

## Análise de sensibilidade da projeção de ruptura hipotética em pilhas de estéril com base em equações empíricas

Alison de Souza Norberto

Engenheiro Geotécnico, TPF Engenharia, Caruaru-PE, Brasil, [alison.norberto@tpfe.com.br](mailto:alison.norberto@tpfe.com.br)

Matheus Lima de Barros

Coordenador BIM, TPF Engenharia, Brasília-DF, Brasil, [matheus.barros@tpfe.com.br](mailto:matheus.barros@tpfe.com.br)

Nathani Zampirolli

Engenheira Geotécnica, TPF Engenharia, Macaé-RJ, Brasil, [nathani.zampirolli@tpfe.com.br](mailto:nathani.zampirolli@tpfe.com.br)

Fernanda Maciel Gavioli

Engenheira Geotécnica, São Paulo-SP, Brasil, [fernandamgavioli@gmail.com](mailto:fernandamgavioli@gmail.com)

**RESUMO:** O presente artigo apresenta uma análise de sensibilidade da projeção de ruptura hipotética em pilhas de estéril, utilizando modelagens computacionais e métodos empíricos reconhecidos na literatura. O estudo foi motivado pela crescente adoção de pilhas como alternativa às barragens de rejeitos, e pela necessidade de compreensão aprofundada dos riscos associados à sua estabilidade e extensão de danos por eventuais rupturas. A metodologia incluiu a variação da geometria global da pilha hipotética (ângulos entre 10° e 26°), com altura fixa de 200 m, sem bermas ou bancos operacionais, e parâmetros geotécnicos representativos do material estéril típicos encontrados na literatura. Foram realizadas análises de estabilidade por meio do método do equilíbrio limite (MEL), com aplicação do método de Spencer no *software* Slide2, sob condição de lençol freático fixo e paralelo e no topo do terreno assumidamente plano. Determinou-se o ângulo de atrito efetivo crítico para cada geometria, e foram obtidas as superfícies críticas de ruptura correspondentes. Com base na geometria das cunhas mobilizadas, aplicaram-se as equações empíricas propostas por Corominas (1996) para estimar o alcance da ruptura hipotética nos modos de ruptura translacional e escorregamento de terra. Os volumes mobilizados foram estimados com base na formulação elipsoidal de Blight (2010), considerando as limitações inerentes às análises bidimensionais. Os resultados indicaram que o aumento do ângulo da pilha reduz o volume de material mobilizado e, consequentemente, a projeção da ruptura, sendo observadas correlações consistentes com os dados históricos de escorregamentos da literatura. A abordagem combinada proposta neste estudo contribui para a compreensão integrada da estabilidade e da projeção da ruptura hipotética em pilhas de estéril, fornecendo subsídios técnicos relevantes para o planejamento de segurança em empreendimentos de mineração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de taludes; Método do equilíbrio limite; Projeção de escorregamentos; Mineração; Risco; Estudo de ruptura hipotética de pilhas.

**ABSTRACT:** This paper presents a sensitivity analysis of hypothetical failure projection in waste rock dumps, using computational modeling and empirical methods recognized in the literature. The study was motivated by the increasing adoption of waste dumps as an alternative to tailings dams, and by the need for a deeper understanding of the risks associated with their stability and extent of damage due to possible ruptures. The methodology involved varying the overall slope hypothetical geometry (angles between 10° and 26°), with a fixed height of 200 m, no berms or operational benches, and using typical geotechnical parameters representative of waste rock materials found in the literature. Stability analyses were performed using the limit equilibrium method (LEM), applying Spencer's method in the Slide2 software, under conditions of a fixed and parallel water table and on top of the assumedly flat terrain. The critical friction angle was determined for each geometry, and the corresponding critical failure surfaces were obtained. Based on the geometry of the mobilized wedges, empirical equations proposed by Corominas (1996) were applied to estimate the extent of the hypothetical failure in translational and earth slide modes. Mobilized volumes were estimated using the ellipsoidal formulation by Blight (2010), considering the limitations

inherent in two-dimensional analyses. The results showed that increasing the dump slope angle reduces the volume of mobilized material and, consequently, the failure projection, with consistent correlations observed with historical landslide data from literature. The combined approach proposed in this study contributes to an integrated understanding of stability and hypothetical failure projection in waste rock dumps, providing relevant technical support for safety planning in mining operations.

