

Gestão de Riscos Geotécnicos dos Taludes do Mineroduto Minas-Rio: Análises de Estabilidade Probabilísticas de Taludes

Anderson Fonini

Gerente de Engenharia, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, fonini@fgs.eng.br

Ben Hur Serra Isoppo

Engenheiro Geotécnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, benhur@fgs.eng.br

Felipe Gobbi

Diretor Técnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Rodrigo Brum Teodorico

Engenheiro Geotécnico, Anglo American, Viçosa, Brasil, rodrigo.teodorico@angloamerican.com

Jairo Henrique Da Silva

Coordenador de Geotecnia, Anglo American, Viçosa, Brasil, jairo.silva@angloamerican.com

RESUMO: O Mineroduto Minas-Rio, com 528 km de extensão e atravessando 33 municípios no Brasil, apresenta grande variabilidade geológico-geotécnica, climática e social, resultando em diferentes níveis de riscos geotécnicos ao longo de seu traçado. Para identificar trechos suscetíveis a deslizamentos, múltiplas fontes de dados foram analisadas e correlacionadas em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). As regiões identificadas como de maior suscetibilidade a deslizamentos foram inspecionadas *in loco* e submetidas a acompanhamentos contínuos, permitindo constatar características que pudessem deflagrar eventos geotécnicos indesejados. A estabilidade dos taludes das áreas mais suscetíveis a movimentos gravitacionais foi analisada por meio de abordagens probabilísticas, considerando não apenas a variabilidade dos parâmetros geotécnicos adotados, mas também a influência do nível d'água e sua variação, estimada a partir da correlação com eventos históricos. Destaca-se que as análises estocásticas reduzem as incertezas inerentes à previsão de eventos naturais, proporcionando uma ferramenta fundamental para a gestão de riscos em áreas suscetíveis a deslizamentos de terra. Além disso, essa abordagem possibilita uma tomada de decisão mais fundamentada e subsidia a tomada de decisão com base na aceitabilidade dos cenários identificados. A metodologia proposta permitiu a identificação de 14 pontos que estão em desconformidade com a NBR 11.682 e possuem classificação de risco alta ou muito alta pela ISO 20074, sendo estes os principais pontos indicados como prioritários na implementação de intervenções que visam elevar os fatores de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de encostas, Análise probabilística, Risco geotécnico.

ABSTRACT: The Minas-Rio Pipeline, stretching 528 km and crossing 33 municipalities in Brazil, exhibits significant geological-geotechnical, climatic, and social variability, resulting in different levels of geotechnical risk along its route. To identify sections susceptible to landslides, multiple data sources were analyzed and correlated within a Geographic Information System (GIS) environment. Regions identified as having higher susceptibility to landslides were inspected in the field and subjected to continuous monitoring, allowing the identification of characteristics that could trigger undesirable geotechnical events. The stability of slopes in areas most susceptible to gravitational movements was assessed using probabilistic approaches, considering not only the variability of the geotechnical parameters adopted but also the influence of groundwater level and its fluctuations, estimated based on correlations with historical events. It is noteworthy that stochastic analyses reduce the uncertainties inherent in predicting natural events, providing a key tool for risk management in landslide-prone areas. Furthermore, this approach enables more informed decision-making and supports the adoption of measures based on the acceptability of the identified scenarios. The proposed methodology enabled the identification of 14 points that are not in compliance with NBR 11.682 and are classified as high or very high risk according to ISO 20074. These are the main points indicated as priorities for the implementation of interventions aimed at increasing safety factors.

KEYWORDS: Slope stability, Probabilistic analysis, Geotechnical risk.

1 INTRODUÇÃO

O Mineroduto Minas-Rio desempenha um papel crucial no transporte do minério de ferro proveniente na Mina da Serra do Sapo, situada em Conceição do Mato Dentro – MG, até o Porto do Açu, localizado em São João da Barra-RJ. Possui extensão de 528 km, o mineroduto atravessa diversos cenários geológico-geotécnicos, morfológicos, climatológicos, de cobertura vegetal, nas quais são observadas condições que, por vezes, apresentam riscos geotécnicos significativos.

Para identificação de riscos geotécnicos utilizou-se de metodologias de geoprocessamento calibradas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), promovendo o cruzamento de diferentes informações e inspeções de campo que buscaram identificar condições atípicas em relação ao comportamento geotécnico. Esta seleção identificou 73 pontos de atenção.

