

Caracterização física e mecânica de estéreis do quadrilátero ferrífero - MG e sua influência no fator de segurança geotécnica em pilhas

Bruna Figueiredo Cezar

Engenheira Geotécnica, GEOCOBA, Rio de Janeiro, Brasil, bfc@geocoba.com

Luigi Nascimento Pelizzoli

Engenheiro Geotécnico, GEOCOBA, Belo Horizonte, Brasil, lnp@geocoba.com

Mirella Dalvi dos Santos

Engenheira Geotécnica, GEOCOBA, Belo Horizonte, Brasil, mds@geocoba.com

Gabriel do Nascimento Ribeiro

Engenheiro Geotécnico, GEOCOBA, Belo Horizonte, Brasil, gab@geocoba.com

Maria Stella Nogueira Borges

Engenheira Geotécnica, GEOCOBA, Rio de Janeiro, Brasil, msn@geocoba.com

RESUMO: A definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do estéril consiste em etapa essencial para a avaliação da estabilidade geotécnica de taludes de mineração, como em pilhas de disposição de estéril (PDEs). Esta definição costuma ser um grande desafio dado a heterogeneidade do estéril, compreendendo granulometria variável desde argilas à pedregulhos, que dificultam a coleta de amostras indeformadas de qualidade. Este trabalho consolida ensaios de caracterização física (granulometria completa, massa específica dos grãos, massa específica natural e limites de consistência) e ensaios triaxiais do tipo adensado hidrostaticamente drenados (CID) e não drenados (CIU), realizados em amostras indeformadas coletadas em PDEs localizadas no Quadrilátero Ferrífero (Qfe) em Minas Gerais, Brasil. O objetivo principal deste trabalho é de discutir a heterogeneidade do estéril na consistência de parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos, bem como debater acerca do impacto destes parâmetros nos fatores de segurança de pilhas de estéril. Para tal, são apresentadas análises de estabilidade com sensibilidade em análises 2D utilizando o Método de Equilíbrio Limite (MEL).

PALAVRAS-CHAVE: Estéril, resistência ao cisalhamento, estabilidade, fatores de segurança.

ABSTRACT: The definition of shear strength parameters of mine waste is an essential step for evaluating the geotechnical stability of mining slopes, such as in waste rock dumps (WRDs). This definition is often a significant challenge due to the heterogeneity of mine waste, which ranges in particle size from clays to boulders, making it difficult to collect high-quality undisturbed samples. This study consolidates physical characterization tests (including complete particle size distribution, specific gravity of grains, natural specific mass and Atterberg limits) and triaxial tests of both consolidated drained (CID) and consolidated undrained (CIU) types, performed on undisturbed samples collected from WRDs located in the Quadrilátero Ferrífero (Qfe) region in Minas Gerais, Brazil. The main objective of this work is to discuss the heterogeneity of mine waste in relation to the consistency of the obtained shear strength parameters, as well as to explore the impact of these parameters on the safety factors of waste rock dumps. To this end, stability analyses with sensitivity studies are presented using two-dimensional analyses based on the Limit Equilibrium Method (LEM).

KEYWORDS: Waste rock, shear strength, stability, safety factors

1 INTRODUÇÃO

Pilhas de estéril são estruturas geotécnicas de grande porte, formadas por volumes expressivos de solo e rocha provenientes das atividades de lavra. A estabilidade dessas estruturas é fundamental para garantir a segurança operacional, a preservação ambiental a longo prazo e a viabilidade econômica do empreendimento. Diferentemente dos taludes naturais, as pilhas de estéril são frequentemente construídas com geometrias curvilíneas, o que impõe desafios adicionais às análises de estabilidade, demandando a consideração dos efeitos tridimensionais (RASSAM e WILLIAMS, 1999). A estabilidade de uma pilha de estéril está diretamente ligada às propriedades dos materiais, mas também depende da forma como são dispostos. Mesmo materiais resistentes podem gerar pilhas instáveis se depositados de modo aleatório e sem critérios construtivos, resultando em zonas frágeis e riscos à segurança. Assim, a determinação dessas propriedades por meio de ensaios de campo e de laboratório, constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de projetos de engenharia geotécnica (SANTOS *et al.*, 2024).

Hawley & Cuning (2017) cita que a resistência ao cisalhamento de pilhas de estéril depende de diversos fatores, incluindo o tamanho máximo e a forma das partículas (angularidade e esfericidade), a distribuição granulométrica, o índice de vazios e a densidade *in situ*. A anisotropia induzida durante o empilhamento, a degradação progressiva das partículas intemperismo químico e físico, bem como a resistência intacta dos blocos de rocha também exercem influência significativa. Esses fatores combinados determinam a capacidade do material de resistir aos esforços cisalhantes ao longo do tempo, sendo a sua avaliação um desafio técnico, muitas vezes baseada em retroanálises e ensaios laboratoriais em frações mais finas do material.

