

# Avaliação do Comportamento Mecânico de Barragens de Rejeito com Reservatório Modelado Sob Dois Cenários: Homogêneo e Heterogêneo

Túlio Pedrosa de Souza

Engenheiro Geotécnico, UFPE, TPF Engenharia, Recife, Brasil, [tulio.pedrosas@ufpe.br](mailto:tulio.pedrosas@ufpe.br)

Katia Botelho Torres Galindo de Souza

Engenheira Geotécnica, TPF Engenharia, Recife, Brasil, [katia.galindo@tpfe.com.br](mailto:katia.galindo@tpfe.com.br)

Igor Fernandes Gomes

Professor Associado, UFPB, João Pessoa, Brasil, [igor.fernandes@ct.ufpb.br](mailto:igor.fernandes@ct.ufpb.br)

**RESUMO:** A estabilidade de barragens de rejeito está diretamente associada às propriedades geotécnicas do maciço e do reservatório, cuja deposição por métodos hidráulicos resulta em significativa heterogeneidade estratigráfica. Apesar disso, é comum que análises de estabilidade adotem modelos homogêneos, com propriedades médias, o que pode levar à superestimação dos fatores de segurança e à não identificação de mecanismos de ruptura localizados. Neste estudo, avaliou-se comparativamente o comportamento mecânico de uma barragem de rejeitos a partir de dois modelos geotécnicos, um homogêneo e outro heterogêneo, por meio de simulações numéricas no software Slide2 da Rocscience, utilizando os métodos de Spencer, Morgenstern-Price e Sarma. A construção do modelo heterogêneo baseou-se em uma campanha integrada de sondagens SPT, ensaios CPTu e triaxiais, que permitiu a estratificação do reservatório em três zonas com diferentes níveis de compactidade e resistência. Os resultados evidenciaram que o modelo homogêneo apresentou um fator de segurança de 1,502, enquanto o modelo heterogêneo resultou em 1,420, com rupturas concentradas nas interfaces de menor resistência. Conclui-se que a representação zoneada proporciona uma análise mais realista e conservadora, sendo recomendada sua adoção em projetos de avaliações de segurança de estabilidade de barragens de rejeito.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens de rejeito, Modelagem geotécnica, Heterogeneidade dos materiais, Análise de estabilidade.

**ABSTRACT:** The stability of tailings dams is directly associated with the geotechnical properties of the massif and reservoir, whose deposition by hydraulic methods results in significant stratigraphic heterogeneity. Despite this, stability analyses often adopt homogeneous models with average properties, which can lead to overestimation of safety factors and failure of localized failure mechanisms. In this study, we comparatively evaluated the mechanical behavior of a tailings dam using two geotechnical models, one homogeneous and one heterogeneous, through numerical simulations in Rocscience's Slide2 software, using the Spencer, Morgenstern-Price, and Sarma methods. The heterogeneous model was constructed based on an integrated campaign of SPT drilling, CPTu, and triaxial tests, which allowed the reservoir to be stratified into three zones with different levels of compactness and strength. The results showed that the homogeneous model presented a safety factor of 1.502, while the heterogeneous model resulted in 1.420, with ruptures concentrated at the interfaces of least resistance. It is concluded that the zoned representation provides a more realistic and conservative analysis, and its adoption is recommended in tailings dam stability safety assessment projects.

**KEYWORDS:** Tailings dams, Geotechnical modeling, Material heterogeneity, Stability analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos minerais tem resultado na construção de inúmeras barragens de rejeito em escala global. Embora essas estruturas sejam essenciais para o gerenciamento de resíduos de mineração, eventos de ruptura têm provocado impactos socioambientais e econômicos severos, como os observado nos

desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). A prevenção de falhas depende de análises de estabilidade robustas, que por sua vez requerem uma representação realista das propriedades geotécnicas dos materiais do maciço, da fundação e do próprio reservatório.

A obtenção de parâmetros representativos, contudo, não é trivial. Estudos recentes ressaltam que a coleta de amostras de rejeito constitui um desafio técnico, em virtude da natureza heterogênea e frequentemente muito sensível desses materiais, o que dificulta a recuperação de amostras indeformadas adequadas para caracterização geotécnica (CARNEIRO, J. J. V. et al., 2023). Essa limitação reforça a importância de integrar métodos de campo, ensaios in situ e amostragem laboratorial de alta qualidade para reduzir as incertezas associadas à definição dos parâmetros resistentes.