Estas áreas foram então inspecionadas *in loco* e submetidas a acompanhamentos contínuos, permitindo constatar características que pudessem deflagrar eventos geotécnicos indesejados. Para os pontos onde verificou-se um número maior de características que poderiam remeter a fatores de segurança considerados baixos para o contexto geotécnico local, foram realizadas análises de estabilidade, visando determinar a probabilidade de ruptura para os pontos quando admitido um nível médio para a posição do nível freático. A metodologia utilizada e os resultados obtidos serão apresentados na sequência do artigo.

2 LOCALIZAÇÃO

O Mineroduto Minas-Rio inicia no município de Conceição do Mato Dentro - MG, passando por mais de 30 municípios distintos e têm seu término no Porto do Açu, no município de São João da Barra - RJ, como mostra a Figura 1.

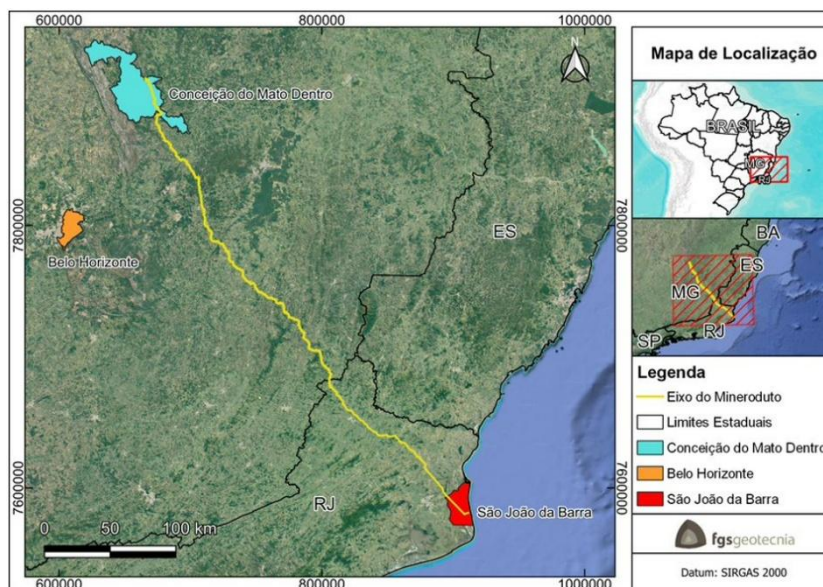


Figura 1. Localização do Mineroduto Minas-Rio.

3 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Para determinação dos parâmetros de resistência de cada material envolvido nas análises de estabilidade, utilizou-se a seguinte metodologia:

- Divisão do mineroduto em seis domínios geológicos;
- Para cada domínio geológico, compilação dos parâmetros de resistência disponibilizados em projetos pregressos para cada material geotécnico ocorrente;
- Determinação dos parâmetros médios para cada geomaterial dentro do domínio geológico;
- Identificação dos pontos, com base na inspeção de campo, onde ocorreram rupturas de taludes que possibilitavam a realização de retroanálises;
- Identificação da data de ocorrência de possíveis rupturas a serem retroanalisadas;



- 2 0 2 5
- vi) Realização de análises paramétricas nos taludes considerados passíveis de serem retroanalizados, admitindo diferentes níveis de lençol freático no talude para identificação do fator de segurança correspondente a iminência de ruptura, 1,0;
 - vii) Tomando como referência a estimativa do tempo de retorno da chuva que deflagrou a ruptura, juntamente com as características dos geomateriais, geometria do talude e condição do entorno, determinou-se a posição do lençol freático que remetia a um fator de segurança entorno de 1,0 (análise paramétrica). Se considerado coerente, os parâmetros de resistência admitidos para a retroanálise eram fixados para este cenário, caso contrário, a magnitude dos parâmetros sofria alteração para haver concordância;
 - viii) Após obter-se concordância entre os parâmetros de resistência, a posição do nível freático correspondente a intensidade de chuva identificada como possível deflagradora da instabilidade, aplicou-se a mesma metodologia para outro ponto passível de realização de retroanálise e que envolvesse o mesmo material geotécnico que teve os parâmetros previamente definidos. Para este novo ponto, utilizando as mesmas magnitudes para os parâmetros definidos verificou-se se havia concordância entre a posição do nível freático que implicava no fator de segurança entorno de 1,0 juntamente com a intensidade da chuva responsável pela deflagração da ruptura. Se os resultados indicassem discrepâncias, a coesão era alterada em todos os pontos avaliados até que se obtivesse resultados coerentes em todas as suas ocorrências no mesmo domínio geológico adotando um único valor.