O objetivo deste trabalho é discutir a heterogeneidade do estéril e sua influência nos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por ensaios triaxiais, bem como avaliar seu impacto nos fatores de segurança de pilhas de estéril. Busca-se, portanto, identificar um denominador comum para representar um material de comportamento notadamente heterogêneo, considerando que, sobretudo em pilhas antigas, não é possível distinguir ou zonar adequadamente as diferentes tipologias de estéril ao longo do maciço, uma vez que em muitas vezes não há o histórico construtivo completo da estrutura.

2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTÉRIL

2.1 Caracterização Física

O estéril considerado neste estudo é um material resultante do processo de detonação da cava após a extração do minério útil. Em minas a céu aberto, a lavra gera grandes volumes de material estéril, constituído por fragmentos de rocha e de solo de diferentes granulometrias e graus de alteração, que são transportados e depositados em pilhas. Historicamente, as pilhas de disposição de estéril (PDEs) não eram comumente projetadas com critérios de zoneamento interno, sendo o empilhamento realizado de forma contínua e sem distinção entre diferentes materiais (Hawley & Cuning, 2017). Esse processo resulta em maciços heterogêneos, de grande variabilidade espacial de propriedades geotécnicas.

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas de 5 amostras coletadas no Quadrilátero Ferrífero (Qfe) em Minas Gerais, Brasil, ensaiadas segundo a ABNT NBR 7181 (2025). O estéril analisado é proveniente de filitos e xistos, com granulometria que abrange desde argilas a pedregulhos, indicando um material heterogêneo. Estes são classificados como: (1) e (2) silte areno-argiloso, (3) silte argilo-arenoso com pedregulhos, (4) e (5) areia silto-argilosa com pedregulhos, conforme a classificação da ABNT NBR 6502 (2022) e ilustrado na Figura 1. A distribuição das amostras 1 e 2 apresenta uniformidade na fração areia média e ausência de partículas na fração areia fina. Já a amostra 3 possui grãos mais finos, acumulando material na parcela de silte, enquanto as amostras 4 e 5 apresenta má graduação, com trecho da areia fina levemente uniforme. Esses resultados representam o primeiro indício de heterogeneidade do estéril estudado.

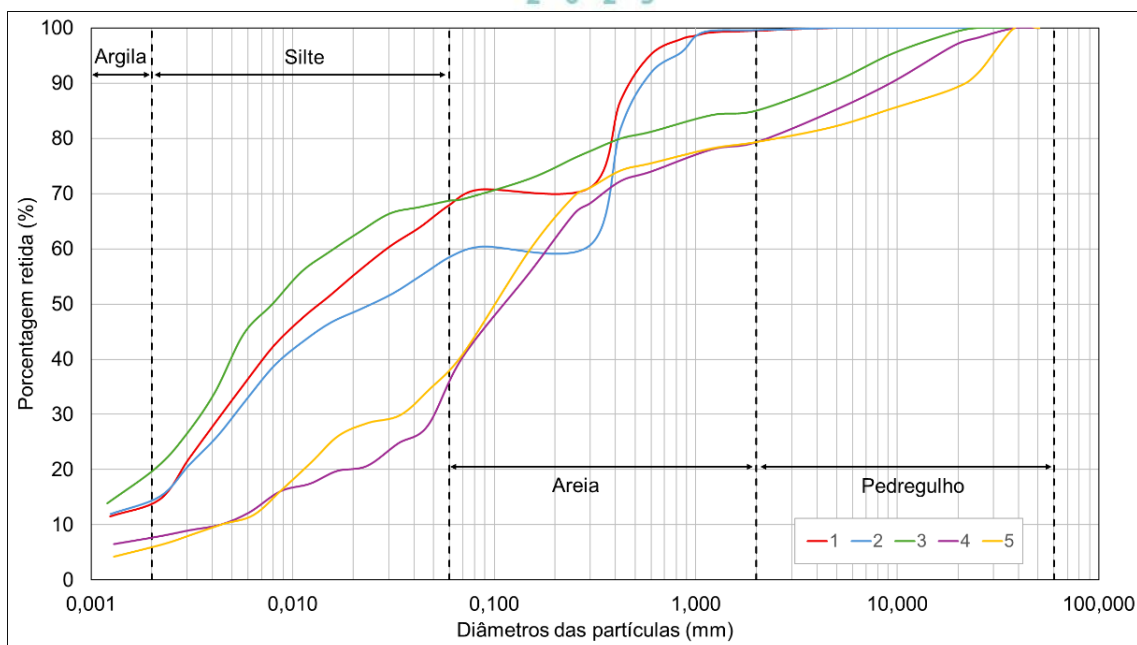
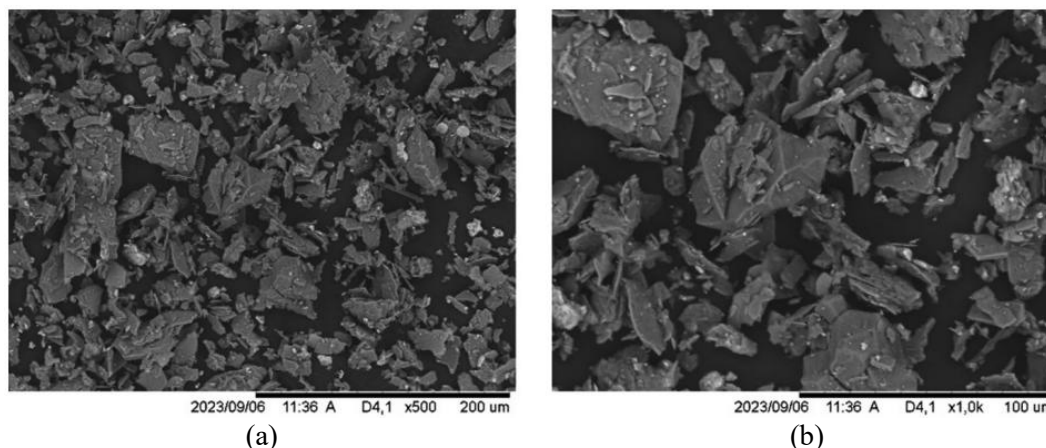