Os rejeitos, subprodutos finos de processos de beneficiamento mineral, são frequentemente depositados em zonas distintas, cada uma com características geotécnicas e hidráulicas específicas. Um estudo demonstrou que a zona de retenção junto ao dique exibe permeabilidade relativamente alta e elevada resistência ao cisalhamento, enquanto a zona da lagoa, composta por materiais mais finos, apresenta permeabilidade muito menor e resistência significativamente reduzida (RODRÍGUEZ-PACHECO, R.; BUTLAŃSKA, J.; OLIVA-GONZÁLEZ, A. O, 2025). Outra pesquisa destacou ainda que, sob tensões elevadas, os rejeitos mais compactados sofrem trituração de partículas, o que altera não linearmente seu comportamento resistente, afetando de maneira crítica a mobilização do ângulo de atrito e da coesão (CHEN, Q. et al., 2023).

Apesar disso, muitos estudos ainda empregam modelos geotécnicos homogêneos em análises de estabilidade, por simplificarem o processo de modelagem e reduzirem a demanda computacional. No entanto, tais representações podem superestimar os fatores de segurança e mascarar mecanismos críticos de falha. Em contraste, a adoção de modelos heterogêneos, calibrados por meio de investigações SPT, CPTu e ensaios laboratoriais, tem demonstrado resultados mais realistas, com identificação aprimorada de modos de ruptura localizados (SOTTILE et al., 2020).

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma análise comparativa da estabilidade de barragens de rejeito por meio da simulação de dois modelos geotécnicos: um homogêneo, com propriedades médias, e um heterogêneo, subdividido o material do reservatório com base em critérios geotécnicos e estratigráficos. O objetivo principal é avaliar o impacto da heterogeneidade do reservatório na estabilidade da barragem, demonstrar como o zoneamento geotécnico influencia significativamente os fatores de segurança e oferecer subsídios para práticas mais realistas de projeto.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado uma barragem de rejeitos típica da mineração de ferro, com alteamento pelo método a montante. A seção geotécnica utilizada para construção dos modelos foi obtida de um estudo publicado por Carneiro A. et al. (2023), que apresenta uma configuração representativa de barragens construídas com deposição hidráulica de rejeitos finos (Figura 1). A fonte dos dados foi utilizada como referência para geometria, estratigrafia e propriedades geotécnicas dos materiais, na Tabela 1 pode-se visualizar os parâmetros dos materiais.

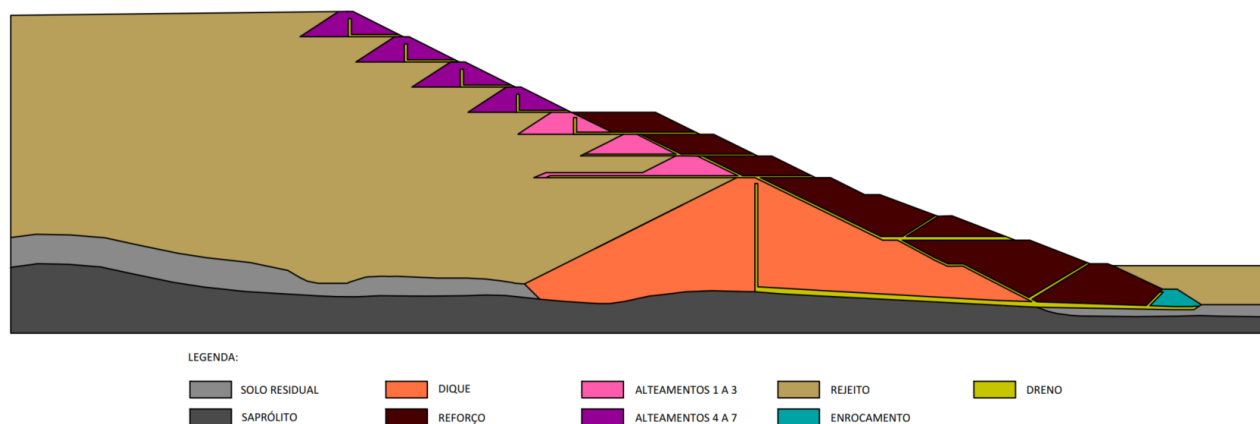


Figura 1. Seção homogênea da barragem.  
Fonte: Adaptado de Carneiro A. et al. (2023).



Tabela 1. Parâmetros dos materiais presentes na barragem.

