir os parâmetros na faixa de valores possíveis para os materiais avaliados, ou seja, não permitir valores de coesão negativos e ângulos de atrito abaixo do limite físico do material, por exemplo.

Para a avaliação probabilística da resistência oblíqua à foliação dos litotipos compactos e semi compactos foi necessário definir inicialmente as variáveis aleatórias do critério de ruptura de Hoek & Brown (2002) e, dessa forma, definiu-se os parâmetros de UCS, “mb” e “s”. O parâmetro “a” não foi considerado como uma variável aleatória devido ao seu baixo peso na formulação de Hoek & Brown (2002).

Para o parâmetro UCS adotou-se o valor tabelado de coeficiente de variação de 30%, assim como recomendado na literatura. Para o parâmetro GSI adotou-se a distribuição triangular e variou-se os valores médios em ± 10 . Para o parâmetro de “mi” avaliou-se a quantidade de ensaios triaxiais validados de forma a analisar se seria possível realizar uma distribuição estatística dos dados, e apesar de alguns litotipos possuírem ensaios, a quantidade não era suficiente, logo, utilizou-se o coeficiente de variação (CV) de 10% para o parâmetro de “mi”, assim como recomendado na literatura.

Para os parâmetros de “mb” e “s” realizou-se simulações por Monte Carlo (MC), em que a partir das fórmulas do “mb” e do “s”, foi executado o MC que sorteou o “mi” e o GSI, no caso do parâmetro “mb”, e apenas o GSI, no caso do “s”, de acordo com suas distribuições. Ao final, foi obtido o histograma de “mb” e “s”, suas médias, respectivos desvios padrões e até mesmo a distribuição desses parâmetros que melhor ajusta o histograma gerado pelo MC.

Para a avaliação probabilística da resistência paralela à foliação dos litotipos compactos e semi compactos foi necessário definir inicialmente as variáveis aleatórias do critério de ruptura de Barton e Bandis (1982) e, dessa forma, definiu-se os parâmetros de JCS, JRC e Φ_r .

Para o parâmetro JCS adotou-se o valor tabelado de coeficiente de variação de 30%, assim como recomendado na literatura. Para a definição dos valores estatísticos do parâmetro de JRC (Joint Roughness Coefficient) utilizou-se a distribuição triangular, uma vez que foram definidos os valores mínimos e máximos de acordo com as faixas das categorias de classificações de rugosidade de cada material.

Para os valores de ângulo de atrito residual utilizou-se o coeficiente de variação (CV) de 10% para o parâmetro de ângulo de atrito básico, assim como apresentado na Tabela 4.

4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade determinísticas tiveram como objetivo verificar a estabilidade da seção avaliada para atender os fatores de segurança mínimos estabelecidos, considerando os tipos de rupturas possíveis de ocorrência, condições geométricas e hidrogeológicas.

As análises probabilísticas possuem os mesmos objetivos, porém os dados de entrada são distintos, uma vez que alguns parâmetros são considerados como variáveis aleatórias, assim como apresentado no Item 3 deste trabalho. Como resultado tem-se, além de uma estimativa do valor médio do indicador de desempenho em questão, a obtenção da probabilidade de falha da estrutura de engenharia.

4.1. Premissas das Análises de Estabilidade

As análises de estabilidade dos taludes foram realizadas com auxílio do software Slide2 de propriedade da empresa Rocscience®, e os critérios adotados estão apresentados a seguir:

- Para os materiais anisotrópicos utilizou-se os critérios de resistência “Anisotropic Linear” e “Generalized Anisotropic” para os litotipos friáveis e compactos/semi-compactos respectivamente;
- Com base nos dados estruturais dos litotipos, foi adotada na resistência paralela uma faixa de mergulho que varia de $30^\circ \pm 3^\circ$;
- Foram utilizados os métodos de busca Simulated Annealing e Cuckoo Search;
- Foi considerada possibilidade de rupturas plano-circular para o talude avaliado, sendo realizadas análises de equilíbrio limite pelo método das fatias GLE/Morgenstern-Price com a função Optimize Surfaces do tipo Surface Altering;
- Foi executado o método de Overall Slope, ou seja, em comparação com o método do Global Minimum, este método não assume que a probabilidade de falha para o talude é igual à probabilidade de falha da superfície de escorregamento do mínimo global determinístico;
- Foi utilizado o método de amostragem Response Surface, disponível no software Slide 2, que usa um pequeno número de cálculos selecionados estrategicamente para criar uma superfície de resposta dos valores do fator de segurança (FS) para várias combinações de parâmetros de entrada. Em seguida, prevê os valores do fator de segurança para qualquer combinação de amostras e fornece uma probabilidade estimada de falha. Uma vez que uma análise probabilística de Overall Slope pode levar muitas horas em 2D, este método é vantajoso para reduzir significativamente o tempo de computação;
- Foi utilizado número de amostras igual a 3000. Dessa forma, a análise foi executada 3000 vezes e um fator de segurança foi calculado para cada amostra. Isso resulta em uma distribuição de fatores de segurança, a partir dos quais a probabilidade de falha é calculada;
- Os critérios de aceitabilidade das análises probabilísticas seguiram a Tabela 6, conforme as boas práticas brasileiras e internacionais referentes à projetos de taludes de cavas de mineração.