3.1 Nível Freático

Para realização das análises paramétricas onde promoveu-se a variação do nível freático, considerando o desconhecimento de sua posição nos pontos analisados, adotou-se a ferramenta *Water table*, existente no *software Slide2*, com valor de H_u customizado. O nível freático foi posicionado junto a superfície do terreno e então, variou-se o valor de H_u de 0 a 1 a cada 0,25.

O coeficiente H_u , no *software Slide2*, é definido como um fator entre 0 e 1, pelo qual a distância vertical de um ponto no solo (por exemplo, o centro da base da fatia) até o nível de água definido é multiplicado para obter a carga de pressão. O coeficiente H_u é usado para calcular a poropressão de acordo com a equação.

$$u = \gamma_w * h * H_u \quad (1)$$

Onde:

u = Poropressão;

γ_w = Peso específico do fluido

h = Distância vertical da base de uma fatia até a superfície de água;

H_u = O coeficiente H_u customizado.

3.2 Retroanálises

Este passo consistiu na realização de análises paramétricas dos materiais de maior significância nas rupturas observadas. Tais análises visaram verificar qual conjunto de parâmetros de resistência associada a um H_u resultava em fator de segurança unitário.

As análises paramétricas foram realizadas por meio de análises de estabilidade determinísticas com seções bidimensionais e adotaram as seguintes considerações e simplificações:

- Utilização do programa *Slide2* V9.028 para execução das análises de equilíbrio limite;
- Consideradas análises bidimensionais em estado plano de tensões;
- Considerou-se o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price. Este método satisfaz tanto o equilíbrio de momentos como de forças, sendo um método que tende a ser bastante preciso na determinação de fatores de segurança dos taludes (forças e momentos);
- Buscou-se geometrias de rupturas não circulares;
- Utilizou-se o método de busca *Cuckoo Search*. A busca utilizou 16 vértices e um número mínimo de 2000 iterações, considerando uma busca inicial com 200 zonas.

3.3 Parâmetros de Resistência Probabilísticos

Por se tratar de uma análise regional e tendo em vista a natural variabilidade esperada dos parâmetros geotécnicos, optou-se por conduzir análises de estabilidade probabilísticas a partir dos parâmetros médios para cada domínio que foram obtidos através da metodologia já descrita. Neste processo, foram aplicadas faixas de variação para os referidos parâmetros de entrada das análises (coesão, ângulo de atrito e peso específico). Os coeficientes de variação adotados foram embasados em estudos disponíveis na literatura que apresentam valores admissíveis para cada parâmetro de entrada, estes indicados na Tabela 1. Os valores médios foram definidos a partir das retroanálises, quando possível, ou então obtido diretamente da média dos ensaios realizados em cada domínio geológico.

Tabela 1. Coeficientes de variação adotados nas análises.

Material	COV (%)		
	γ_N	c'	ϕ'
Areias	4	15	10
Siltes	5	21	11
Argilas	9	57	31

De maneira geral, a classificação dos materiais nestes grupos foi admitida de acordo com as observações de campo, sendo as características da rocha matriz um fator pertinente para solos residuais/saprólitos, em sua maioria solos arenosos ou siltosos. A partir desta classificação foram definidos os valores de desvios padrão para os parâmetros de resistência dos materiais presentes nas análises, os limites foram fixados em dois desvios padrão.

4 METODOLOGIA PARA AS ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

Tendo em vista que a deflagração de movimentos de massa ocorre principalmente pela variação de poropressão em função da saturação, além da variabilidade dos parâmetros geotécnicos foi inserida a variabilidade da saturação nas análises probabilísticas.