MATERIAL	$\gamma$ (kN/m³)	C' (kPa)	$\phi'$ (°)
Solo Residual	18	28	27
Saprólito	21	34	26
Dique	19	24	30
Alteamentos 1 a 3	21	0	35
Alteamentos 4 a 7	19	13	30
Reforço – UGG-06	21	10	29
Rejeito	21	0	35
Dreno	19	0	36
Enrocamento	22	Shear Normal Function (Leps intermediária)	-

Fonte: Adaptado de Carneiro A. et al. (2023).

## 2.1 Construção da Seção Heterogênea do Reservatório

A geometria heterogênea do reservatório foi definida com base na classificação do comportamento dos solos conforme a NBR 6484:2020 (Tabela 2), que estabelece critérios para interpretação dos resultados de ensaios de sondagem a percussão (SPT). Sendo assim, a partir dos valores de  $N_{spt}$ , os rejeitos foram classificados em três zonas distintas, representando diferentes graus de resistência e compacidade, refletindo as variações naturais resultantes do processo de deposição hidráulica.

Tabela 2: Interpretação dos materiais a partir de sondagens SPT de acordo com a NBR 6484:2020.

Argilas e siltes argilosos		Areias e siltes arenosos	
SPT	Classificação	SPT	Classificação
$\leq 2$	Muito mole	$\leq 4$	Fofa
3 a 5	Mole	5 a 8	Pouco compacto
6 a 10	Média	9 a 18	Mediamente compacto
11 a 19	Rija	19 a 40	Compacto
$> 19$	Muito rija	$> 40$	Muito compacto

Fonte: ABNT NBR 6484 (2020).

A alocação espacial dessas zonas ao longo do perfil foi feita com base na interpolação dos resultados de múltiplas sondagens realizadas no eixo da barragem, associando os dados de campo à geometria da seção de referência adotada no modelo. Além dos ensaios SPT, foram utilizados ensaios complementares, como piezocone (CPTu) e ensaios triaxiais em amostras indeformadas, do tipo denilson, para validar os limites das zonas e ajustar os parâmetros geotécnicos representativos de cada camada, garantindo maior fidelidade na atribuição das propriedades hidráulicas e resistentes aos materiais.

## 2.2 Modelagem Numérica

As análises foram realizadas pelo método de equilíbrio limite, com uso do algoritmo "Coocho Search" para identificação das superfícies críticas de ruptura. Foram consideradas as condições drenadas com nível d'água posicionado a partir da cota da soleira do extravasor descrita na seção base. Dois modelos foram desenvolvidos no software Slide2 (Rocscience):

- Modelo homogêneo: considerou o reservatório como um meio contínuo, utilizando valores médios ponderados dos parâmetros das três zonas.
- Modelo heterogêneo: incorporou as três zonas descritas, com propriedades específicas atribuídas a cada uma conforme a literatura.

Os resultados comparativos entre os modelos focaram na variação do fator de segurança global e na identificação de modos de ruptura localizados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Modelo Heterogêneo do Reservatório

A construção da seção heterogênea do reservatório foi desenvolvida a partir de uma robusta campanha de investigações geotécnicas composta por sondagens a percussão, ensaios de piezocone e ensaios de laboratório de caracterização e triaxiais. As sondagens SPT forneceram estimativas da resistência à penetração dos rejeitos ao longo do perfil do reservatório, refletindo a variação da compactidade dos materiais *in situ*. Os ensaios CPTu, permitiram obter dados de resistência de ponta, atrito lateral e pressão neutra, complementando a interpretação do perfil estratigráfico e contribuindo para a identificação de transições entre diferentes zonas deposicionais que não seriam facilmente detectadas apenas com o SPT. Já os ensaios triaxiais foram empregados para a determinação direta dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em diferentes camadas, servindo de base para a definição das propriedades geomecânicas representativas de cada zona e para a calibração do modelo numérico adotado na análise de estabilidade. Na Figura 2 podemos observar a localização das investigações de campo que foram realizadas na estrutura.