**KEYWORDS:** Slope stability; Limit equilibrium method; Landslide projection; Mining; Risk; Stack Break.

## 1 INTRODUÇÃO

A disposição de resíduos sólidos provenientes da mineração em pilhas de estéril e rejeito tem sido amplamente adotada como alternativa às barragens de rejeitos, especialmente em função das restrições legais e dos impactos ambientais e sociais associados a rupturas de estruturas convencionais (Vick, 2002; Rico *et al.*, 2008). Essa preferência tem sido reforçada por diretrizes regulatórias mais rigorosas e pela necessidade de reduzir o risco associado a estruturas hidráulicas convencionais. Estudos recentes destacam que a adoção de pilhas de estéril pode representar uma solução mais viável sob os pontos de vista técnico e econômico, desde que haja um controle adequado de estabilidade e de processos erosivos (Jiang *et al.*, 2023).

Embora as pilhas sejam, em geral, consideradas estruturas mais simples do que barragens, eventos recentes de instabilidade demonstram que tais disposições também estão sujeitas a riscos, especialmente quando construídas em regiões com alta pluviometria ou geologia desfavorável. Casos documentados em minas da Ásia e América Latina entre 2020 e 2023 evidenciaram o papel crítico da gestão da drenagem superficial e interna, bem como a influência de ciclos alternados de umedecimento e secagem no enfraquecimento progressivo dos materiais (Gong *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

A estabilidade de taludes de pilhas de estéril é influenciada por diversos fatores, incluindo as propriedades geotécnicas dos materiais, as condições de drenagem, a geometria da pilha e a evolução construtiva (Duncan & Wright, 2005). Modelos computacionais baseados no método do equilíbrio limite (MEL) continuam sendo amplamente utilizados para a identificação de superfícies críticas de ruptura e para a avaliação do fator de segurança (Abramson *et al.*, 2002). Contudo, estudos recentes têm combinado MEL com análises probabilísticas e modelos de elementos finitos para aprimorar a robustez das previsões (Liu *et al.*, 2023).

Além da análise de estabilidade propriamente dita, há crescente interesse na estimativa do alcance de materiais mobilizados em casos de ruptura, pois tal informação é crucial para o planejamento de zonas de autossalvamento e para a gestão de riscos em mineração (Hungri *et al.*, 2005). Equações empíricas, como as propostas por Corominas (1996), continuam sendo empregadas para estimativas iniciais de alcance de escorregamentos, mas sua aplicação tem sido modernizada por meio de calibração com dados de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina (Chen *et al.*, 2023).

É importante salientar que, no contexto brasileiro, ainda não existem diretrizes normativas consolidadas ou guias técnicos amplamente reconhecidos para a realização de estudos de ruptura hipotética em projetos de engenharia. Diante dessa lacuna, trabalhos que se dedicam à investigação do tema assumem papel fundamental, pois contribuem para o aprimoramento do entendimento dos mecanismos envolvidos e oferecem subsídios técnicos que podem orientar o desenvolvimento de metodologias mais robustas e coerentes com a realidade dos empreendimentos.

Este trabalho teve como objetivo integrar a análise de estabilidade de pilhas de estéril com a projeção de ruptura hipotética, utilizando o método do equilíbrio limite, seguido por equações empíricas de projeção de massa rompida. Busca-se, assim, contribuir para o aprimoramento das ferramentas de análise e previsão de eventos críticos em áreas de disposição de resíduos sólidos da mineração, com enfoque na segurança e sustentabilidade operacional.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em cinco etapas principais: definição da geometria da pilha, seleção dos parâmetros de resistência, modelagem computacional por método do equilíbrio limite (MEL), aplicação de equações empíricas para estimativa do alcance da ruptura e cálculo do volume de massa projetada. A seguir, cada etapa é detalhada.

## 2.1 Geometria da pilha

A geometria hipotética adotada considera uma pilha de estéril com altura fixa de 200 metros, assentada sobre um terreno de fundação horizontal (inclinação  $0^\circ$ ). Foram analisadas diferentes configurações de inclinação global da pilha, variando os ângulos em:  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $16^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $24^\circ$  e  $26^\circ$ , conforme Figura 1. Para efeito das análises, não foram consideradas bermas ou bancos intermediários operacionais, buscando compreender de forma isolada o comportamento da pilha em relação ao seu ângulo global. Foi considerado ainda, terreno a jusante horizontal e pouco acidentado.