Figura 1. Curvas granulométricas dos estéreis coletados no Qfe.

Para as amostras estudadas foram realizados ensaios de limite de liquidez - ABNT NBR 7180 (2016) e de plasticidade - ABNT NBR 6459 (2016), em que todas apresentaram comportamento Não Plástico (NP). A massa específica dos grãos foi determinada com base na ABNT NBR 6458 (2025) e variou de $2,71 \text{ g/cm}^3$ a $3,00 \text{ g/cm}^3$, apresentando um valor médio de $2,84 \text{ g/cm}^3$ e um desvio padrão de $0,13 \text{ g/cm}^3$, já a massa específica natural obtida variou de $1,62 \text{ g/cm}^3$ a $2,19 \text{ g/cm}^3$, com valor médio de $1,83 \text{ g/cm}^3$ e desvio padrão de $0,16 \text{ g/cm}^3$. Assim como obtido para os ensaios de granulometria, observa-se uma grande variabilidade dos parâmetros físicos do material.

Ensaios de morfologia via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do estéril de mesma origem foram realizados por Cezar *et al.* (2025), em que foi notada a predominância de grãos com formato lamelar/angular (Figura 2). Neste contexto, conforme Biarez e Hicher (1994), sob condições de baixas a médias tensões de confinamento partículas angulares tendem a proporcionar maior intertravamento, conferindo maior resistência ao maciço de solo. Já sob pressões de confinamento elevadas, a importância da angularidade pode diminuir em razão da quebra e reorganização das partículas. Neste contexto, o item subsequente se dedica à avaliação da resistência mecânica do estéril do Qfe.

Figura 2. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no estéril do Qfe com aproximação de (a) 500x e (b) 1000x. Fonte: Cezar *et al.* (2025).

2.2 Caracterização Mecânica

A avaliação da resistência ao cisalhamento do estéril do Qfe foi realizada por meio de ensaios triaxiais adensados hidrostaticamente, cisalhados de forma drenada (CID) e não drenada (CIU), sob tensões confinantes de 400, 800 e 1600 kPa para os ensaios CIU e 100, 200, 300 e 600 kPa para os ensaios CID.

Os resultados dos ensaios triaxiais do tipo CIU e CID são ilustrados nas Figura 3 e Figura 4, respectivamente. Em relação aos ensaios não drenados, observa-se que as amostras 1 e 2 apresentam comportamento contrátil, sem pico de resistência. Este resultado pode ser relacionado à faixa granulométrica aberta na fração de areia fina e à lamelaridade dos grãos, que na ruptura se arranjam em forma de placas paralelas deslizando entre elas. A amostra 1, por apresentar estado inicial mais fofo, desenvolve maiores excessos de poropressões e rompe sob menor tensão desviadora. Já a amostra 2, mais densa, desenvolve menores excessos de poropressões, provavelmente em razão do rearranjo das partículas durante o aumento da tensão desviadora, embora esse rearranjo não seja suficiente para classificá-la como dilatante. Compreende-se que, por estar mais denso, o material tende a dilatar ao romper, com as partículas se rearranjando para ocupar o espaço da fração de areia fina ausente, porém, essa dilatação não é suficiente a ponto de gerar excessos de poropressões negativos e superar a tensão confinante aplicada (σ_3).