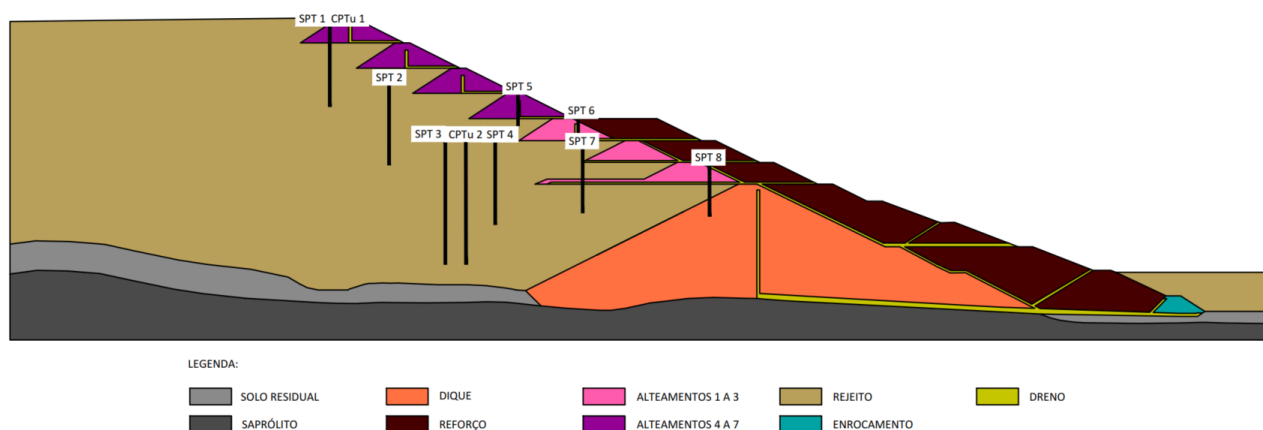


Figura 2: Localização da campanha de investigações no reservatório da estrutura.

As sondagens SPT, distribuídas ao longo de um perfil transversal à barragem, forneceram os valores de  $N_{spt}$  utilizados como critério primário para a definição das zonas geotécnicas do reservatório. Com o auxílio da NBR 6484:2020, os materiais puderam ser subdivididos obedecendo as seguintes faixas:

- $N_{spt}$  de 1 a 8: material fofo a pouco compacto (Rejeito 1);
- $N_{spt}$  de 9 a 18: material medianamente compactado (Rejeito 2);
- $N_{spt}$  acima de 18: material compactado a muito compacto (Rejeito 3).

Para complementar a interpretação estratigráfica e aprimorar a definição das interfaces entre as zonas, foram interpretados os dados dos ensaios CPTu com profundidades de investigação semelhantes às sondagens SPT. Os ensaios forneceram perfis contínuos de resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e pressão neutra ( $u_2$ ), permitindo uma análise mais refinada da variação vertical dos materiais. Os valores de  $q_c$  observados variaram de 0,5 MPa a 10,0 MPa, mas em sua maioria variando por volta dos 3,0 MPa.

No ensaio CPTu 1, foi possível identificar inicialmente o trecho correspondente ao aterro da barragem, caracterizado por valores elevados e relativamente constantes de resistência de ponta. A transição para o material do reservatório de rejeitos foi evidenciada por uma queda acentuada nos valores de  $q_c$ , indicando a mudança para um material de menor compactidade e resistência. No entanto, próximo ao final do furo, observou-se um aumento expressivo da resistência de ponta, sugerindo a presença de uma camada mais densa e compactada. Esse comportamento está em consonância com os dados obtidos na sondagem SPT 1, que também indicaram um aumento do  $N_{spt}$  nessa região. Já em relação ao CPTu 2 foi possível observar os baixos valores de resistência no início do furo e logo após algumas variações de aumento na resistência, o que também foi observado nos ensaios SPT.

Já no ensaio CPTu 2, os registros iniciais indicaram baixos valores de resistência de ponta ( $q_c$ ), compatíveis com um material de baixa compactidade. Ao longo da profundidade, foram observadas variações graduais com aumentos localizados na resistência, sugerindo a presença de camadas intermediárias mais densas ou com transições granulométricas. Esse comportamento foi corroborado pelos resultados da sondagem

SPT 3 correspondente, que também registrou valores baixos de  $N_{spt}$  nos primeiros metros e oscilações positivas nas camadas subsequentes, reforçando a consistência entre os dois métodos de investigação e a presença de heterogeneidade vertical no depósito de rejeitos.

A integração entre os dados de SPT, CPTu e ensaios triaxiais possibilitou a interpolação geotécnica ao longo do perfil, resultando na construção de uma seção heterogênea estratificada (Figura 3), com geometria compatível com a compactidade do material em diferentes regiões do reservatório. Importa destacar que, devido a restrições de confidencialidade dos dados utilizados, os perfis detalhados dos ensaios SPT e CPTu não podem ser publicados juntamente com este artigo, sendo apresentados apenas de forma interpretada para compor o modelo heterogêneo.

