XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/80

Fatores que influenciam os resultados de análises de estabilidade – Estudo de caso

Gisele Santos Custódio
Engenheira Geotécnica, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, Gisele.custódio@tractebel.engie.com

Felipe Vasconcelos da Silva
Engenheiro Civil, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, Felipe.vasconcelos@tractebel.engie.com

Washington Thiago Aguiar
Engenheiro Geotécnico, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, Washington.aguiar@tractebel.engie.com

Marcus Vinicius Lima Dias
Engenheiro Geotécnico, Vale, Itabirito, Brasil, marcus.dias1@vale.com

Mariela Souza Gomes Silva
Engenheira Geotécnica, Vale, Itabirito, Brasil, Mariela.silva@vale.com

RESUMO: A análise de estabilidade de taludes constitui uma etapa fundamental na avaliação da segurança de estruturas geotécnicas associadas à mineração. Entretanto, os resultados dessas análises podem ser influenciados por diversos fatores, como a definição dos parâmetros geotécnicos, as condições hidráulicas consideradas, a geometria do talude e o modelo geotécnico adotado. Este trabalho apresenta um estudo de caso aplicado a um talude antropizado localizado na margem esquerda do reservatório de uma barragem situada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A avaliação foi realizada por meio de inspeções de campo, revisão documental, ensaios laboratoriais e análises de estabilidade utilizando métodos de equilíbrio limite. Inicialmente, as análises de estabilidade foram realizadas utilizando parâmetros de resistência estimados a partir de correlações empíricas com o índice de resistência à penetração (Nspt). Os resultados indicaram fator de segurança inferior ao recomendado pelas normas técnicas brasileiras, evidenciando a necessidade de investigações complementares. Ensaios triaxiais CIUsat foram realizados em amostras indeformadas coletadas em solo natural e em material de aterro presente na área de estudo. Os resultados indicaram comportamento semelhante entre os materiais, com ângulo de atrito efetivo próximo de 30° e intercepto coesivo praticamente nulo. A partir desses resultados, foram avaliadas alternativas de estabilização capazes de restabelecer níveis adequados de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, fator de segurança, equilíbrio limite, parâmetros geotécnicos, ensaio triaxial, mineração.

ABSTRACT: Slope stability analysis is a fundamental step in assessing the safety of geotechnical structures associated with mining activities. However, the results of these analyses can be influenced by several factors, such as the definition of geotechnical parameters, the hydraulic conditions considered, the slope geometry, and the adopted geotechnical model. This paper presents a case study applied to an anthropogenic slope located on the left margin of a reservoir associated with a dam in the Quadrilátero Ferrífero region, Minas Gerais, Brazil. The evaluation was carried out through field inspections, document review, laboratory testing, and slope stability analyses using limit equilibrium methods. Initially, the stability analyses were performed using shear strength parameters estimated from empirical correlations with the Standard Penetration Test index (SPT). The results indicated a factor of safety lower than that recommended by Brazilian technical standards, highlighting the need for additional investigations. CIUsat triaxial tests were then performed on undisturbed samples collected from natural soil and filling material present in the study area. The results indicated similar mechanical behavior between the materials, with an effective friction angle close to 30° and negligible effective cohesion. Based on these results, stabilization alternatives were evaluated, all capable of restoring adequate safety levels.

KEYWORDS: slope stability, factor of safety, limit equilibrium, geotechnical parameters, triaxial test, mining.

1 INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes constitui uma etapa essencial na avaliação da segurança de estruturas geotécnicas associadas a obras de infraestrutura, mineração e barragens. A confiabilidade dos resultados dessas análises depende diretamente da qualidade das investigações geotécnicas e da adequada definição das premissas adotadas nos modelos de cálculo. Entre os fatores que exercem maior influência nos resultados destacam-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais, a caracterização geotécnica do maciço, as condições hidráulicas e a representação geométrica do talude analisado. Pequenas variações nesses parâmetros podem resultar em diferenças significativas nos fatores de segurança obtidos, influenciando a interpretação das condições de estabilidade (Duncan & Wright, 2005).