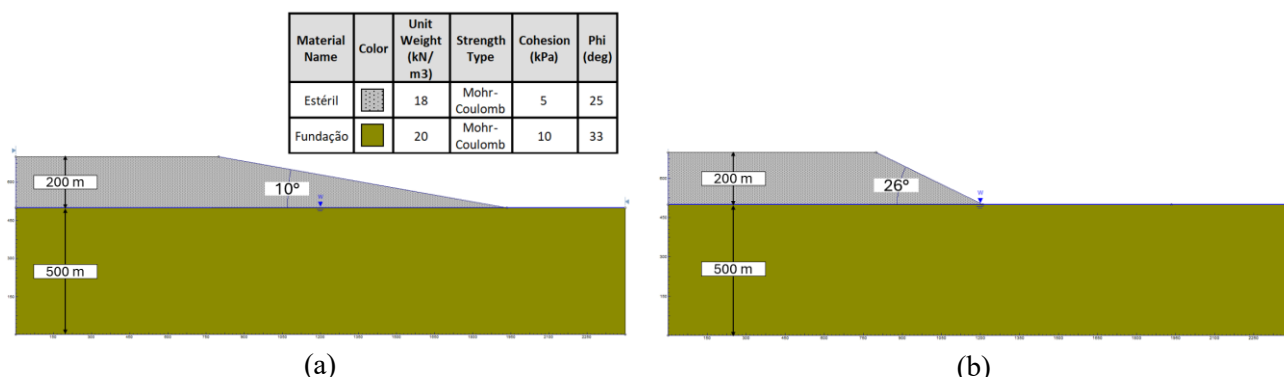


Figura 1. Seções de análise da variação do ângulo global da pilha: (a)  $10^\circ$ ; e (b)  $26^\circ$ .

## 2.2 Parâmetros de resistência

Os parâmetros geotécnicos do estéril adotados foram definidos com base em valores médios típicos encontrados na literatura, sendo o peso específico igual a  $18 \text{ kN/m}^3$ , intercepto de coesão fixada em  $5 \text{ kPa}$ , e ângulo de atrito efetivo igual a  $25^\circ$  (Duncan, 1996; Coduto, 2001; Bell, 2007). Para a realização das análises de sensibilidade, utilizou-se a técnica de redução progressiva da resistência ao cisalhamento (*Strength Reduction Factor*, SRF), para este estudo foi adotada um intercepto de coesão constante e apenas o ângulo de atrito efetivo sendo reduzido até que o fator de segurança (FS) global atingisse 1,0, definindo assim o ângulo de atrito efetivo crítico para cada configuração de geometria da pilha. O terreno de fundação foi modelado como homogêneo, com altos valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento, conforme apresentado na Figura 1a, de forma a garantir que a ruptura fosse limitada apenas ao material estéril. A abordagem simula um cenário plausível de ruptura para casos de ruptura de pilha de estéril, em que o material depositado assume parâmetros geotécnicos inferiores àqueles indicados nos ensaios devido a eventual ausência do controle tecnológico na compactação durante o empilhamento ou degradação de partículas (fragmentação) devidas às cargas prolongadas ou variações de pressão ao longo do tempo, ou mesmo, movimentos de massa ou recalques diferenciais que podem gerar zonas de baixa resistência que realçam para a elevação do ângulo de atrito efetivo em certas regiões do empilhamento.

## 2.3 Modelagem Computacional

As análises de estabilidade foram realizadas por meio do *software* Slide2, desenvolvido pela Rocscience, adotando o método de Spencer, um método completo do MEL, que atende simultaneamente às condições de equilíbrio de forças horizontais, forças verticais e momentos atuantes nas fatias em que a massa potencial de ruptura é dividida, considerando a geometria formada pelo topo da pilha, a superfície do terreno a jusante (quando aplicável) e a superfície de ruptura. Em todas as simulações, considerou-se uma superfície freática fixa, horizontal, coincidente com o nível do terreno (topo da fundação), representando um cenário de plena eficiência do sistema de drenagem interna da pilha. Para cada inclinação global, foi realizada a determinação do ângulo de atrito efetivo crítico que resultasse em  $FS \approx 1,0$ . A partir desses dados, foram realizadas novas simulações com os ângulos de atrito efetivos críticos definidos, permitindo a obtenção das superfícies de ruptura e respectivas cunhas mobilizadas, cuja geometria foi utilizada nas etapas seguintes.