Utilizando os dados disponibilizados pela Anglo American a respeito das datas das rupturas foram feitas análises do tempo de retorno para as chuvas que possivelmente deflagaram as rupturas. Neste processo há um nível de incerteza envolvido decorrente das posições das estações pluviométricas em relação ao local da ruptura. Ainda assim, a partir destes tempos de retorno foram calculadas as probabilidades de ocorrência das chuvas.

$$p = \frac{1}{TR} \quad (2)$$

Onde:

p = Probabilidade de ocorrência;

TR = Tempo de Retorno;

Conhecendo a probabilidade de ocorrência da chuva que deflagrou as rupturas, considerou-se que a condição freática (H_u) definida a partir das retroanálises poderia se repetir, por isso, manteve-se a mesma probabilidade de ocorrência já identificada, ou seja, probabilidade de ocorrência do H_u da retroanálise é igual ao inverso do período de retorno da chuva que gerou a instabilidade. Calculou-se então qual seria o H_u para uma condição média de chuva por meio de distribuição exponencial. Utilizando as equações abaixo:

$$f(x) = \lambda * e^{-\lambda * x} \quad (3)$$

Onde:

λ = taxa de ocorrência;

x = Variável aleatória exponencial com parâmetro λ ;

$f(x)$ = Densidade de probabilidade;

$$E(x) = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

Onde:

λ = taxa de ocorrência;

$E(x)$ = Esperança (média);

O nível d'água mínimo nas seções analisadas foram definidos com base na experiência da projetista, alinhados com as condições hidrogeológicas esperadas, já o nível máximo foi considerada a saturação total do talude.

As análises probabilísticas adotaram as mesmas considerações apresentadas nas retroanálises (item 3.2). Utilizou-se o método de amostragem *Surface Response*. Este método usa um pequeno número de cálculos estrategicamente selecionados para criar uma superfície de resposta com valores de fator de segurança para diversas combinações de parâmetros de entrada, em seguida, ele prevê os valores do fator de segurança para qualquer combinação de amostras e fornece uma probabilidade estimada de falha. Para as análises adotou-se o número de 10.000 amostras, que demonstraram gerar convergência nos fatores de segurança. Este método é vantajoso para reduzir significativamente o tempo de cálculo.

Optou-se pela realização de análises do tipo *overall slope*, onde toda busca por uma superfície mínima global é repetida N vezes (onde N=Número de amostras). Para cada iteração de pesquisa, um novo conjunto de amostras de variáveis aleatórias é utilizado na busca. É então determinada uma superfície de ruptura para cada iteração. Isto resulta na localização de várias superfícies de rupturas globais mínimas, correspondendo a diferentes valores das variáveis aleatórias dos dados de entrada amostrados. A probabilidade de falha, por sua vez, é determinada pelo número de análises que resultaram em fator de segurança inferior a 1, dividido pelo Número total de Amostras. A principal vantagem deste método em relação ao *Global Minimum* é que não é assumido que a probabilidade de falha do talude é igual a probabilidade da superfície com menor FS, obtendo a probabilidade de falha de várias superfícies.

5 RESULTADOS

Dos 78 inicialmente selecionados, 35 deles não apresentaram características que fundamentassem tal avaliação e os 38 pontos restantes foram analisados com a metodologia descrita, onde se obteve os fatores de segurança e suas respectivas probabilidades de falha.

A partir dos fatores de segurança, foram avaliados os pontos utilizando a NBR 11.682 – Estabilidade de Encostas. Esta norma, a partir de cruzamentos de informações qualitativas em termos de vidas humanas, danos ambientais e materiais, permite determinar um valor numérico, o qual consiste no fator de segurança mínimo que deve ser utilizado como referência para um determinado ponto. As classificações qualitativas citadas estão apresentadas na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanências restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Tabela 3. Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos Materiais: Local próximo a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos Ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos Materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos Ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderado.
Baixo	Danos Materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos Ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.



Com base nas classificações das tabelas acima, a norma propõe uma matriz de cruzamento, descrita na Tabela 4 onde são indicados os FS mínimos aceitáveis a serem obtidas nas análises de estabilidade dos taludes/maciços.

Tabela 4. Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,4	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Utilizando as probabilidades de ocorrência, estes pontos críticos receberam classificação de risco conforme a normatização internacional ISO 20074 (2019) que dispõe sobre o gerenciamento de risco acerca de dutos. A norma utiliza a matriz de risco indicada na Tabela 5, essa matriz de risco envolve, além da probabilidade do risco, uma graduação de consequência de falha do duto. Utilizou-se de maneira geral a classificação D (significativa) para o mineroduto. Em situações em que não há possibilidade do evento atingir o mineroduto, a classificação foi reduzida para C (moderada).

Tabela 5. Matriz de risco – p x consequência (ISO 20074, 2019).