Em muitos projetos geotécnicos, especialmente em fases preliminares de estudo ou em situações nas quais a realização de investigações detalhadas é limitada, os parâmetros de resistência dos solos são estimados a partir de correlações empíricas baseadas em ensaios de campo, como o índice de resistência à penetração (Nspt). Embora amplamente utilizadas na prática da engenharia geotécnica, essas correlações podem introduzir incertezas relevantes nas análises, uma vez que foram desenvolvidas a partir de bases de dados específicas e podem não representar adequadamente o comportamento de determinados materiais (Kulhawy & Mayne, 1990).

A variabilidade associada à caracterização geotécnica dos materiais constitui uma das principais fontes de incerteza nas análises de estabilidade de taludes (Fell et al., 2008). Dessa forma, a utilização de parâmetros obtidos a partir de ensaios laboratoriais ou retroanálises de campo pode contribuir significativamente para a melhoria da confiabilidade das análises. Hoek & Bray (1981) destacam que a adequada definição dos parâmetros geotécnicos é um dos aspectos mais relevantes no processo de modelagem de taludes, sendo recomendável a utilização de parâmetros representativos do comportamento real do maciço sempre que possível.

Nesse contexto, estudos baseados em casos reais desempenham papel importante na avaliação da influência das premissas adotadas nas análises geotécnicas. Abramson et al. (2002) ressaltam que a comparação entre diferentes métodos de obtenção de parâmetros geotécnicos pode contribuir para o aprimoramento das práticas de projeto e para uma melhor compreensão das incertezas associadas às análises de estabilidade.

O presente trabalho apresenta um estudo de caso aplicado a um talude localizado na margem esquerda do reservatório de uma barragem situada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Inicialmente, as análises de estabilidade foram realizadas utilizando parâmetros de resistência estimados a partir de correlações empíricas com o índice de resistência à penetração (Nspt). Após a execução das obras de retaludamento, foram observados indícios de movimentação do talude, caracterizados principalmente pelo surgimento de trincas longitudinais nas bermas e por processos erosivos localizados. Diante dessas evidências, foi realizada uma investigação geotécnica complementar, incluindo a coleta de blocos indeformados e a execução de ensaios triaxiais saturados adensados isotropicamente não drenados (CIUsat), com o objetivo de refinar a caracterização geotécnica dos materiais e reavaliar as condições de estabilidade do talude.

Assim, o presente estudo discute a influência da definição dos parâmetros geotécnicos nos resultados das análises de estabilidade, comparando parâmetros estimados por correlações empíricas com aqueles obtidos por meio de ensaios laboratoriais.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

A região na qual se insere o talude reconformado, foco de estudo, é caracterizada por rochas metassedimentares e solos residuais derivados de filitos e xistos.

Estudos anteriores indicaram que o material predominante na área é um solo residual de filito dolomítico, caracterizado por elevada anisotropia e alta susceptibilidade ao intemperismo. Não foi possível a realização de sondagens complementares para a definição do perfil litológico do terreno, em função da

dificuldade de acesso ao local, sendo então realizada a sua interpretação baseada nas sondagens do entorno, afloramentos e topografia anterior ao seu retaludamento.

Adicionalmente, foram identificadas falhas no sistema de drenagem superficial e evidências de ravinamento, fatores que contribuíram para processos erosivos e instabilidades locais.

3 CONTEXTO GEOTÉCNICO

Para as análises de estabilidade iniciais foi considerada a determinação dos parâmetros de resistência mecânica obtidos, apenas, a partir da correlação entre o Nspt e correlações empíricas dos materiais. Tem-se como correlações adotadas para a coesão (c) e ângulo atrito interno (ϕ) em função do índice de resistência à penetração (Nspt):

$\phi = (20 \times Nspt)^{1/2} + 15º$……segundo Kishida (1967)
c =Nspt / 1,2…… aplicada para solos não coesivos segundo Bowles (1997)

Segue abaixo os valores de coesão determinados para cada material a partir das correções supracitadas. Onde SR refere-se a denominação solo residual de filito e, SAP, saprólito de filito.

Tabela 1- Parâmetros de resistência estimados para os materiais.