Para os ensaios drenados (amostras 3, 4 e 5), assim como para os ensaios não drenados, o índice de vazios inicial da amostra foi um fator preponderante no comportamento do estéril, obviamente. A amostra 3 é a que possui maior quantidade de finos dentre as analisadas e também maiores índices de vazios. Seu comportamento é notadamente contrátil, com a diferença entre vazios iniciais e finais mais expressiva. Esta amostra apresentou pico de resistência pouco pronunciado em maiores deformações dos corpos de prova, indicando um rearranjo inicial da parcela silte, e logo após uma possível ruptura do embricamento dos grãos da parcela areia. Tal comportamento fica mais claro nas amostras ensaiadas com maiores tensões confinantes, 300 e 600 kPa, corroborando com tal análise devido ao comportamento típico das areais de apresentar maior resistência quanto maior o σ_3 aplicado.

As amostras 4 e 5 apresentam granulometrias muito próximas, porém comportamentos distintos ao cisalhamento. A amostra 5 é a que apresentou o menor índice de vazios inicial e é a única que apresentou um comportamento dilatante, com pico de resistência pronunciado no gráfico tensão x deformação. Tal comportamento indica que a parcela de solo dominante na ruptura de fato é a areia, e que devido ao espaço encontrado pela falta da parcela de areia fina na ruptura, ocorre a perda abrupta de resistência do material para todas as tensões confinantes ensaiadas. Nesta amostra a lamelaridade dos grãos teve menor influência na ruptura que nas demais.

Já a amostra 4 apresentou uma diferença de vazios inicial e final (Δe) negativa, ou seja, contraiu ao final do cisalhamento. A não apresentação de pico juntamente com a redução de volume indicam que a forma lamelar dos grãos foi predominante para ditar o comportamento ao cisalhamento dos corpos de prova. Não obstante, a granulometria ser semelhante à amostra 5 não significou comportamentos ao cisalhamento parecidos, já que os ensaios de cisalhamento partiram de índice de vazios distintos. Além disso, independentemente de a amostra 4 apresentar-se contrátil e a 5 dilatante, seus Δe são baixos, típico de materiais arenosos.

Os parâmetros de resistência que descrevem a envoltória são: intercepto coesivo (c') de 5 kPa e ângulo de atrito efetivo (ϕ') de 28°. Observa-se que apesar da heterogeneidade das amostras de estéril ensaiadas em relação à granulometria, os parâmetros obtidos neste caso tendem a uma envoltória de ruptura próxima (linha tracejada). É importante ressaltar que atualmente, como descrito em Hawley & Cuning (2017), a faixa de tensões atuantes em pilhas de estéril pode variar bastante, de pilhas menores, com alturas iguais ou inferiores a 50 m a pilhas muito altas, com 200 m de altura, sendo cada vez mais comum atingirem 300 m ou mais.