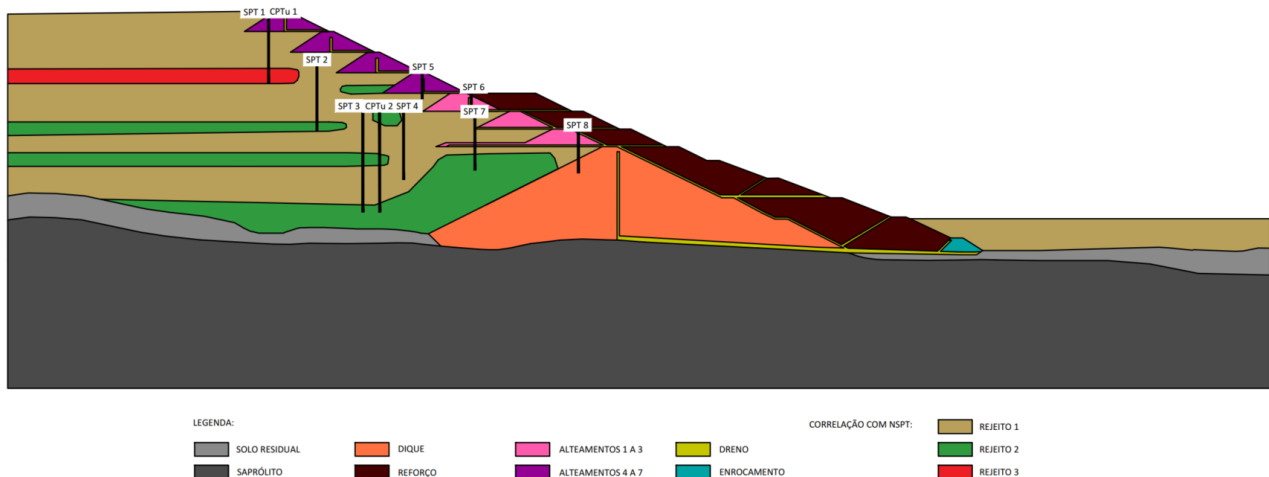


Figura 3. Seção heterogênea da barragem.

### 3.2 Parâmetros de resistência do rejeito do reservatório

A estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos foi inicialmente conduzida com base nos resultados obtidos nas sondagens SPT, por meio da aplicação de correlações empíricas amplamente consolidadas na literatura geotécnica. A partir dos valores de  $N_{spt}$  obtidos ao longo dos perfis investigados, foi realizado um tratamento estatístico considerando diferentes metodologias de correlação com o ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Tratamento estatístico do ângulo de atrito do rejeito por diferentes metodologias.

$\phi'$ Média	$\phi'$ Mediana	$\phi'$ 1º Quartil	$\phi'$ Mínimo	$\phi'$ Máximo	Metodologia
29	28	28	27	40	Peck et al.(1974)
27	25	22	20	48	Teixeira (1996)
30	30	29	28	46	Godoy (1983)
28	27	25	24	44	Muromachi e Kobayashi (1982)
25	23	21	19	44	Bowles (1997)
29	28	26	24	47	Hatanaka e Uchida (1996)

A análise estatística mostra que os valores médios de  $\phi'$  variaram entre 25° e 30°, com dispersões significativas entre os mínimos e máximos, refletindo a heterogeneidade dos materiais depositados. A mediana variou de 23° a 30°, e o primeiro quartil de 21° a 29°, indicando que, mesmo nos valores mais conservadores, os rejeitos apresentam comportamento predominantemente friccional.

Para complementar e validar os valores estimados por correlações empíricas, foram considerados os resultados de ensaios triaxiais não drenados (CU) com medição de poropressão, realizados em amostras indeformadas representativas das três zonas de rejeito identificadas na seção heterogênea. As amostras indeformadas foram obtidas por meio de sondagens, utilizando amostrador do tipo Denilson. Foram conduzidos três ensaios para cada zona, totalizando nove ensaios triaxiais ao longo do perfil do reservatório.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos dos triaxiais, mostraram coerência com os intervalos sugeridos pelas correlações com o SPT, porém com ajustes importantes nas camadas extremas,





especialmente nas zonas de rejeito mais fofo e mais compactado, onde a estrutura e a saturação do material impactam fortemente o comportamento drenado. Na Tabela 4 apresenta-se um resumo dos parâmetros de resistência médios dos ensaios triaxiais para cada zona.