Camada	Material	Nspt médio	Coesão	ϕ (º)	ϕ médio (º)	Densidade
1	SR – Nspt 14	14	23 a 33	29 a 38	34	17,7
2	SR – Nspt 24	24	37 a 60	33 a 42	38	18,7
3	SAP – Nspt 39	39	32 a 59	38 a 46	42	20
4	FILITO Nspt 50+	50	41 a 74	41 a 49	45	20,9

Posteriormente, foi realizada a caracterização dos materiais presentes na área de retaludamento. Para isso, foram coletados blocos indeformados em três pontos localizados no talude. Os ensaios granulométricos indicaram predominância de solos classificados como silte argiloso, com distribuição típica composta por 14 a 18% de argila, 70 a 74% de silte e 6 a 10% de areia.

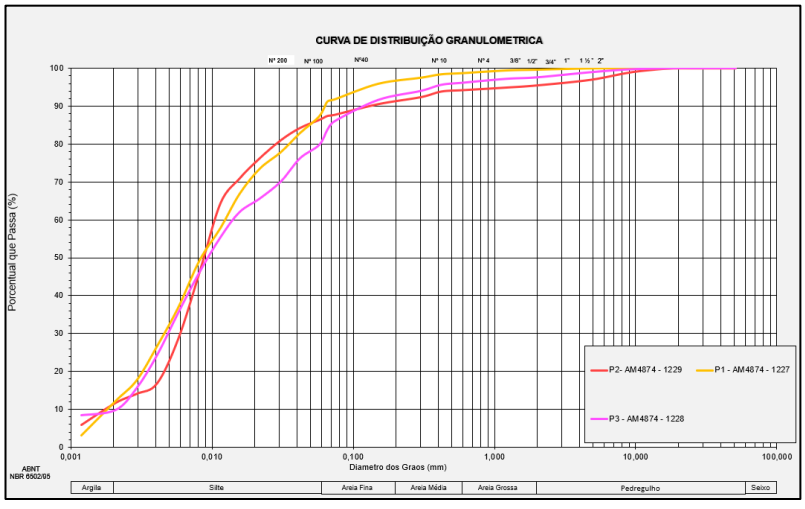


Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais

Foram realizados ensaios triaxiais saturados adensados isotropicamente não drenados (CIUsat) em corpos de prova talhados a partir dos blocos coletados. As tensões confinantes aplicadas foram de 150, 300, 600 e 1200 kPa. Os resultados indicaram comportamento mecânico semelhante entre o solo natural e o material de aterro do talude, com ângulo de atrito interno efetivo entre 29° e 30° e intercepto coesivo efetivo praticamente nulo. A comparação com os parâmetros estimados por correlações com o índice de resistência à penetração (Nspt) evidencia diferenças significativas. Enquanto as correlações indicaram valores de coesão

entre aproximadamente 23 e 74 kPa, os ensaios triaxiais apontaram intercepto coesivo efetivo praticamente nulo. Esse contraste indica que a utilização exclusiva de correlações empíricas pode levar à superestimação da resistência ao cisalhamento e, consequentemente, à obtenção de fatores de segurança artificialmente elevados.

A Figura 2 apresenta a interpretação das trajetórias de tensões efetivas obtidas nos ensaios triaxiais, evidenciando a envoltória de resistência representativa dos materiais analisados. As amostras AM 4874-1228 e AM 4874-1229 correspondem ao material de aterro, enquanto a amostra AM 4874-1227 corresponde ao solo residual.