Tabela 6. Critérios de Aceitabilidade (Guidelines for Open Pit Slope Design, Read & Stacey, 2009).

Critérios de Admissibilidade			
Escala do Talude	Consequências da Falha	FS min (estático)	PF (max)
Bancada	Baixa - Alta	1.1	25-50%
	Baixa	1.15-1.2	25%
	Média	1.2	20%
Entre Rampa	Alta	1.2-1.3	10%
	Baixa	1.2-1.3	15-20%
Global	Média	1.3	5-10%
	Alta	1.3-1.5	≤5%

4.2. Resultados das Análises de Estabilidade

Para o estudo de caso, foi analisado um talude hipotético para a verificação da possibilidade de otimização de ângulos em uma região específica da cava. O resultado da análise de estabilidade, conforme apresentado na Figura 3, apresentou Fator de Segurança (FS) determinístico de 1.19, ou seja, abaixo dos níveis de aceitabilidade ($FS > 1.30$, conforme Tabela 6), e Probabilidade de Falha (PF) de 4,30% que está próximo aos limites de aceitabilidade ($PF < 5\%$, conforme Tabela 6).

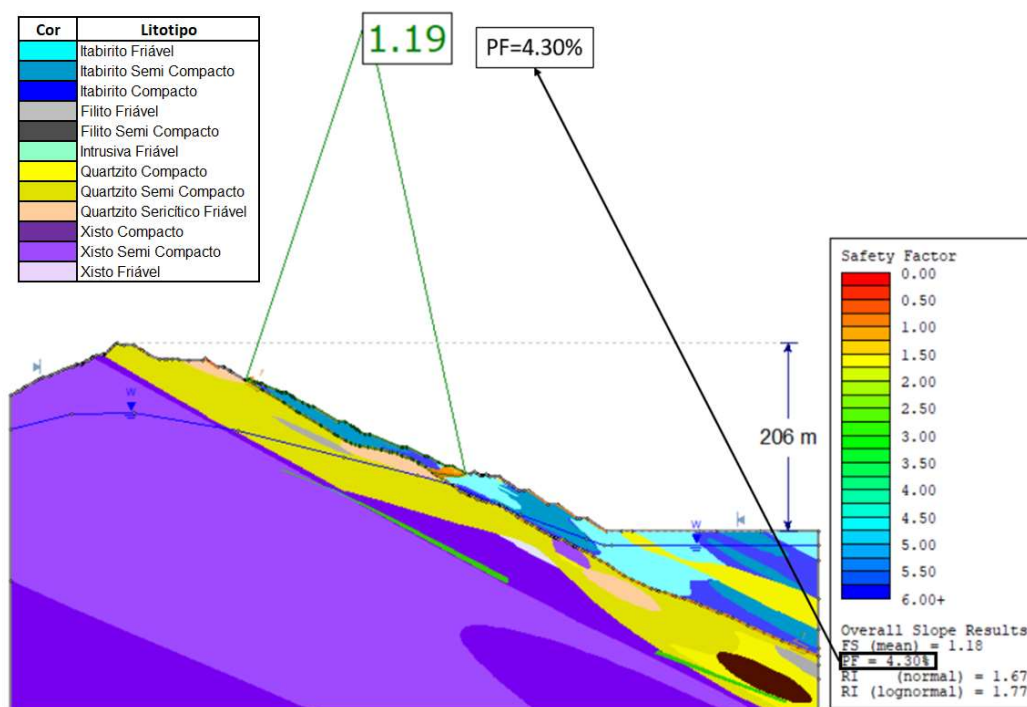


Figura 3. Análise Probabilística da seção avaliada com resultado de Fator de Segurança (FS) determinístico de 1.19 e Probabilidade de Falha (PF) de 4,30%.