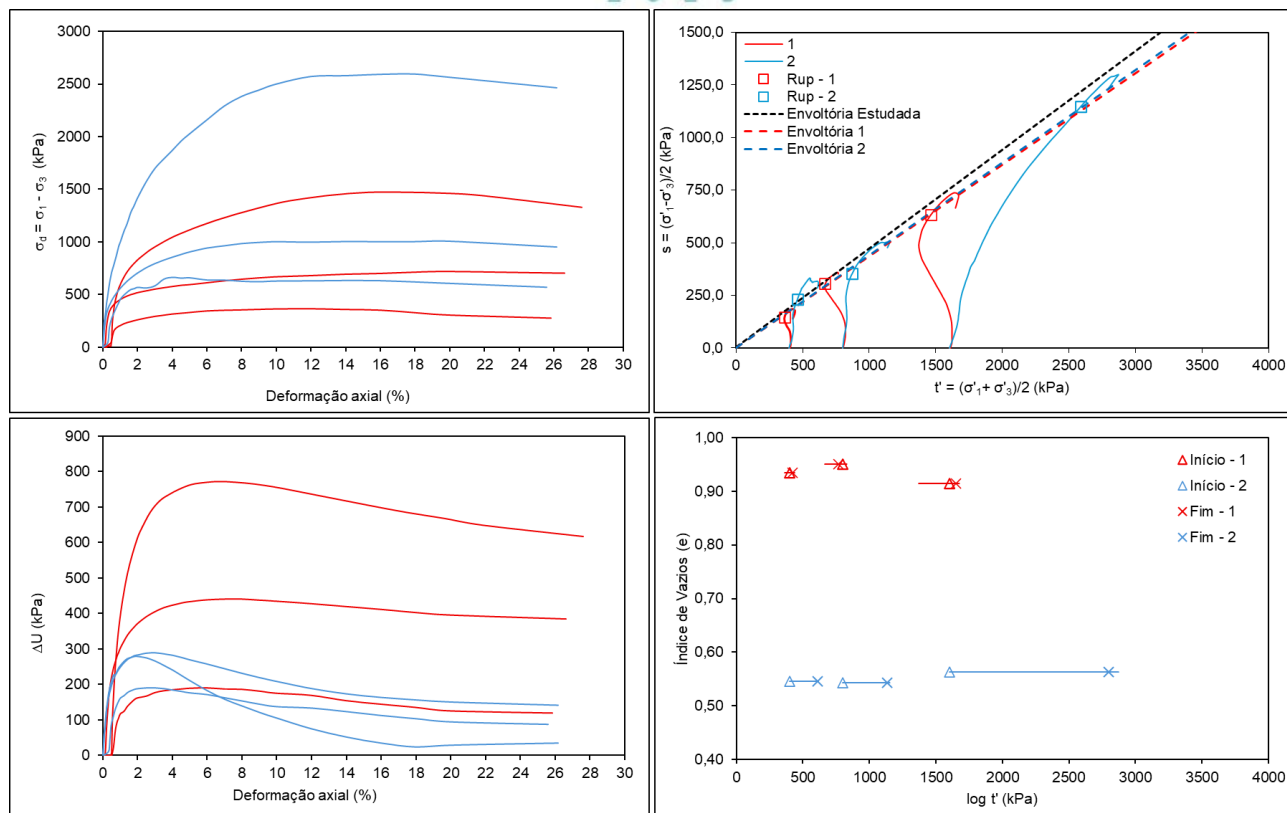


Figura 3. Resultado dos ensaios triaxiais do tipo CIU.