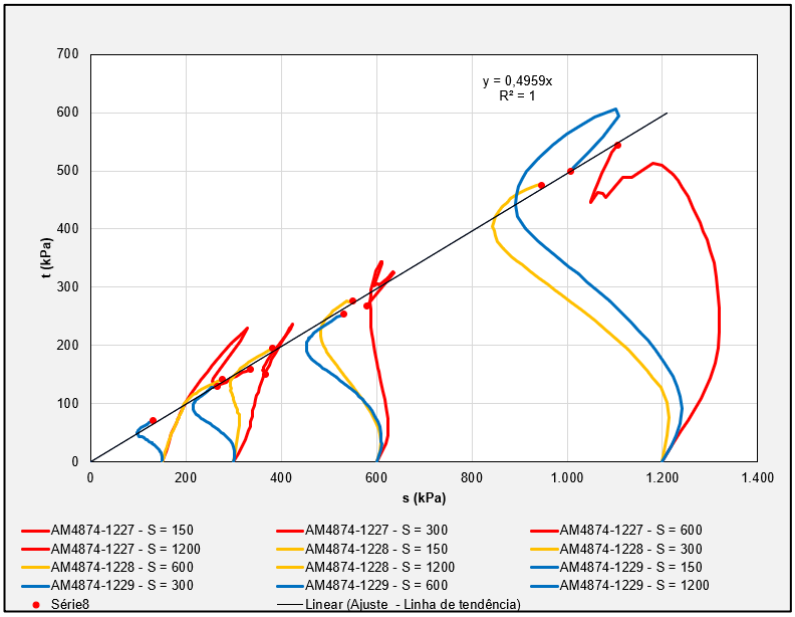


Figura 2 Trajetórias de tensões efetivas obtidas nos ensaios triaxiais CIUsat

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade de taludes são essenciais para garantir a segurança e a integridade das estruturas geotécnicas, os métodos de cálculos atualmente em uso, baseiam-se em uma hipótese de haver equilíbrio em uma determinada massa de solo rígido-plástico, na iminência de entrar em um processo de escorregamento (MASSAD, 2010). A modelagem numérica foi realizada através do software Slide® da Rocscience, considerando os seguintes métodos de cálculo: Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973) para condição drenada e respeitando o critério de resistência de Mohr-Coulomb representado pela equação a seguir:

$$T = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (1)$$

Onde:

- T: tensão cisalhante
- c': coesão efetiva
- σ': tensão efetiva
- ϕ': ângulo de atrito interno efetivo

A norma adotada para as análises de estabilidade foi a ABNT NBR 11682 (2009), que estabelece os critérios para estudos de estabilidade de taludes. Segundo essa norma, o nível de segurança requerido deve considerar tanto o risco associado à perda de vidas humanas quanto os possíveis danos materiais e ambientais decorrentes de uma eventual ruptura. Para o talude analisado neste estudo, o nível de segurança em relação à perda de vidas humanas foi classificado como médio, uma vez que a área apresenta permanência restrita de pessoas, ocorrendo principalmente durante atividades pontuais, como inspeções de campo, execução de obras e leituras de instrumentação geotécnica. De forma semelhante, o nível de segurança relacionado aos danos materiais e ambientais também foi classificado como médio, considerando que a área de influência do talude apresenta potencial para a ocorrência de impactos ambientais moderados em caso de instabilidade.

Com base nessas classificações e nas recomendações estabelecidas pela ABNT NBR 11682 (2009), adotou-se para as análises realizadas neste estudo um fator de segurança mínimo admissível (FS) igual ou superior a 1,4, conforme apresentado na Figura 3.

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

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ, ϕ, c, em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Figura 3 - Fator de segurança mínimo adotado para as análises
Fonte: ABNT NBR 11682:2009

5 RESULTADOS DAS ANÁLISES

As análises de estabilidade foram realizadas para a condição atual do talude considerando os parâmetros de resistência obtidos a partir dos ensaios laboratoriais. Para essa condição, foi obtido fator de segurança (FS) igual a 1,12, valor inferior ao mínimo recomendado pela ABNT NBR 11682 (2009) para taludes classificados com nível de segurança médio (FS ≥ 1,4). Esse resultado indica condição de estabilidade insatisfatória, coerente com as evidências de movimentação observadas em campo. Com o objetivo de restabelecer condições adequadas de estabilidade, foram avaliadas três alternativas de estabilização, cujos resultados são apresentados a seguir.

Tabela 2- Alternativas de estabilização modeladas e seus respectivos fatores de segurança

Alternativa	Descrição	FS
1	Berma de enrocamento	1,41
2	Escavação de alívio + berma	1,42
3	Berma com material de aterro	1,42

A seguir são apresentados os parâmetros de resistência adotados nas análises. Os parâmetros referentes aos materiais silte argiloso e aterro foram obtidos a partir de ensaios laboratoriais realizados nas amostras coletadas, enquanto os parâmetros do SAP (saprolito de filito), FIL (filito) e dos sedimentos foram estimados por meio de correlações com o índice de resistência à penetração (Nspt).