Tabela 4. Parâmetros do rejeito para a seção heterogênea.

Material	Nspt	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (MPa)
Rejeito 1	1 a 8	21	27	0
Rejeito 2	9 a 18	21	32	0
Rejeito 3	> 18	21	36	0

Ressalta-se que as análises desenvolvidas neste estudo tiveram como foco exclusivo os parâmetros de resistência efetiva dos rejeitos, reconhecidamente adequada para análises de estabilidade em condições de longo prazo. A consideração da resistência não drenada, ainda que relevante para a avaliação global do comportamento dos rejeitos hidráulicos in situ, não foi contemplada no presente escopo, constituindo uma linha de aprofundamento para trabalhos futuros.

### 3.3 Comparação entre os cenários de análise

No modelo homogêneo, foram adotados os valores médios de resistência obtidos a partir das correlações com o SPT e ajustados conforme os ensaios triaxiais, representando o depósito de rejeitos como um único material isotrópico e contínuo. Já o modelo heterogêneo incorporou a divisão do reservatório em três zonas com diferentes valores de coesão de ângulo de atrito conforme detalhado na Tabela 4.

Em relação à definição do fator de segurança mínimo de referência, adotou-se o valor de 1,5, em conformidade com os critérios estabelecidos na NBR 13.028:2024, para análises em condição drenada com parâmetros de pico. Esse limite foi utilizado como base para avaliação da estabilidade global, sendo aplicado tanto nas análises com o modelo homogêneo quanto na configuração heterogênea.

Os resultados das análises numéricas evidenciaram diferenças relevantes no comportamento global de estabilidade entre os modelos geotécnicos homogêneo e heterogêneo. No modelo homogêneo (Figura 4), que considera o reservatório de rejeitos como um corpo isotrópico com propriedades médias constantes, foi observado um fator de segurança global de 1,502, satisfazendo o critério mínimo de  $FS \geq 1,5$  estabelecido pela NBR 13.028:2024 para análises em condição drenada com parâmetros de pico.