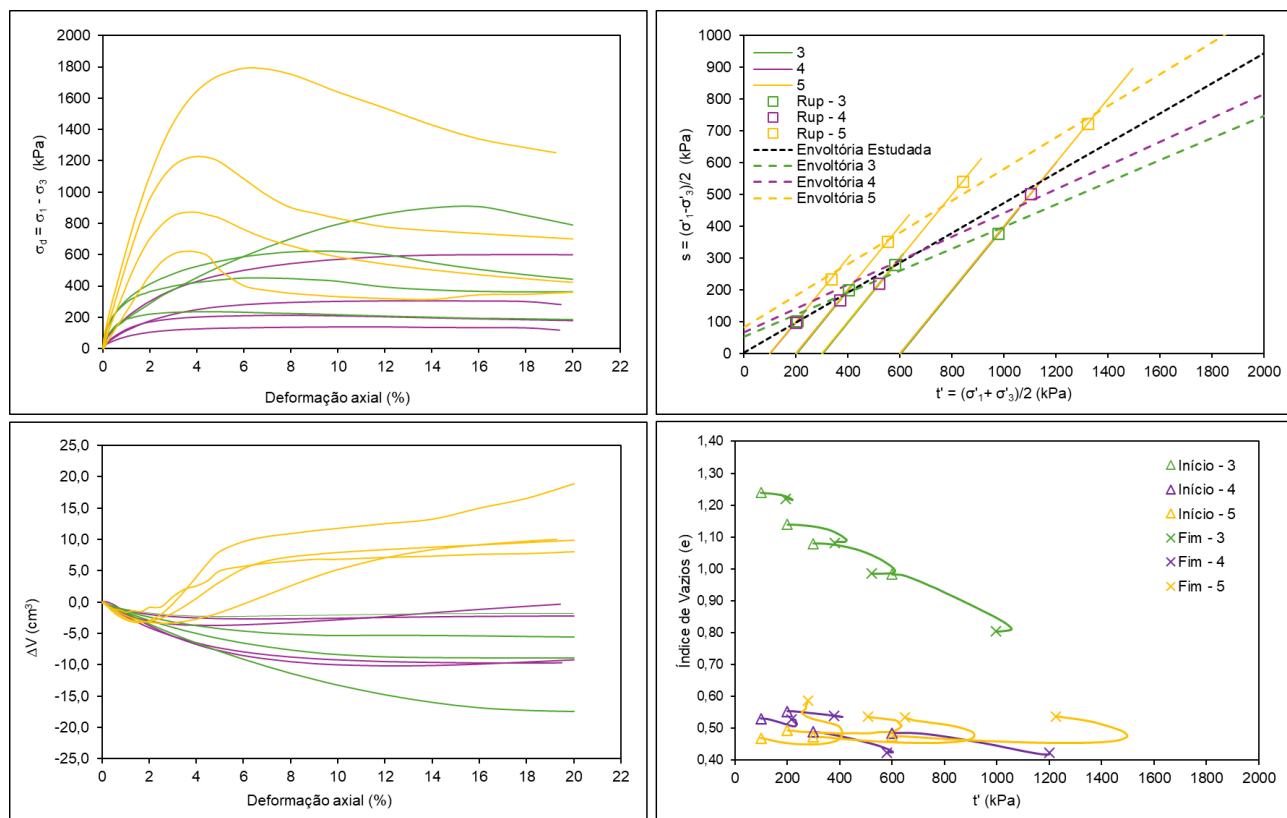


Figura 4. Resultado dos ensaios triaxiais do tipo CID.

3 AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE PDE

Comumente os projetos de pilhas de estéréis são concebidos considerando uma geometria padrão, com taludes de inclinação de 1V:2H ($\approx 26,6^\circ$) e 10m de altura máxima, com bermas intermediárias de 10m de largura. Tendo em vista que o estéril é um material heterogêneo, os parâmetros de resistência podem ser variáveis, dependendo principalmente da região de coleta, método de lavra, método de disposição, entre outros. Logo, este item investiga se a variação racional nos parâmetros de resistência do estéril afeta significativamente a estabilidade geotécnica dos maciços.

Para tal, a estabilidade geotécnica foi avaliada por meio do Método de Equilíbrio Limite de GLE/Morgenstern-Price no *software* Slide 2, versão 6.0 da Rocscience, considerando uma seção geotécnica com a geometria padrão supracitada e uma PDE de 100m de altura (10 bancadas) – Figura 5. Como a intenção era realizar uma análise paramétrica do fator de segurança (FS) x parâmetros de resistência, a geologia da fundação da pilha não foi incluída ou avaliada neste estudo, assim como a posição do lençol freático.

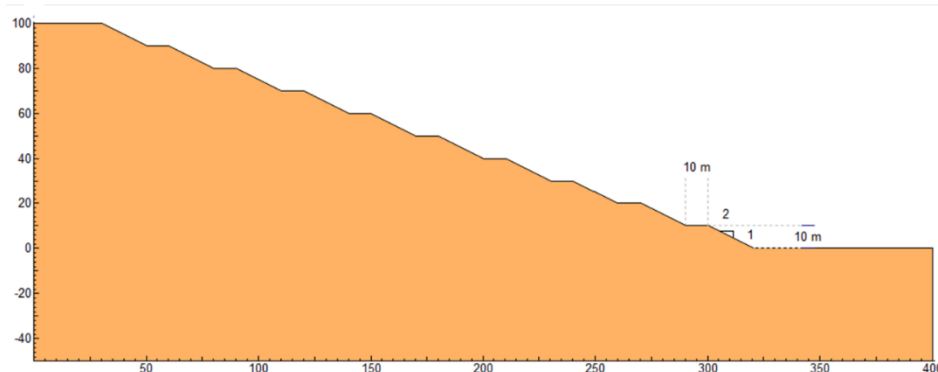


Figura 5. Seção típica da pilha de estéril avaliada.

Os parâmetros de resistência adotados nas análises são aqueles discutidos no item anterior ($c' = 5$ kPa e $\phi' = 28^\circ$), considerando a variação de 0 a 15 kPa para o c' , e de 23 a 33° para o ϕ' . Ressalta-se que análises de sensibilidade realizadas no Slide variam um único parâmetro por vez. Ou seja, quando o c' é variável, o ϕ' é fixado em 28°, e quando o ϕ' é variável, o c' é fixado em 5 kPa. O peso específico adotado foi de 18 kN/m³, as análises realizadas neste artigo não consideraram a variação deste parâmetro.

Para que o FS seja considerado satisfatório, este deve ser igual ou superior a 1,50, conforme preconizado na ABNT NBR 13029 (2024), seja este para potenciais superfícies de ruptura locais (entre bermas) ou globais na PDE. Para evitar a avaliação de superfícies não representativas, foram consideradas apenas aquelas com profundidades superiores a 15,0m para análises globais e 5m para análises locais (entre bermas). A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para a análise de sensibilidade realizada.