Tabela 3- Parâmetros de resistência adotados

Material	Cor	Peso específico (kN/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito interno efetivo (°)
SAP - NSPT 39		20	30	40
FIL NSPT 50+		20,9	45	48
SEDIMENTO		20	0	25
SILTE ARGILOSO		18	0	30
ATERRO		16	0	30

Os resultados indicam que todas as alternativas analisadas proporcionam fatores de segurança superiores ao mínimo recomendado, demonstrando que as intervenções propostas são eficazes para o restabelecimento da estabilidade global do talude.

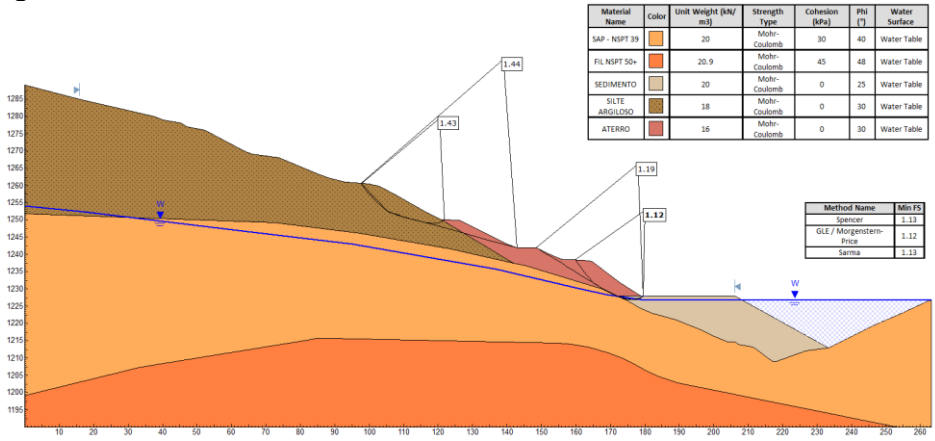


Figura 4 – Situação atual do talude – F.S = 1,12

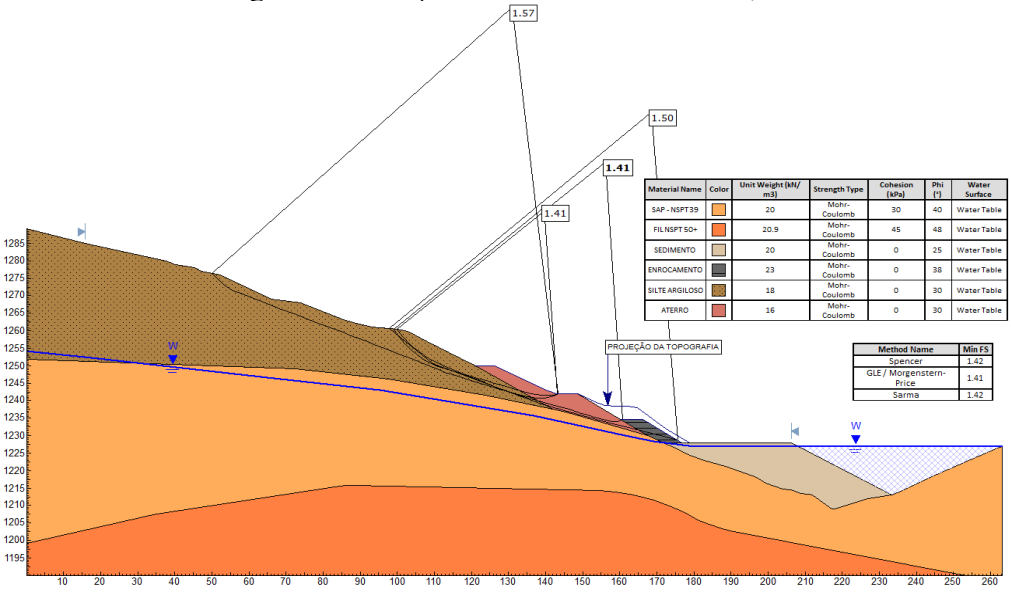


Figura 5 – 1ª Alternativa – F.S = 1,41.