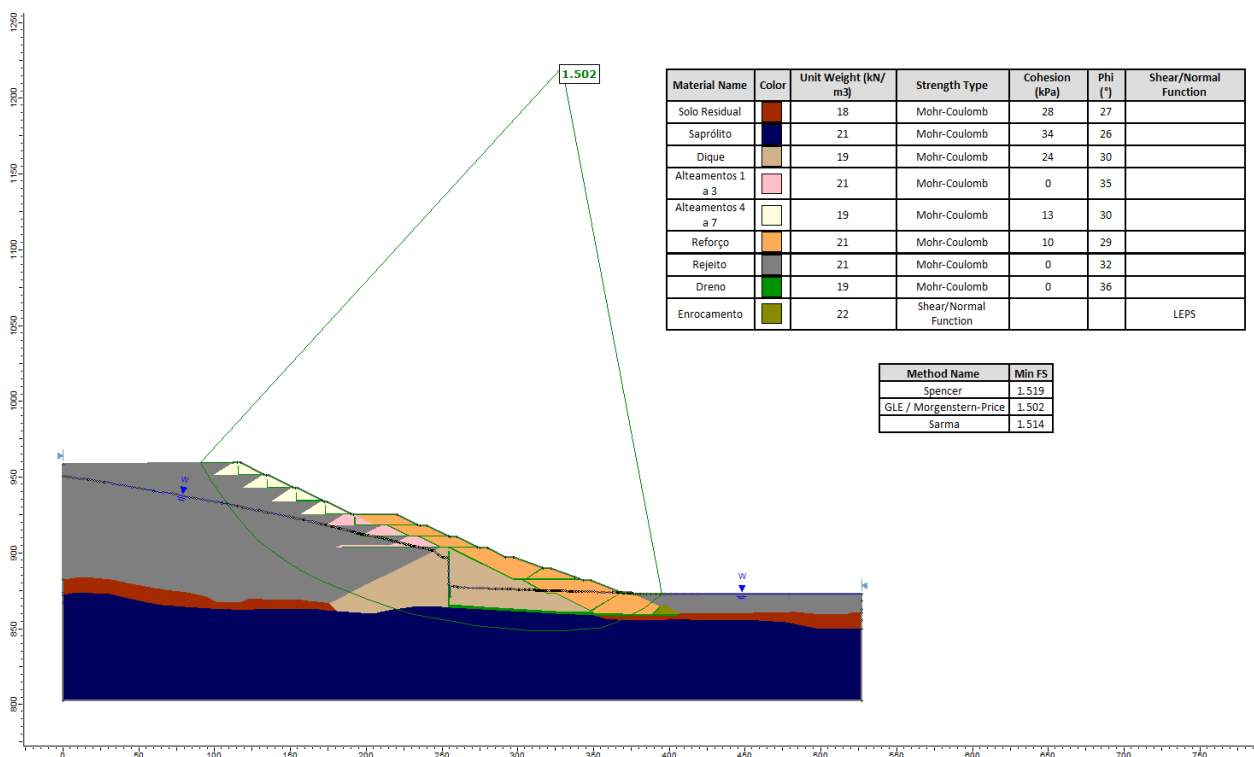


Figura 4. Resultado da análise de estabilidade da seção homogênea.

A superfície de ruptura crítica, neste caso, apresentou-se como profunda, contínua e de geometria ampla, atravessando de forma uniforme o maciço, o que é característico de modelos simplificados que não capturam variações internas de resistência e rigidez do material.

Em contraste, o modelo heterogêneo (Figura 5), no qual o reservatório foi discretizado em três zonas geotécnicas distintas com base em dados de investigação de campo e ensaios laboratoriais, apresentou um fator de segurança de 1,420, inferior ao limite normativo. A ruptura crítica identificada neste modelo foi mais superficial, com trajetórias localizadas, frequentemente concentradas nas interfaces entre zonas com contraste significativo de resistência ao cisalhamento, notadamente entre o rejeito 1 (fofo a pouco compacto).

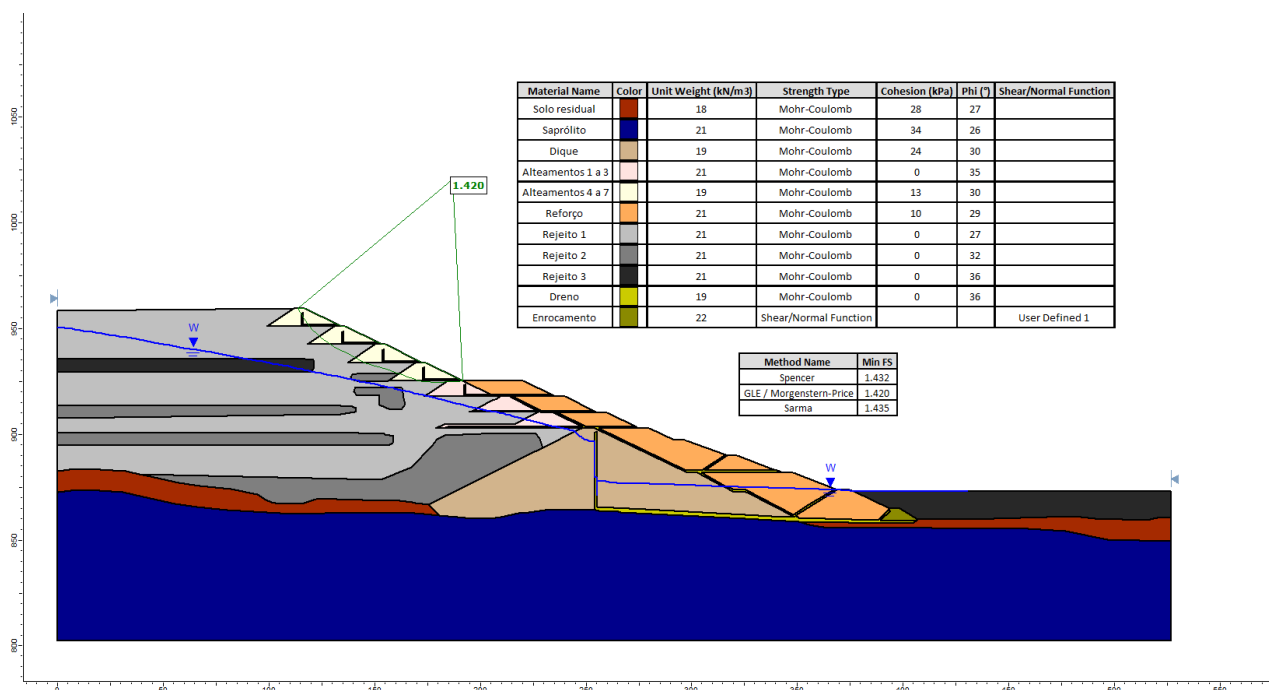


Figura 5. Resultado da análise de estabilidade da seção heterogênea.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a importância da representação geotécnica adequada do reservatório de rejeitos em análises de estabilidade de barragens. A comparação entre os modelos homogêneo e heterogêneo revelou que a simplificação do meio como uma massa contínua com propriedades médias pode superestimar os fatores de segurança e, consequentemente, induzir a uma falsa sensação de estabilidade estrutural.