Probabilidade de risco <i>p</i>	Matriz de risco						
	≥ 40%	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto
	20% a 40%	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Muito Alto
	10% a 20%	Médio	Moderado	Moderado	Moderado	Alto	Alto
	5% a 10%	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado	Moderado
	<5%	Muito baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Matriz de risco			A	B	C	D	E
Grau de consequência de ruptura do duto							

Os valores das classificações de risco conforme a ISO 20074 (2019) e as avaliações dos taludes quanto a NBR 11682 (2009) que gerou resultado de aceitabilidade são apresentados a seguir na Tabela 6.

Tabela 6. Avaliações conforme ambos os critérios.

PONTO	<i>p</i>	FS	ISO 20074 (2019)		NBR 11682 (2009)			
			Grau de consequência	Classificação do risco	Dano a vidas humanas	Danos materiais e ambientais	FS min. de acordo com a NBR 11.682	Avaliação final
1	-	1,14	C	Baixo	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
2	7,94%	1,108	C	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
3	8,69%	1,146	D	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
4	24,97%	1,113	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
5	9,41%	1,15	D	Moderado	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
6	-	1,45	C	Baixo	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
7	72,83%	0,95	D	Muito alto	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
8	26,30%	1,029	D	Alto	Médio	Médio	1,4	Não Conforme
9	0,14%	1,729	D	Baixo	Baixo	Baixo	1,2	Conforme
10	0,54%	1,781	D	Baixo	Baixo	Baixo	1,2	Conforme
11	16,17%	1,13	D	Alto	Baixo	Médio	1,3	Não Conforme
12	37,95%	1,062	D	Alto	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
13	20,72%	1,126	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
14	1,53%	1,187	D	Baixo	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
15	-	2,61	D	Baixo	Alto	Alto	1,5	Conforme
16	2,39%	1,279	D	Baixo	Médio	Médio	1,4	Não Conforme
17	-	2,42	D	Baixo	Médio	Médio	1,4	Conforme
18	10,11%	1,222	C	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Conforme
19	8,70%	-	C	Moderado	Médio	Baixo	1,3	Disponível somente p



PONTO	p	FS	ISO 20074 (2019)		NBR 11682 (2009)			
			Grau de consequência	Classificação do risco	Dano a vidas humanas	Danos materiais e ambientais	FS min. de acordo com a NBR 11.682	Avaliação final
20	7,91%	1,33	C	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Conforme
21	-	1,415	D	Baixo	Baixo	Baixo	1,2	Conforme
22	16,51%	1,198	C	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
23	11,57%	1,16	C	Moderado	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
24	17,67%	1,134	D	Alto	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
25	16,71%	1,143	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
26	8,10%	-	D	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Disponível somente p
27	10,70%	-	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Disponível somente p
28	5,90%	-	D	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Disponível somente p
29	7,18%	1,157	D	Moderado	Alto	Médio	1,5	Não Conforme
30	14,00%	-	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Disponível somente p
31	12,60%	1,106	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
32	10,57%	1,202	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Conforme
33	21,00%	-	D	Alto	Baixo	Baixo	1,2	Disponível somente p
34	41,79%	1,005	D	Muito alto	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
35	5,10%	1,322	D	Moderado	Médio	Médio	1,4	Não Conforme
36	8,51%	1,194	D	Moderado	Médio	Médio	1,4	Não Conforme
37	0,10%	3,71	D	Baixo	Baixo	Médio	1,3	Conforme
38	11,03%	1,169	C	Moderado	Baixo	Baixo	1,2	Não Conforme
8	Pontos com classificações de risco baixas ou moderadas e com fator de segurança conforme a NBR.							
4	Pontos com classificações de risco baixas e com fator de segurança não conforme a NBR.							
12	Pontos com classificações de risco moderadas e com fator de segurança não conforme a NBR.							
14	Pontos com classificações de risco altas ou muito altas e com fator de segurança não conforme a NBR.							

Conforme os dados apresentados, a grande maioria dos taludes se mostrou não conforme em relação aos critérios da norma, porém a norma traz uma avaliação que considera apenas o fator de segurança como critério de avaliação, desprezando as probabilidades de falha relacionadas aos eventos.