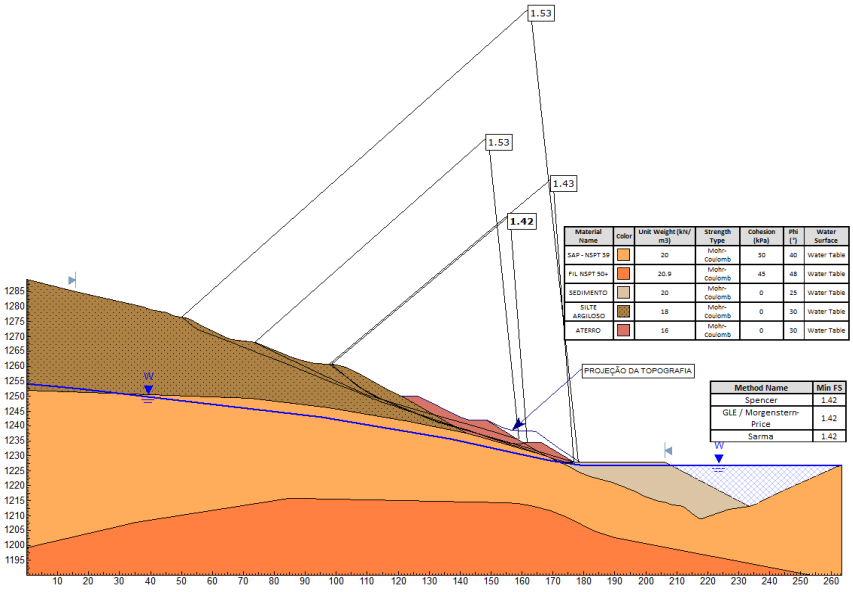


Figura 6 – 2ª Alternativa – F.S = 1,42.

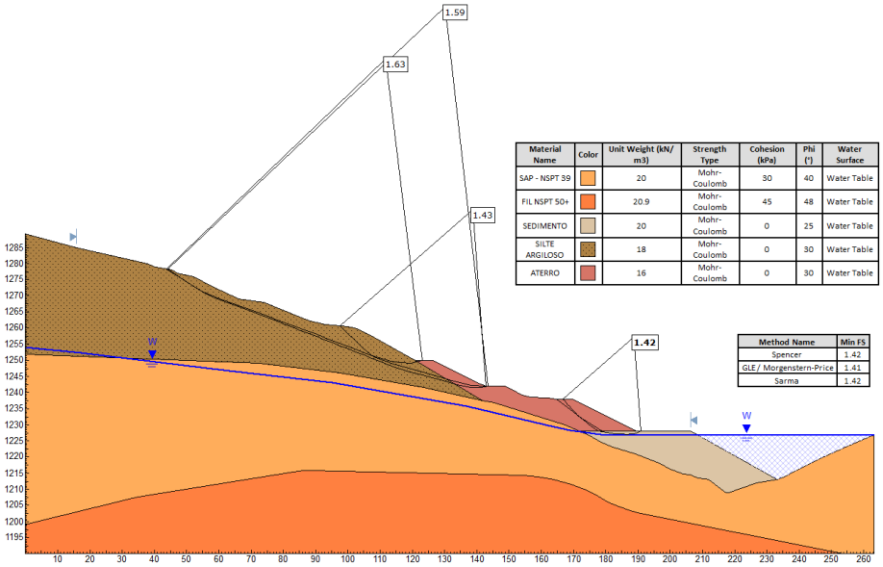


Figura 7 – 3ª Alternativa – F.S = 1,42.

6 DISCUSSÃO – FATORES QUE INFLUENCIAM OS RESULTADOS

Os resultados obtidos evidenciam que as análises de estabilidade são influenciadas pelas premissas adotadas na caracterização geotécnica dos materiais e na definição do modelo de cálculo. No caso analisado, verificou-se que a escolha dos parâmetros de resistência ao cisalhamento teve impacto direto nos fatores de segurança obtidos.