Portanto, verificou-se a necessidade adequação do projeto para que ele fique dentro do critério do critério de aceitabilidade adotado para o talude em questão. Embora a PF tenha ficado dentro dos critérios mínimos aceitáveis ($< 5\%$), o FS ficou abaixo do mínimo aceitável ($< 1,3$) sendo necessário adequação, uma vez que o critério de aceitação é conjugado, ou seja, deve atender o mínimo PF e FS aceitáveis. Essa adequação da geometria pode ser realizada com remoção de todo o Itabirito na escavação, ou/e pela redução do ângulo do talude. O histograma de Probabilidade de Falha (Figura 4) apresenta a distribuição dos Fatores de Segurança na análise probabilística, sendo os dados destacados de laranja os valores de FS abaixo de 1.00.

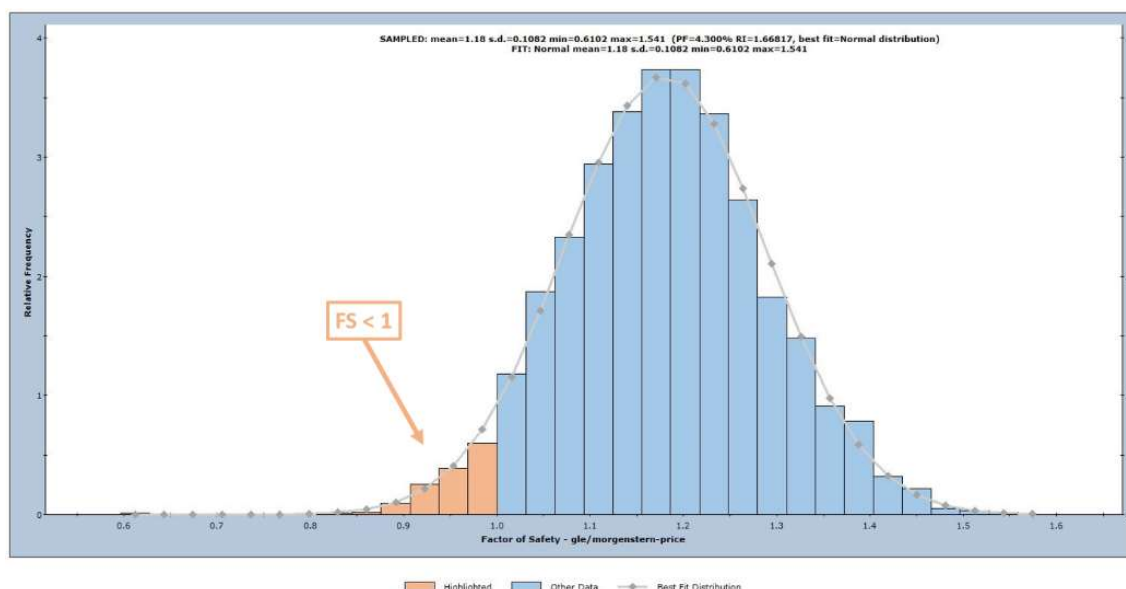


Figura 4. Probabilidade de Falha (PF) para a seção avaliada em função do indicador de desempenho Fator de Segurança (FS).

5. CONCLUSÕES

A partir do resultado da análise de estabilidade entendeu-se que o mecanismo demonstrado na análise ocorre possivelmente devido à exposição de uma faixa delgada (pouco espessa) de minério na escavação realizada, fazendo com que a zona de contato se aproxime da superfície da escavação ativando o mecanismo plano circular.

Desta forma, este estudo trouxe como recomendação a adequação da geometria, com remoção de todo o Itabirito na escavação, deixando a face toda no material de lapa, o quartzito. Além disso, é recomendado um maior aprofundamento do conhecimento geológico-geomecânico desta região, principalmente com relação ao modelo lito-estrutural utilizado e a implementação de devidas medidas de controle mitigatórios ao longo da escavação. Estes controles tem o intuito de aumentar o nível de segurança de pessoas e equipamentos devido a maior nível complexidade geológica e consequente maior grau de incerteza sobre o comportamento do maciço rochoso no local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Anglo American pelo fornecimento dos dados para realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. P., 2020. Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice. *Soil and Rocks*, v. 43, n. 3, p. 311-336.
- BARTON, N & BANDIS, S., 1982. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. In: *Keynote lecture. Proceedings of the 23rd US symposium on rock mechanics*; 1982. p. 739–60.
- HOEK E., CARRANZA-TORRES C. and CORKUM B., 2002. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. *Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto*, 1, p. 267-273.
- READ & STACEY., 2009. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Ed. John Read & Peter Stacey. CRC Press/ Balkema.