O modelo homogêneo apresentou um fator de segurança global de 1,502, atendendo ao limite mínimo estabelecido pela NBR 13.028:2024 para análises drenadas com parâmetros de pico ( $FS \geq 1,5$ ). No entanto, o modelo heterogêneo, construído com base em uma campanha integrada de investigações geotécnicas e discretização do rejeito em três zonas de resistência distintas, apresentou um fator de segurança inferior ( $FS = 1,420$ ), indicando maior criticidade nas interfaces entre camadas com diferenças de resistência mecânica relevantes. Além da diferença nos valores de FS, os modos de ruptura também se mostraram distintos: superfícies mais profundas e amplas no modelo homogêneo, e rupturas rasas e localizadas nas zonas de menores resistência do modelo heterogêneo. Esse comportamento ressalta a relevância da estratificação na resposta estrutural da barragem.

Portanto, conclui-se que a adoção de modelos geotécnicos heterogêneos, calibrados com dados de sondagens, CPTu e ensaios laboratoriais, proporciona uma avaliação mais realista e conservadora da estabilidade de barragens de rejeito, contribuindo diretamente para o aprimoramento do monitoramento, da instrumentação e da gestão de riscos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 13.028. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos*. Terceira Edição. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- BOWLES, J. E. (1997). *Foundation analysis and design*. 5. ed. New York: McGraw-Hill. 1143 p.
- CARNEIRO, A.; SALGUEIRO, C.; RODRIGUES, A.; PEDROSA, T; MATTOS, R.; LIMA, A. (2023). *Avaliação de segurança de barragens de mineração: critérios e premissas com base nas legislações vigentes e na literatura científica*. In: Comitê Brasileiro De Barragens. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu – PR, 28 e 29 de agosto de 2023. Anais, Tema 130.
- CARNEIRO, J. J. V.; MARQUES, E. A. G.; VIANA DA FONSECA, A. J. P.; FERRAZ, R. L.; OLIVEIRA, A. H. C. (2023). *Characterization of an Iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness*. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 41, p. 2833–2852. DOI: 10.1007/s10706-023-02430-8.
- CHEN, Q.; LIU, Z.; ZHANG, C.; DAI, Z.; WANG, X.; ZHANG, X. (2025) *Non-linear mechanical characteristics of tailings in large-scale high tailings dams*. *Frontiers in Earth Science*, v. 11, art. 1154791, 20 mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/feart.2023.1154791>>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- GODOY, N. S. (1983) *Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático*. Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- HATANAKA, M.; UCHIDA, A. (1996) Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sand soil. *Soils Found.*, v. 36, n. 4, p. 1-9.
- LEPS, T. M. (1970) Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil. Mechanics and Foundations Divisions, ASCE*, 4: pp. 1159-1170.
- MUROMACHI, T.; KOBAYASHI, S. (1982) *Comparative study of static and dynamic penetration tests currently in use in Japan*. *Proceedings of European Symposium on Penetration Testing (ESOPT-2)*, Amsterdam.
- PECK, R. B.; HANSON, W.E.; THORNBURN, T.H. (1974) *Soil exploration*. In: *Foundation Engineering Handbook*. Ed. H. B. Seed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1974. p. 25–98.
- SOTTILE, M. G.; LABANDA, N. A.; KERGUELÉN, A.; CUETO, I. A.; SFRISO, A. O. (2020) *Stability assessment of a tailings storage facility using a non-local constitutive model accounting for anisotropic strain-softening*. 16<sup>o</sup> International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics – IACMAG – Torino-Itália, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.03128>>. Acesso em: 04 jul. 2025.
- RODRÍGUEZ-PACHECO, R.; BUTLAŃSKA, J.; OLIVA-GONZÁLEZ, A. O. (2025) Geotechnical and hydrogeological zonation of tailings storage facilities: importance for design, construction, operation, and closure. *Minerals*, Basel, v. 15, n. 2, art. 105, 22 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-163X/15/2/105>>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- TEIXEIRA, F. M. (1996) *Projeto e execução de fundações*. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 1996. v.1. 283 p.