Nas análises preliminares foram adotados parâmetros estimados a partir de correlações empíricas com o índice de resistência à penetração (Nspt), prática comum em fases iniciais de projeto. Entretanto, essas correlações apresentam limitações, pois foram desenvolvidas a partir de bases de dados específicas e podem não representar adequadamente o comportamento de solos residuais ou materiais heterogêneos.

No talude estudado, as correlações indicaram valores de coesão significativamente superiores aos obtidos nos ensaios triaxiais. Enquanto as correlações sugeriam intercepto coesivo relevante, os ensaios laboratoriais indicaram comportamento essencialmente friccional, com coesão efetiva praticamente nula e ângulo de atrito interno entre 29° e 30°. Esse contraste evidencia que a utilização exclusiva de correlações empíricas pode levar à superestimação da resistência ao cisalhamento e, consequentemente, a avaliações excessivamente otimistas das condições de estabilidade.

Os ensaios triaxiais indicaram ainda comportamento semelhante entre o solo natural e o material de aterro presente na área de retaludamento, sugerindo propriedades geotécnicas comparáveis entre esses materiais. É importante salientar que a presença de aterros executados sem controle tecnológico pode introduzir heterogeneidade no maciço e aumentar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

Além dos parâmetros de resistência, as condições hidráulicas também exercem influência significativa na estabilidade do talude. Foram identificadas falhas no sistema de drenagem superficial e possível elevação da umidade do solo, condição que pode elevar as poropressões e reduzir as tensões efetivas, diminuindo a resistência ao cisalhamento mobilizada.

A geometria do talude também se mostrou relevante, uma vez que alterações na inclinação ou na configuração das bermas modificam a distribuição de tensões no maciço. No presente estudo, as alternativas de estabilização envolveram principalmente a introdução de bermas e escavações de alívio, medidas que contribuíram para reduzir as tensões atuantes e aumentar o fator de segurança global.

De modo geral, os resultados reforçam a importância da caracterização geotécnica, utilização de parâmetros representativos do comportamento real dos materiais na análise de estabilidade de taludes e adequação geométrica do talude.

7 CONCLUSÕES

O estudo apresentado demonstrou que os resultados das análises de estabilidade são influenciados pelas premissas adotadas na modelagem geotécnica, especialmente no que se refere à definição dos parâmetros de resistência dos materiais. A comparação entre parâmetros estimados por correlações empíricas com o índice de resistência à penetração (Nspt) e aqueles obtidos por meio de ensaios laboratoriais evidenciou diferenças significativas, ressaltando a importância da caracterização geotécnica adequada para a confiabilidade das análises.

As análises de estabilidade realizadas indicaram que a condição atual do talude apresenta fator de segurança inferior ao recomendado pelas normas técnicas brasileiras, evidenciando a necessidade de intervenções de estabilização. As alternativas de estabilização avaliadas mostraram-se eficazes para restabelecer níveis adequados de segurança, contribuindo para a melhoria das condições de estabilidade do talude.

De modo geral, os resultados obtidos reforçam a importância da realização de investigações geotécnicas adequadas e da correta definição dos parâmetros e das condições de análise na avaliação da estabilidade de taludes associados a empreendimentos de mineração.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão à VALE S.A. pela autorização para utilização das informações técnicas e pela possibilidade de divulgação dos resultados deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11682: Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro, 2009.

NBR 7181 – Solo: Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

Abramson, L. W.; Lee, T. S.; Sharma, S.; Boyce, G. M. Slope Stability and Stabilization Methods. New York: Wiley, 2002.

ASTM D4767-11 (Reapproved 2020) – *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. ASTM International, West Conshohocken, USA.

Bowles, J. E. Foundation Analysis and Design. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

Carvalho, M. A. Análise de estabilidade de taludes utilizando métodos de equilíbrio limite. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

Duncan, J. M.; Wright, S. G. Soil Strength and Slope Stability. Hoboken: Wiley, 2005.

Hoek, E.; Bray, J. Rock Slope Engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

Hunter, G.; Fell, R. Travel distance angle for landslides in constructed embankments. Canadian Geotechnical Journal, v. 40, n. 6, p. 1122–1132, 2003.

Kishida, H. Estimation of Soil Strength Parameters from SPT Results. Tokyo, 1967.

Kulhawy, F. H.; Mayne, P. W. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1990.