A linha tracejada em vermelho apresenta a variação de c' entre 0 e 15 kPa para a análise global, em que se percebe que o FS é satisfatório para todo intervalo estudado. Já a linha tracejada em preto apresenta, para a mesma variação de c' para a análise local, que o FS é satisfatório a partir do valor do intercepto de coesão de 4,4 kPa. A linha cheia em vermelho apresenta a variação de ϕ' entre 23 e 33° para superfície de ruptura global, em que se percebe que o FS é satisfatório a partir de 25,1°. Para a superfície local, a linha cheia em preto evidencia que o FS é satisfatório a partir de 27,4°. A envoltória de resistência ao cisalhamento ($c' = 5$ kPa e $\phi' = 28^\circ$) adotada neste estudo atende aos fatores de segurança estabelecidos pela norma vigente, mesmo com as análises de sensibilidade realizadas para os parâmetros geotécnicos de resistência. Isto não será verdade no caso para c' inferior a 4,4 kPa e ϕ' inferior a 25,1°. O primeiro caso pode indicar materiais pouco compactados (ex.: pilhas executadas em ponta de aterro) e o segundo pode indicar materiais com alta fração argilosa.

Verifica-se, então, que a variação do ângulo de atrito efetivo exerce influência semelhante tanto na análise local quanto na global. Por outro lado, o intercepto coesivo apresenta menor influência que o ângulo de atrito no fator de segurança da análise global, enquanto na análise local sua influência é maior em FS quando comparado ao atrito.

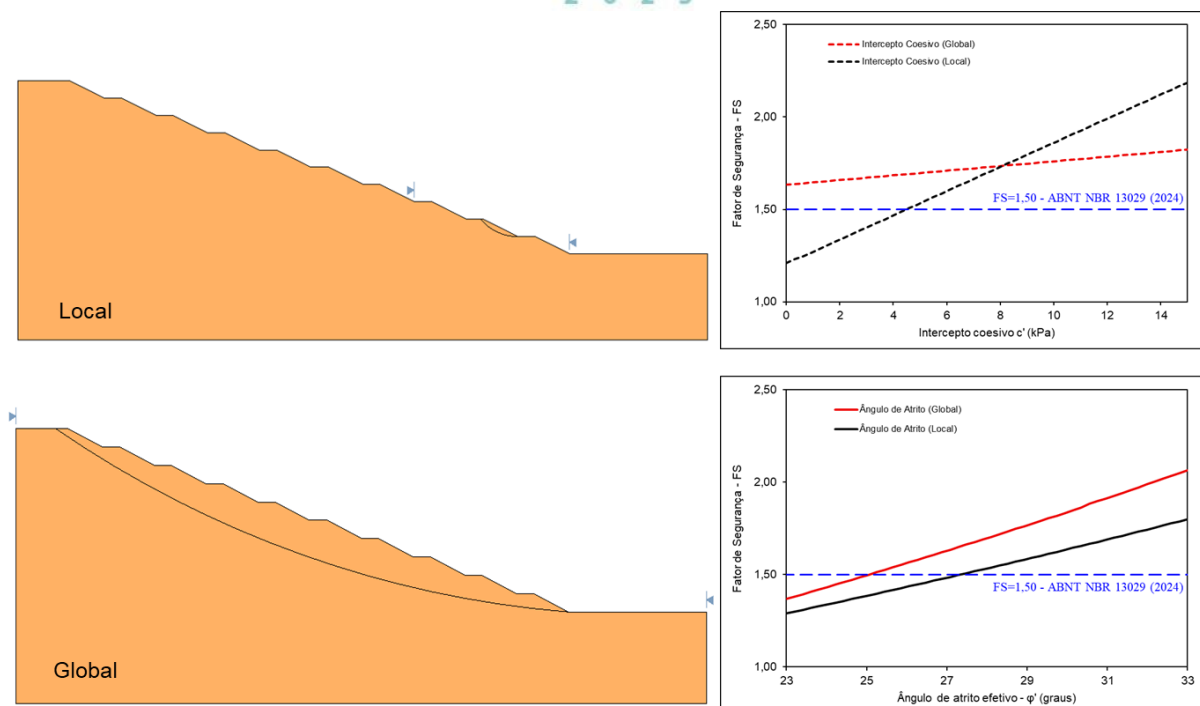


Figura 6. Análise de sensibilidade – Análise local e global.

Sabe-se que, em Pilhas de Estéril (PDEs), o intercepto de coesão é um parâmetro cujo valor real de campo é difícil de determinar, sendo geralmente considerado muito baixo ou até nulo para estéréis, já que ao toque percebe-se que o material não apresenta cimentação. O valor obtido de c' ensaios triaxiais não possui significado físico, sendo apenas um valor que traduz a envoltória de resistência por regressão linear, válido para o intervalo de tensões ensaiado. Complementarmente, a parcela de coesão aparente poderia superestimar a performance do talude analisado, já que esta é influenciada por diversos fatores, sendo o mais comum as intempéries (ciclos de umedecimento e secagem, conforme a granulometria do material e de acordo com períodos secos ou chuvosos). Outros fatores são notadamente importantes, como a história de tensões (maneira como o material foi disposto na pilha, sobrecarga, vibrações de maquinários pesados, detonações próximas da cava de extração), influência de raízes e, no caso de estruturas mais antigas, pequenos níveis de cimentação em certas regiões da pilha. Por este motivo, a coesão aparente não é comumente adotada nas análises de estabilidade.