Considerando ambas as avaliações, 8 pontos estão conforme a NBR 11682 e possuem classificação de risco baixas ou moderadas. Além destes, são observados 4 pontos com classificação de risco baixo e 12 pontos com classificação de risco moderado mesmo estando não conforme segundo a NBR 11682. Neste sentido entende-se que, em casos onde mesmo com um fator de segurança baixo, quando promovida a variação dos parâmetros de resistência dos geomateriais envolvidos dentro da faixa esperada e se tenha valores de probabilidades de falha reduzidos, desde que o local esteja adequado aos níveis de risco aceitáveis pela proprietária do empreendimento, pode-se conviver com a condição.

Os demais 14 pontos que estão em desconformidade com a NBR e possuem classificação de risco alta ou muito alta, sendo estes os principais pontos indicados por esta metodologia para serem alvo de investigações geotécnicas complementares que permitam confirmar ou refutar a classificação prévia. Havendo a confirmação, estes deverão ser alvo de intervenções que visam elevar os fatores de segurança.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma abordagem probabilística para a avaliação dos riscos geotécnicos dos taludes ao longo do mineroduto Minas-Rio, incorporando não apenas a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, mas também a influência do nível d'água e suas variações. O uso de análises probabilísticas mostrou-se fundamental para reduzir incertezas associadas à previsão de eventos naturais, oferecendo uma ferramenta robusta de apoio à gestão de riscos em áreas suscetíveis a movimentos de massa.

A classificação dos riscos ao longo do traçado do mineroduto configura-se como etapa essencial para a gestão da integridade do sistema. Ao identificar trechos com maior probabilidade de ocorrência de eventos adversos, especialmente de natureza geotécnica, torna-se possível priorizar de forma criteriosa as ações de monitoramento, inspeção e mitigação. Essa priorização contribui para a alocação otimizada de recursos, redução da exposição a falhas e, consequentemente, para a segurança operacional e a continuidade das atividades.

Como avanço técnico, recomenda-se a validação dos resultados por meio de registro de novas instabilidades durante o período de monitoramento (magnitude, frequência). Sugere-se ainda o aumento no



número de ensaios de laboratório a fim de refinar os parâmetros geotécnicos estatísticos de análise. Implementação de instrumentação para medição das variáveis de interesse, notadamente as poropressões, nas áreas de maior risco, a fim de quantificar a real variabilidade e seu impacto na variação da estabilidade dos taludes. Paralelamente, o contínuo aprimoramento das bases de dados, com a incorporação de séries pluviométricas mais aderentes às condições locais, poderá elevar significativamente a precisão dos resultados em futuras atualizações.

Salienta-se ainda que a Anglo American possui metodologia própria de gestão de riscos que considera maior número de variáveis e possíveis impactos. Desta forma, os dados apresentados neste artigo representam uma fração de um estudo mais abrangente desenvolvido pela FGS Geotecnia para Anglo American e não balizaram as ações da empresa de forma independente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 8044. *Projeto geotécnico*. Rio de Janeiro.
- Baars FJ. 1996. Geologia da Folha São Sebastião do Maranhão. In: Grossi-Sad JHG, Lobato LM, Soares ACP, Soares-Filho BS (Eds.), *Projeto Espinhaço em CD-ROM (textos, mapas e anexos) (2317-2435)*. Belo Horizonte: COMIG.
- Beacher, G. B.; Christian, J. T. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Chichester: Wiley, 2003. 616 p.
- Bishop A. W. & Morgenstern, N. (1960). *Stability coefficients for earth slopes*. *Géotechnique*, P. 129-150.
- Carvalho, W. M. HydroBr: A Python package to work with Brazilian hydrometeorological time series. 2020.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Atlas pluviométrico do Brasil: equações intensidade-duração-frequência: estação pluviográfica: Acaiaca-Jusante, código: 02043009 (ANA), município: Mariana/MG. 2021.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Atlas pluviométrico do Brasil: equações intensidade-duração-frequência: (desagregação de precipitações diárias), município: João Monlevade/MG, estação pluviométrica: Rio Piracicaba, código: 01943001. 2014.
- Kadar, I.; Nagy, L. The examination of different soil parameters' coefficient of variation values and types of distributions. In: Proc., 6th Int. Young Geotechnical Engineers' Conf.(iYGEC6). London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017.
- Peres, G. G.; Alkmim, F. F.; Jordt-Evangelista, H. The southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: geologic architecture and tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, n. 76, p. 771-790, 2004.
- Pinheiro, M. C. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. ABRH. 1ª Edição. 2011.
- International Organization For Standardization. ISO 20074:2019 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Geotechnical hazard management for onshore pipelines. Geneva: ISO, 2019.