## 2.4 Projeção de Ruptura Hipotética com Métodos Empíricos

Com base na geometria das superfícies de ruptura obtidas, aplicou-se o modelo empírico proposto por Corominas (1996), visando estimar o alcance da ruptura hipotética. O referido autor propôs equações específicas para a estimativa da relação  $H/L$  (altura sobre comprimento do deslocamento da massa) (Figura 2), volume mobilizado de material ( $V$ ), categorizando os escorregamentos em quatro tipos de movimento, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Movimentos de massa e fórmulas associadas.

Tipo de movimento de massa	Formulação associada
Ruptura translacional	$\log(H/L) = -0,068 \log(V) - 0,159$
Escorregamento de terra	$\log(H/L) = -0,070 \log(V) - 0,214$
Quedas de blocos	$\log(H/L) = -0,109 \log(V) + 0,210$
Fluxo de detritos	$\log(H/L) = -0,105 \log(V) - 0,012$

Fonte: Adaptado de Corominas, 1996.

No presente trabalho, considerando as características do material estéril e os mecanismos de mobilização identificados, foram aplicadas as equações referentes às rupturas translacionais e escorregamentos de terra, por refletirem de forma mais fiel o comportamento típico de ruptura em pilhas de estéril sob condições drenadas. Ressalta-se, contudo, que tais equações foram originalmente calibradas a partir de casos históricos de escorregamentos em solos naturais. Assim, sua aplicação a pilhas de estéril deve ser vista com cautela, uma vez que diferenças nos mecanismos de deformação, na granulometria e na estrutura interna desses depósitos podem influenciar significativamente o comportamento da massa mobilizada.

## 2.5 Cálculo do Volume Mobilizado

As análises bidimensionais (2D) exigiram a estimativa do volume tridimensional (3D) da massa mobilizada, para a qual foi adotada a metodologia de Blight (2010). Essa abordagem estabelece uma relação geométrica para o cálculo da área de uma elipse, conforme ilustrado na Figura 3. A elipse, representada na parte inferior da figura, corresponde à projeção horizontal da massa mobilizada — ou seja, à planta da superfície de ruptura. O eixo maior “a” corresponde à metade do comprimento da seção longitudinal, representando a cunha de ruptura identificada nas análises 2D realizadas no software Slide2. O eixo menor “b” é calculado conforme a Equação 1 a seguir. Com a geometria definida, o volume da cunha é estimado com o auxílio do Autodesk Civil 3D.

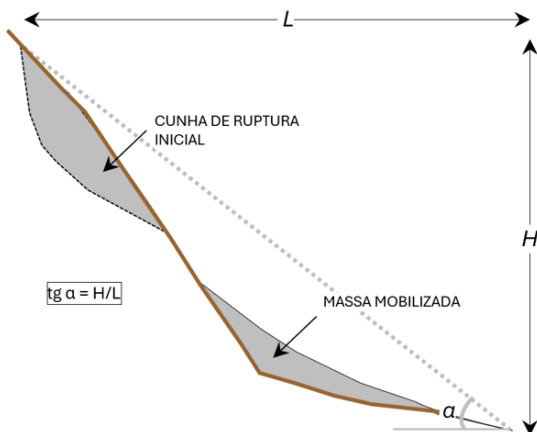


Figura 2. Seção típica de talude rompido e indicação do alcance da massa mobilizada ( $L$ ) e respectiva altura ( $H$ ).

Fonte: Adaptado de Corominas, 1996.

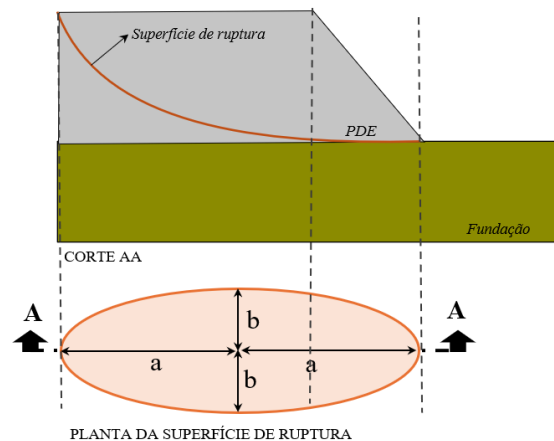


Figura 3. Exemplo de cálculo dos raios de uma elipse.

Fonte: Adaptado de Blight, 2010.



$$2 * b = 0,7063 * (2 * a)^{0,9795}$$

(1)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das análises de estabilidade global da pilha de estéril evidenciam a forte e já esperada influência da inclinação global da estrutura sobre o FS, conforme Tabela 2. Verificou-se que a relação entre o ângulo global da pilha e FS obedece uma tendência exponencial.

Por meio da análise de sensibilidade, utilizando o Fator de Redução de Resistência ao Cisalhamento (SRF), foi possível identificar os ângulos de atrito crítico ( $\phi_{crit}$ ), que correspondem ao ponto em que o fator de segurança (FS) atinge aproximadamente 1,0. Observou-se que esses ângulos aumentam de forma proporcional ao ângulo global da pilha: com ângulo de atrito de  $9,5^\circ$  para um global da pilha de  $10^\circ$  até o ângulo de atrito de  $25^\circ$  para a configuração mais inclinada ( $26^\circ$ ). Esse resultado indica que a estabilidade da pilha, em situações mais inclinadas, só é garantida quando há maior resistência mobilizada pelo material.

Esse comportamento evidencia a relação direta entre a inclinação da pilha e a resistência necessária para garantir o equilíbrio: quanto maior o ângulo global, maior deve ser o atrito mobilizado.

A comparação entre o FS obtido com  $\phi$  fixo ( $25^\circ$ ) e o FS com  $\phi_{crit}$  mostra a coerência da abordagem: os valores de FS  $\approx 1,0$  em todas as configurações, o que valida a aplicação da técnica de sensibilidade para determinação de configurações críticas de estabilidade. Tais resultados reforçam a importância de considerar diferentes geometrias no projeto de pilhas de estéril e destacam o papel da resistência ao cisalhamento do material como principal condicionante da segurança global.

Tabela 2. Análise da estabilidade global de pilha de estéril com variação do ângulo de inclinação e redução progressiva da resistência ao cisalhamento.

Ângulo Global da pilha ( $^\circ$ )	FS ( $\phi = 25^\circ$ )	Ângulo de atrito efetivo crítico (análise de sensibilidade)	Fator de Redução de Resistência (FRR $\phi$ )	FS ( $\phi_{crit}$ )
10	2,73	9,50	2,63	1,01
12	2,27	11,70	2,14	1,04
14	1,95	14,00	1,79	1,06
16	1,69	15,20	1,64	1,00
18	1,50	17,30	1,45	1,01
20	1,34	19,60	1,28	1,04
22	1,21	21,60	1,16	1,05
24	1,11	23,00	1,09	1,01
26	1,01	25,00	1,00	1,01

A estimativa do volume mobilizado e do alcance da ruptura hipotética, considerando diferentes inclinações globais da pilha de estéril, permitiu identificar relações geométricas e cinemáticas relevantes para a avaliação dos riscos associados a movimentos de massa em estruturas de disposição de rejeitos e estéril, conforme Tabela 3.

Verificou-se que o volume mobilizado (V) apresenta tendência decrescente com o aumento do ângulo global da pilha. Esse comportamento é consequência direta da geometria da cunha de ruptura obtida nas análises 2D, cujas áreas diminuem progressivamente à medida que a pilha se torna mais inclinada. Para inclinações suaves ( $10^\circ$  a  $14^\circ$ ), os volumes mobilizados são maiores (acima de  $1,5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ), o que evidencia que, apesar da maior estabilidade global nessas configurações (ver Tabela 2), eventuais rupturas nessas condições podem envolver grandes massas. Segundo Blight (2010), volumes mobilizados em rupturas de pilhas tendem a ser maiores em geometrias mais suaves devido à extensão lateral e vertical mais ampla da cunha de ruptura.

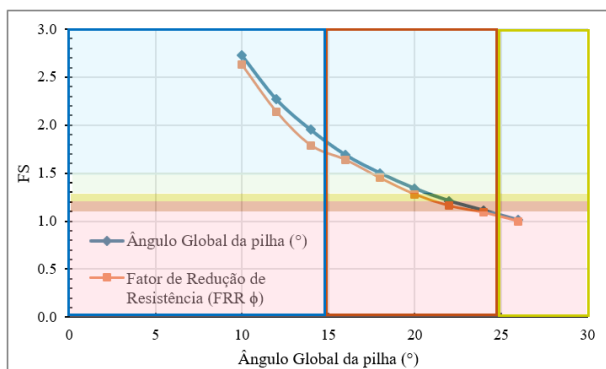
As dimensões dos elipsoides utilizados para a estimativa tridimensional dos volumes (raio maior e diâmetro menor) seguem a mesma lógica: ambos diminuem conforme a inclinação aumenta, caracterizando uma cunha mais estreita e concentrada nos casos mais críticos. A formulação adotada, baseada em Blight (2010) e adaptada por Ribeiro *et al.* (2016), se mostra adequada para representar volumes de ruptura com base na área projetada em planta e na profundidade estimada a partir da geometria do talude.

No que diz respeito ao alcance da ruptura, foram aplicadas as equações empíricas de Corominas (1996) para dois mecanismos: ruptura translacional e escorregamento de terra. Ambas as abordagens mostraram comportamento similar, com  $H/L$  variando de 0,22 a 0,26 e ângulos de repouso ( $\alpha$ ) entre  $10,5^\circ$  e  $14,3^\circ$ , acompanhando o aumento do ângulo da pilha. O pequeno crescimento de  $H/L$  com o aumento da inclinação indica que, embora o volume mobilizado seja menor, a energia potencial por unidade de massa aumenta, resultando em maior capacidade de deslocamento da massa — efeito já descrito em estudos de mobilidade de escorregamentos (Hung *et al.*, 2001). Deve-se destacar, entretanto, que os modelos empíricos utilizados foram originalmente derivados de rupturas em solos naturais e encostas geológicas, o que pode não capturar integralmente as particularidades de pilhas de estéril, como a presença de blocos de maior granulometria, heterogeneidade interna e efeitos construtivos.

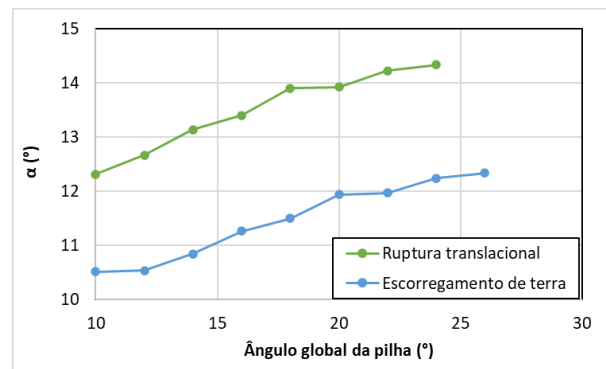
Os resultados indicam que os alcances ( $L$ ) para ruptura translacional são ligeiramente menores que os observados para escorregamentos de terra, em concordância com a literatura. Essa distinção é relevante para a engenharia prática, pois permite estabelecer cenários diferenciados de alcance em estudos de zoneamento de risco a jusante. A análise também sugere que, embora pilhas mais inclinadas mobilizem volumes menores, a maior mobilidade da massa pode ampliar o potencial de danos em áreas de ocupação, reforçando a importância de tais estimativas para a definição de zonas de autossalvamento e estratégias de resposta emergencial.

Na Figura 4a é apresentado o comportamento do FS em função do ângulo global da pilha. O FS decresce à medida que o ângulo global da pilha aumenta, mostrando uma relação inversa clara. Isso é esperado, pois pilhas com ângulos mais inclinados tendem a ser menos estáveis. O fato de o FS diminuir conforme o ângulo aumenta está alinhado com o entendimento clássico da mecânica dos solos e estabilidade de taludes (Craig, 2004). A proximidade das duas curvas sugere que a análise de sensibilidade ao ângulo de atrito efetivo é consistente com o modelo principal, reforçando a importância desse parâmetro para projetos de pilhas de estéril e rejeito. Valores de FS  $\approx 1,0$  indicam potencial risco de instabilidade, o que ocorre a partir de aproximadamente  $23^\circ$  no gráfico.

Já na Figura 4b, observa-se que o ângulo  $\alpha$  em função do ângulo global da pilha, comparando dois tipos de ruptura. A ruptura translacional apresenta valores maiores do que o escorregamento de terra. O aumento do ângulo  $\alpha$  com o ângulo da pilha indica que, à medida que a pilha fica mais inclinada, o potencial plano de ruptura se torna mais inclinado, refletindo mecanismos de falha mais agressivos (Duncan, 1996). A diferença entre os dois tipos de ruptura evidencia que os mecanismos de falha podem variar em geometria e potencial energia liberada. A ruptura translacional, geralmente associada a um movimento mais planar, tende a apresentar maiores ângulos.



(a)



(b)

Figura 4. Resultados: (a) Análise do FS *versus* ângulo global da pilha e ângulo de atrito efetivo crítico; e (b) Análise do ângulo de repouso *versus* os tipos de ruptura.

Ainda com relação aos resultados obtidos, na Figura 5 é apresentado o gráfico que correlaciona o volume da massa mobilizada com a razão  $H/L$ , conforme compilado por Hunter e Fell (2003), a partir da retroanálise de casos históricos realizada por Corominas (1996). Nesse gráfico, foram traçadas as linhas correspondentes aos limites superior e inferior do intervalo de confiança de 95%, além da linha média que representa a tendência central dos dados analisados. Os resultados obtidos pelas formulações indicadas na Tabela 1 foram plotados no referido gráfico com intenção de esquematizar graficamente a posição dos

resultados dentro contexto histórico. Para a ordem de grandeza de volume expectável a ser mobilizado ( $10^6$  m<sup>3</sup> a  $10^7$  m<sup>3</sup>), os resultados obtidos localizam-se na porção superior a linha de tendência média proposta pelos autores supracitados, sobretudo quando a ruptura translacional é admitida como representativa para o caso em estudo. É possível sugerir, portanto, que é possível esperar por relações H/L ligeiramente superiores aos valores médios do contexto histórico disponível quando a ruptura translacional é admitida como representativa em detrimento do escorregamento de terra. Para esta ordem de volume mobilizado a bibliografia demonstra ainda razoável dispersão da relação H/L. Uma vez que as formulações propostas por Corominas (1996) refletem a tendência média considerando todo o histórico, inclusive rupturas associadas a volumes entre  $10^2$  e  $10^{12}$ , espera-se que os resultados estejam em torno desta linha média. Apesar disso, a figura abaixo evidencia que casos históricos associados à ordem de grandeza de volumes superiores a  $10^5$  m<sup>3</sup> alcançaram H/L inferiores e portanto, L superiores (maiores alcances de massa rompida). Dessa forma, recomenda-se cautela na utilização dos dados históricos como ferramenta de estimativa de L sobretudo quando volumes inferiores a  $10^5$  m<sup>3</sup> são estimados na ruptura hipotética.

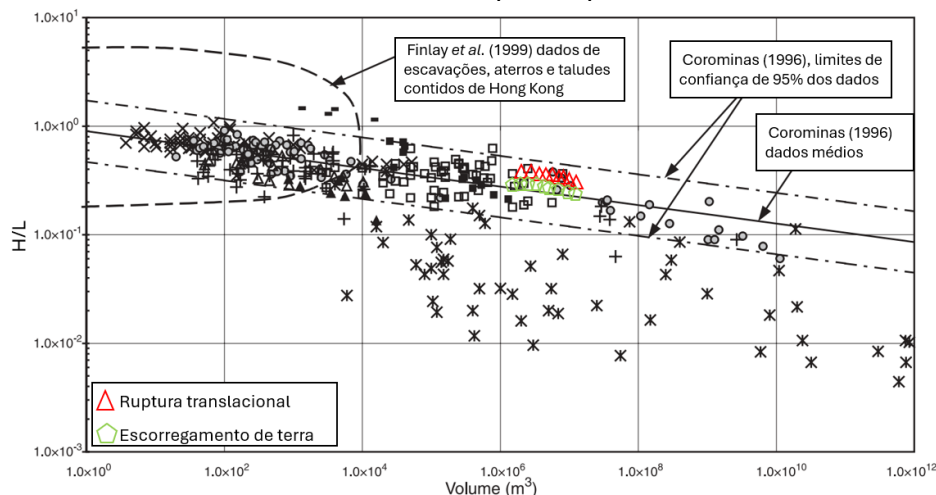


Figura 5. Casos históricos objeto de estudo por Corominas (1996) com inclusão dos estudos desenvolvidos neste trabalho.

Fonte: Adaptado de Hawley e Cuning (2017).

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o potencial de ruptura hipotética em pilhas de estéril por meio de análises de estabilidade com base no Método do Equilíbrio Limite (MEL), integradas a modelos empíricos para estimativa da área potencialmente impactada pela propagação do material mobilizado. A metodologia proposta, ainda que baseada em formulações empíricas derivadas de casos históricos (Corominas, 1996; Blight, 2010), foi aplicada de forma inédita a uma estrutura hipotética de pilha de estéril em ambiente de modelagem geotécnica e BIM, proporcionando uma avaliação preliminar rápida, visual e tecnicamente embasada da extensão potencial dos danos em cenários de ruptura.

Os ângulos de alcance ( $\alpha$ ) estimados variaram entre  $10,5^\circ$  e  $12,3^\circ$  para escorregamentos de terra, e entre  $11,9^\circ$  e  $14,3^\circ$  para rupturas translacionais, o que se mostra compatível com a faixa observada em casos documentados na literatura. Embora os modelos utilizados tivessem como base dados históricos, a comparação dos resultados com esses mesmos dados de referência não teve como finalidade validar as fórmulas aplicadas, mas sim verificar a coerência da metodologia quando empregada no caso hipotético analisado. Essa verificação foi importante para demonstrar que a estrutura estudada apresentou um comportamento compatível com padrões já observados, o que reforça a utilidade dos modelos em etapas preliminares de projeto.

A abordagem adotada apresenta limitações inerentes ao uso de modelos empíricos, como a simplificação do comportamento do terreno e a ausência de calibração para condições locais específicas. No entanto, seu uso é plenamente justificado em etapas preliminares de projeto e planejamento, especialmente em cenários onde dados detalhados ainda não estão disponíveis. Além disso, a integração com ferramentas de modelagem tridimensional, como o Autodesk Civil 3D, amplia a capacidade de interpretação espacial e facilita a comunicação técnica dos resultados para diferentes públicos envolvidos na gestão de risco.

Dessa forma, este estudo contribui tecnicamente para a compreensão do comportamento de pilhas de estéril sob condições críticas e reforça a importância de metodologias práticas e acessíveis para a avaliação de cenários de ruptura. Além de fornecer subsídios acadêmicos, os resultados obtidos podem apoiar diretamente o desenvolvimento de projetos conceituais de disposição, orientar comparações preliminares entre alternativas de geometria e servir como ferramenta inicial de triagem antes da adoção de análises numéricas avançadas. Essa aplicabilidade prática amplia a utilidade do método, especialmente em contextos de planejamento preventivo e gestão de risco em empreendimentos de mineração.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a TPF Engenharia por incentivar a realização de pesquisas no ambiente de trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. Wiley.
- Bell, F.G. (2007). *Geotechnical Engineering of Dams*. CRC Press.
- Blight, G. E. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. CRC Press.
- Chen, Y., Xu, W., Zhou, C. (2023). Runout distance prediction of waste dump failures using machine learning and empirical models. *Landslides*, 20(2), 355–369.
- Coduto, D.P. (2001). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260–271.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons.
- Duncan, J.M. (1996). State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(7), 577-596.
- Finlay, P. J., Mostyn, G. R., & Fell, R. (1999). Landslide risk assessment: Prediction of travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(3), 556–562.
- Gong, Y., Zhang, J., Cao, Y. (2022). Influence of rainfall-induced cyclic wetting and drying on slope stability of mine waste piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 158, 107239.
- Hawley, J., & Cunniff, J. (2017). Debris flow mobility: A simplified analytical model. *Engineering Geology*, 220, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.02.006>
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2005). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 11(3), 221–238. <https://doi.org/10.2113/11.3.221>
- Jiang, Q., Liu, Y., Chen, Z. (2023). Stability analysis of large-scale waste rock dumps under varying hydrological conditions. *Engineering Geology*, 319, 107073. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107073>
- Liu, J., Wang, L., Zhang, Y. (2023). Reliability-based stability evaluation for mine waste dumps using hybrid LEM-FEM approach. *Computers and Geotechnics*, 159, 105153.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- Vick, S. G. (2002). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers.
- Zhang, H., Li, Q., Sun, D. (2024). Geomechanical behavior of mine waste rock under operational stress paths. *International Journal of Mining Science and Technology*.