Ressalta-se que os resultados aqui apresentados não excluem a necessidade de investigação e caracterização geotécnica local de uma pilha, mas corroboram que mesmo que o material apresente elevada heterogeneidade, a simplificação do maciço em termos de c' e ϕ' para dada faixa de tensões confinantes pode ser realizada para obtenção do FS e avaliação de sua estabilidade. Neste sentido, os autores indicam que esta simplificação seja realizada de forma conservadora como, por exemplo, obtendo os parâmetros geoécnicos de resistência para uma deformação limite e aceitável para a condição operacional da pilha. Da experiência dos autores, este valor pode ser adotado em 8%.

4 CONCLUSÃO

A estabilidade de pilhas de estéril representa um desafio geotécnico, condicionado por uma série de fatores interdependentes. A compreensão aprofundada das propriedades dos materiais, aliada a uma caracterização precisa por meio de ensaios de campo e laboratório, bem como à aplicação de métodos de análise adequados, como o equilíbrio limite e simulações numéricas, é essencial para garantir a segurança e o desempenho dessas estruturas ao longo do tempo. Buscando uma adequada segurança, estratégias de remediação, geralmente baseadas no reconfiguramento dos taludes e na otimização dos parâmetros geométricos, são fundamentais para mitigar situações de instabilidade.

Os ensaios triaxiais realizados demonstraram a forte influência do índice de vazios inicial (típico para materiais arenosos) no comportamento mecânico do estéril, determinando se o material se comporta de forma

contrátil ou dilatante na ruptura. Mesmo amostras com granulometrias semelhantes apresentaram comportamentos distintos, evidenciando a importância do arranjo e morfologia dos grãos (como a lamelaridade) no mecanismo de ruptura.

Em projetos e estudos envolvendo estéril heterogêneo, pode-se adotar uma envoltória única representativa para o maciço, de modo a refletir a natureza real da estrutura, já que as análises paramétricas realizadas neste artigo indicaram que o fator de segurança é satisfatório para faixas de c' e ϕ' . Isto não ocorreu no caso para c' inferior a 4,4 kPa e ϕ' inferior a 25,1°. Enquanto o primeiro caso pode indicar materiais pouco compactados (ex.: pilhas executadas em ponta de aterro) e o segundo pode indicar materiais com alta fração argilosa. Os resultados aqui apresentados não excluem a necessidade de investigação e caracterização geotécnica local de uma pilha. Ainda, a simplificação de maciços heterogêneos em uma envoltória única deve ser realizada de forma conservadora como, por exemplo, obtendo os parâmetros geotécnicos de resistência para uma deformação limite e aceitável para a condição operacional da pilha. Da experiência dos autores, este valor pode ser adotado em 8%.

Sabe-se que é comum encontrar matacões no maciço de PDEs, porém neste trabalho apenas foi avaliado a parcela de solo de proporções menores, os quais possibilitam amostragem e realização de ensaios triaxiais. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se: (a) avaliar o efeito de escala tanto da retirada de amostras quanto nos parâmetros de resistência de estéréis; (b) acrescentar a influência da posição e variação do nível d'água na estabilidade geotécnica; (c) avaliar uma maior quantidade de amostras, para possível confirmação do comportamento heterogêneo dos estéréis associados a uma envoltória de resistência resultante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Geocoba pelo espaço de aprendizado no dia a dia da profissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo — Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6502. *Solos e rochas - Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 13029. *Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6458. *Solos — Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo — Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Biarez J.; Hicher P-Y. (1994) *Elementary Mechanics of Soil Behaviour: Saturated Remoulded Soils*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Cezar, B. F.; Magalhães, M. S.; Pimenta, A. R. (2025) *Application of Iron Mine Waste Rock as an Innovative Cement Replacement Material in Mortar*. The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment, Lecture Notes in Civil Engineering, 237, p.219-229.
- Hawley, M.; Cunning, J. (2017) *Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design*. CSIRO CRC Press.
- Rassam, D. W.; Williams, D. J. (1999) Dimensional effects on slope stability of high waste rock dumps. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13, p.19-24.
- Santos, C. H. R.; Moreira, T. B. G.; Reis, C. J. (2024) Aplicação de Métodos Estatísticos para Definição de Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento a Partir de Ensaios Triaxiais. *XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú.