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/COBRAMSEG2026.1/25

Avaliação Preliminar do Potencial de *Piping* em Barragem de Mineração

Ronaldo Vilela Wanderley Neto, M.Sc.
Engenheiro Geotécnico, JF Brasil Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, ronaldo.vilela@jfbr.com.br

Laís Brenda Lopes Rezende, M.Sc.
Engenheira Geotécnica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, lais.brenda@ufv.br

Caroline Rodrigues Araújo Reis
Engenheira Geotécnica, JF Brasil Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, caroline.reis@jfbr.com.br

Eduarda Almeida Oliveira
Engenheira Geotécnica, JF Brasil Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, eduarda.oliveira@jfbr.com.br

RESUMO: A segurança de barragens de mineração é diretamente influenciada pelo controle do fluxo d'água através do maciço e de suas fundações. Entre os mecanismos de instabilidade por percolação, o *piping* — erosão interna progressiva — destaca-se como uma das principais causas de ruptura de barragens. O presente estudo propõe uma metodologia para avaliação preliminar desse potencial, constituída por análises numéricas de percolação bidimensionais em cenário crítico (N.A. Máx. *Maximorum*) e por análises de ensaios laboratoriais de caracterização dos materiais. Os gradientes hidráulicos simulados são comparados aos gradientes críticos (i_{crit}) dos materiais do modelo geológico-geotécnico da estrutura, investigando-se o potencial de iniciação do fenômeno. Verificam-se os critérios de filtragem e autofiltragem entre filtro, maciço e fundação por análise combinatória de critérios granulométricos e determina-se o Fator de Segurança (FS) contra *piping* no pé da estrutura. A metodologia é demonstrada em barragem hipotética com dados de solos de Minas Gerais e constitui ferramenta complementar ao engenheiro geotécnico, utilizando-se de informações comumente disponíveis no ramo da mineração. Ressalta-se que, pelas características intrínsecas ao fenômeno do *piping*, o procedimento descrito não substitui a necessidade da avaliação através de inspeções de campo e dos dados de monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: *Piping*, Barragem de Mineração, Erosão Interna, Percolação, Gradiente Hidráulico Crítico.

ABSTRACT: Mining dam safety is directly influenced by the control of water flow through the embankment and its foundations. Among seepage-related instability mechanisms, piping — progressive internal erosion — stands out as a leading cause of dam failure. This study proposes a methodology for the preliminary assessment of piping potential, integrating two-dimensional numerical seepage analyses under a critical scenario (Maximum *Maximorum* water level) and laboratory characterization tests. Simulated hydraulic gradients are compared with the critical hydraulic gradients (i_{crit}) of the materials of the geological-geotechnical model to investigate the initiation potential. Filtering and self-filtering criteria between the filter, embankment fill, and uppermost foundation layer are verified through a combinatorial grain-size analysis and the Factor of Safety (FS) against piping at the downstream toe is determined. The methodology is demonstrated on a hypothetical dam using data from soils in Minas Gerais, Brazil, and constitutes a complementary tool for geotechnical engineers, using data commonly available in the mining industry. It should be noted that, due to the intrinsic characteristics of the piping phenomenon, the procedure described does not replace the need for assessment through field inspections and monitoring data.

KEYWORDS: Piping, Mining Dam, Internal Erosion, Seepage, Critical Hydraulic Gradient.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de mineração constitui uma das principais preocupações da engenharia geotécnica, especialmente no contexto brasileiro, no qual eventos de grande repercussão evidenciaram a gravidade dos riscos envolvidos. Entre os mecanismos de falha associados à percolação, o *piping* — erosão interna progressiva — figura como uma das causas mais recorrentes de rupturas de barragens em todo o mundo (Foster *et al*., 2000; ICOLD, 2017).

O *piping* é um processo que se desenvolve de forma gradual e frequentemente imperceptível, no qual as partículas de solo são transportadas pela água que percola o maciço ou a fundação, podendo formar canais internos contínuos entre o reservatório e a face de jusante da estrutura. Terzaghi e Peck (1962) descrevem o fenômeno como um processo de erosão que ocorre quando a água em movimento no interior do solo transporta partículas, formando um caminho preferencial que, se não controlado, pode resultar na falha da estrutura. Segundo Fell *et al*. (2005), para que o *piping* culmine em ruptura, é necessário que ocorra uma sequência de eventos: (i) iniciação da erosão interna, por mecanismos como erosão regressiva (quando o gradiente hidráulico supera o valor crítico), sufusão ou erosão por fluxo concentrado; (ii) continuação do processo, que pode ser bloqueada pela presença de filtros e transições bem dimensionados; (iii) progressão da erosão; e (iv) colapso estrutural. Fell e Fry (2007) destacam que a erosão interna por sufusão e por fluxo concentrado ao longo de interfaces são mecanismos frequentemente subestimados em análises preliminares, reforçando a importância de avaliação combinatória dos materiais presentes no modelo. Dessa forma, a avaliação do potencial de *piping* deve abranger tanto o risco de início do processo quanto a capacidade dos materiais de conter sua progressão. O gradiente hidráulico crítico (i_{crit}) é o parâmetro fundamental para a avaliação do início do *piping* por erosão regressiva. Cruz (1996) define o gradiente crítico como aquele no qual a carga hidráulica anula a tensão efetiva do solo, tornando nulas as forças intergranulares. Sua expressão clássica é:

$$i_{crit} = \gamma_{sub} / \gamma_w \tag{1}$$

na qual γ_{sub} é o peso específico submerso do solo e γ_w é o peso específico da água. O valor de i_{crit} é da ordem de 1,0 para a maioria dos solos, variando conforme as características físicas de cada material. Cabe observar que o i_{crit} também pode ser determinado indiretamente a partir de outros parâmetros de caracterização física dos solos, como o índice de vazios (e) de amostras indeformadas e a massa específica dos grãos (G_s).

Para a avaliação do potencial de continuidade do fenômeno, os critérios de filtragem e autofiltragem assumem papel central. O critério de Terzaghi (1922 apud Terzaghi e Peck, 1962) estabelece condições granulométricas entre o material de base e o filtro que, quando atendidas, garantem a retenção das partículas finas sem comprometer o fluxo. A autofiltragem (*self-filtering*) refere-se à capacidade de um solo atuar como filtro para si próprio, condição determinada pela uniformidade e graduação de sua curva granulométrica.

Neste contexto, o presente trabalho propõe e demonstra uma metodologia para avaliação preliminar do potencial de *piping* em barragens de mineração, integrando análises numéricas de percolação e ensaios laboratoriais de caracterização física dos materiais. Ressalta-se que tal avaliação é de caráter essencialmente preliminar, em parte pela natureza intrínseca do *piping* como um "fenômeno dos extremos", no sentido de que as condições que o desencadeiam podem não ser totalmente identificáveis por modelos determinísticos simplificados. As inspeções regulares de campo continuam sendo a verificação mais importante para identificação precoce do fenômeno — evidências superficiais como surgências, afloramentos turbulentos e subsidências localizadas são, com frequência, os primeiros indicadores de erosão interna em desenvolvimento (ICOLD, 2017; Foster *et al*., 2000) — em conjunto com a análise técnica dos registros de instrumentação. A metodologia aqui proposta constitui, portanto, uma ferramenta complementar ao repertório do engenheiro geotécnico, fornecendo uma perspectiva quantitativa e expedita, compatível com os dados tipicamente disponíveis no setor de mineração.

2 OBJETO DE ESTUDO E MATERIAIS

O estudo de caso consiste em uma barragem de mineração hipotética, cujo modelo geológico-geotécnico de sua seção central está apresentado na Figura 1. A adoção de uma estrutura hipotética preserva a generalidade metodológica e viabiliza a demonstração dos procedimentos propostos com dados laboratoriais reais de solos de Minas Gerais.

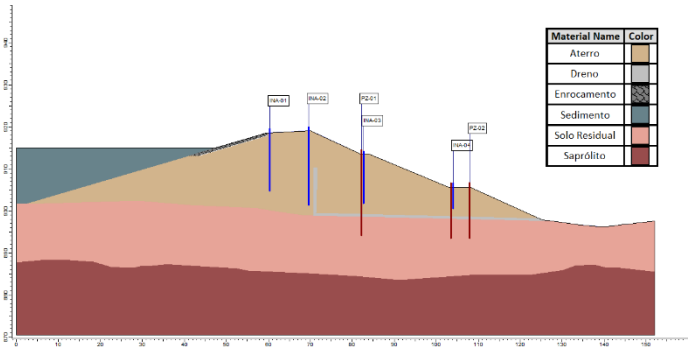


Figura 1 - Modelo geológico-geotécnico da seção central da barragem hipotética.

O modelo geológico-geotécnico contempla as seguintes unidades: (i) Aterro, correspondente ao maciço de solo compactado da barragem; (ii) Solo Residual, constituindo a camada superficial de fundação; (iii) Saprolito, litotipo subjacente; (iv) Drenagem Interna, composta por areia bem graduada; e (v) Enrocamento, no pé do talude de jusante. Adicionalmente, são considerados sedimentos acumulados no fundo do reservatório.

Os materiais avaliados quanto ao potencial de *piping* são o Aterro e o Solo Residual, por representarem, respectivamente, os litotipos do maciço e da camada de fundação mais suscetível ao fenômeno de *piping*. Para a avaliação dos critérios de filtragem, inclui-se também a Areia do sistema de drenagem. As curvas granulométricas dos materiais são apresentadas na Figura 2, obtidas por ensaios de granulometria por sedimentação e peneiramento (ABNT NBR 7181, 2017). Os parâmetros característicos são sumarizados na Tabela 1.

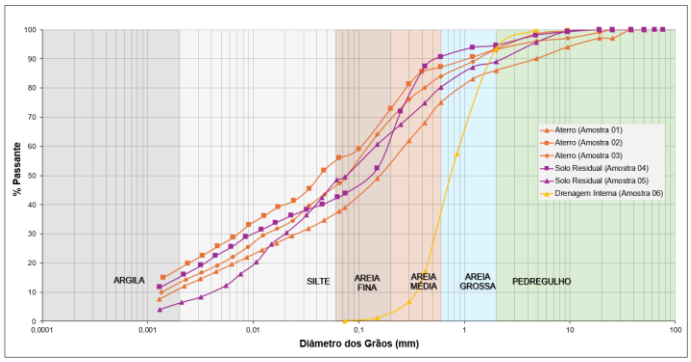


Figura 2 - Curvas granulométricas dos materiais analisados.

Tabela 1 - Parâmetros granulométricos dos materiais analisados.

Material	Amostra	d_{15} (mm)	d_{85} (mm)	d_{50} (mm)	γ_{sub} (kN/m³)	i_{crit}
Aterro	Amostra 01	0,0034	1,7333	0,1615	10,20	1,04
	Amostra 02	0,0014	0,3860	0,0433	10,30	1,05

Material	Amostra	d_{15} (mm)	d_{85} (mm)	d_{50} (mm)	γ_{sub} (kN/m³)	i_{crit}
Solo Residual	Amostra 03	0,0026	0,7200	0,0791	10,32	1,05
	Amostra 04	0,0020	0,3982	0,1199	11,58	1,18
	Amostra 05	0,0069	1,0174	0,0774	10,99	1,12
Areia (Dreno)	Amostra 06	0,3999	1,7321	0,7723	-	-

Os gradientes hidráulicos críticos foram calculados a partir do peso específico submerso dos solos (γ_{sub}) e, para as análises, considerou-se a média dos gradientes hidráulicos para cada um dos materiais, obtendo-se i_{crit} = 1,05 para o Aterro e i_{crit} = 1,15 para o Solo Residual.

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta estrutura-se em três etapas complementares: (i) análise do potencial de início do *piping*, por meio da comparação entre gradientes hidráulicos simulados e críticos; (ii) análise do potencial de continuidade do fenômeno, por meio dos critérios de filtragem e autofiltragem; e (iii) verificação do Fator de Segurança (FS) contra *piping* no pé da estrutura.

Para tal, após a definição do modelo geológico-geotécnico, o primeiro passo da metodologia é a definição das permeabilidades dos materiais do modelo, a partir de ensaios de laboratório e/ou de campo. Em uma barragem real com instrumentação instalada, esse processo pode ser complementado por calibração das análises de percolação com ajuste das permeabilidades às leituras dos piezômetros e medidores de nível d'água, aprimorando a representatividade do modelo. A partir das permeabilidades definidas, realiza-se a análise de percolação em cenário crítico — N.A. Máximo *Maximorum* —, extraindo-se os gradientes hidráulicos resultantes em diferentes regiões da seção. Esses gradientes são comparados aos gradientes hidráulicos críticos (i_{crit}) calculados para os materiais pertinentes a partir dos dados de caracterização física. Prossegue-se com a verificação dos critérios de filtragem e autofiltragem entre os materiais constituintes do maciço, do sistema de drenagem e da fundação superficial, avaliando o potencial de contenção da erosão interna caso esta venha a se iniciar. Conclui-se com o cálculo do FS contra o fenômeno de *piping* na região do pé do barramento, a partir dos gradientes hidráulicos totais simulados e dos i_{crit} dos materiais. O fluxograma da Figura 3 sintetiza as etapas da metodologia.

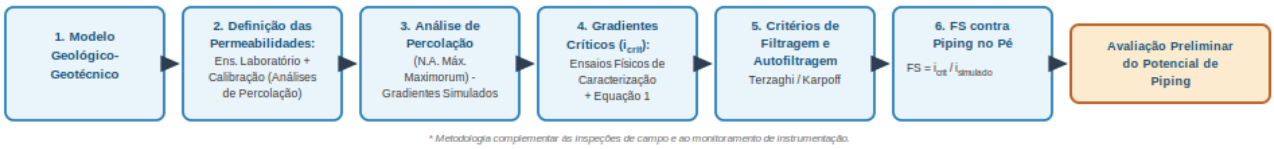


Figura 3 - Fluxograma da metodologia de avaliação preliminar do potencial de piping.

3.1 Calibração do Modelo

As análises de percolação foram conduzidas em regime permanente, em estado plano de fluxo bidimensional, utilizando o software *Slide2* (Rocscience). Empregou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) com elementos triangulares de seis nós, com refinamento de malha nas regiões de interface entre materiais de permeabilidade contrastante e nas proximidades do sistema de drenagem. Os materiais foram modelados como homogêneos e isotrópicos, com exceção feita à condutividade hidráulica do aterro compactado que foi definida com um coeficiente de anisotropia de 0,3. No presente estudo, por se tratar de uma barragem hipotética, os coeficientes de permeabilidade (k) adotados foram definidos com base em ensaios

laboratoriais dos materiais constituintes. Condições de contorno hidráulicas foram aplicadas nos bordos do modelo hipotético, de modo a representar uma carga hidráulica a montante igual à elevação arbitrada da soleira do extravasor da estrutura (El. 915,00 m) e, a jusante, igual à El. 895,00 m.

Em uma estrutura real com instrumentação instalada, esses parâmetros poderiam ser refinados por algum processo de calibração — ajustando-se os valores de k de modo que a linha de saturação do modelo reflita as leituras dos medidores de nível d'água referentes a um dia específico do período seco do último ciclo hidrológico anterior à análise. Nesta condição, utilizar-se-ia condições de contorno hidráulicas a montante baseadas também em leituras de instrumentação (régua limnimétrica) deste dia específico, por exemplo —, conferindo maior representatividade ao modelo.

As condutividades hidráulicas definidas para os materiais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de permeabilidade e razões k_1/k_2 utilizados no modelo numérico.

Material	**k (m/s)**	**k_1 / k_2**
Aterro	5×10^{-6}	0,3
Solo Residual	1×10^{-6}	1
Saprolito	1×10^{-7}	1
Drenagem Interna (Areia)	5×10^{-3}	1
Enrocamento	1×10^{-1}	1
Sedimento	1×10^{-5}	1

3.2 Análises de Percolação — Gradientes Hidráulicos Simulados no Modelo Numérico e Comparação com Gradientes Hidráulicos Calculados para os Materiais

Após a definição das permeabilidades dos materiais presentes no modelo, analisa-se um cenário considerado extremo em termos de percolação. No caso aqui estudado, considerou-se que tal cenário corresponderia ao modelo com a carga a montante da barragem na elevação do nível d'água máximo *maximorum* (El. 915,80 m). Os gradientes hidráulicos horizontais (i_x), verticais (i_y) e totais (i_{total}) simulados são, então, extraídos ao longo da seção de análise, para o Aterro e o Solo Residual. O gradiente hidráulico crítico (i_{crit}) de cada material foi calculado pela Equação 1, a partir do peso específico submerso (γ_{sub}), e está apresentado na Tabela 1. Os valores de gradiente hidráulico simulados foram, então, comparados aos gradientes hidráulicos críticos calculados.

3.4 Cálculo e Verificação dos Critérios de Filtragem e Autofiltragem

Para a avaliação do potencial de continuidade do *piping* caso este venha a se iniciar, verificaram-se os critérios de filtragem e autofiltragem dos materiais constituintes do modelo. A análise foi realizada pela combinatória entre todas as amostras disponíveis de Aterro, Solo Residual e Drenagem Interna (Areia). Cada par foi avaliado pelo critério clássico de Terzaghi (1922 apud Terzaghi e Peck, 1962):

$$D_{15}(filtro) \,/\, d_{85}(\text{base}) \leq 4 \text{ a } 5 \qquad \text{(retenção de partículas)} \qquad (2)$$

$$D_{15}(filtro) \,/\, d_{15}(\text{base}) \geq 4 \qquad \text{(permeabilidade do filtro)} \qquad (3)$$

O critério de Karpoff (1955 apud Moffat, 2002) foi aplicado de forma complementar, verificando-se a condição D_{50}(filtro) / d_{50}(base) ≤ 25. A autofiltragem de cada material foi avaliada adotando-se o próprio material simultaneamente como filtro e como base.

3.5 Cálculo do Fator de Segurança contra Piping no Pé da Barragem

O Fator de Segurança (FS) contra o início do *piping* por erosão regressiva é calculado pela razão:

$$FS = i_{crit} / i_{simulado} \quad (4)$$

na qual $i_{simulado}$ corresponde ao maior gradiente hidráulico total obtido nas análises de percolação na região do pé da estrutura e/ou na face de jusante. Fell *et al*. (2005) recomendam FS mínimo de 3, sendo preferível FS > 5.

4 RESULTADOS

4.1 Análise do Potencial de Iniciação do Processo: Comparação entre Gradientes Críticos e Simulados

Os gradientes hidráulicos obtidos para o cenário de N.A. máximo *maximorum* indicam que, para a grande maioria dos pontos analisados, os gradientes permanecem inferiores aos gradientes críticos dos respectivos materiais. A Figura 4 apresenta os gradientes i_x, i_y e i_{total} ao longo da seção de análise, com indicação dos gradientes críticos de cada material.

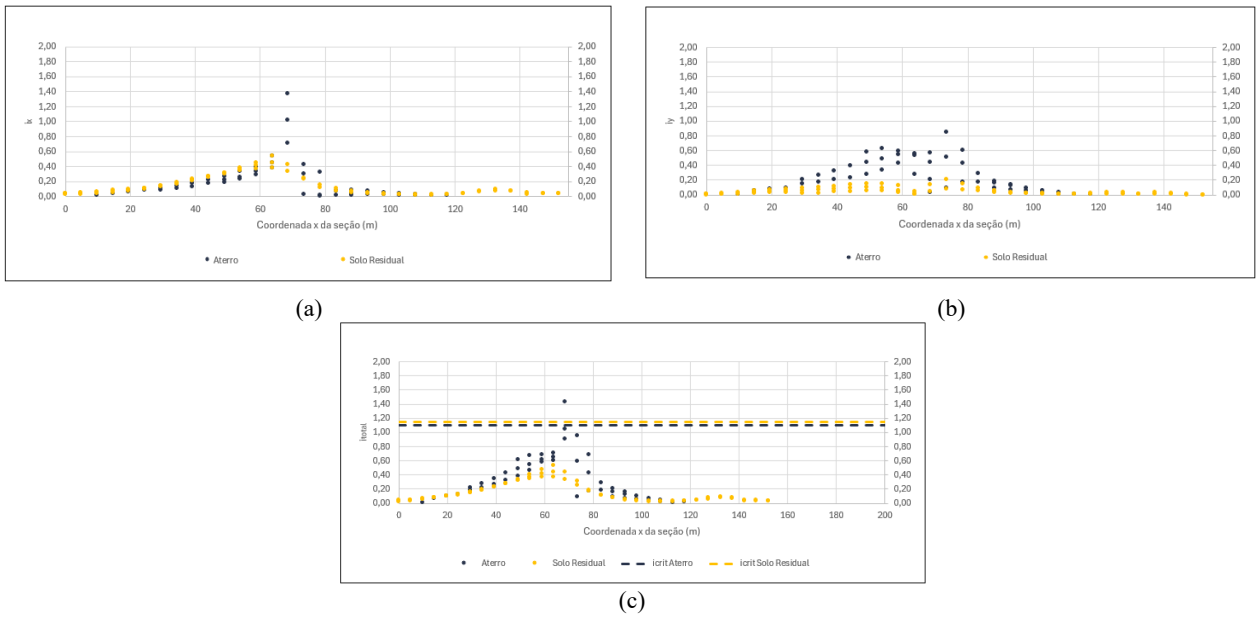


Figura 4 - Gradientes hidráulicos simulados. (a) Gradiente hidráulico horizontal ix; (b) Gradiente hidráulico vertical iy; (c) Gradiente hidráulico total itotal e gradientes hidráulicos críticos calculados para os materiais.

Identificou-se um ponto isolado no Aterro, imediatamente adjacente à interface com a Drenagem Interna, no qual o gradiente local simulado supera o gradiente crítico. Essa ocorrência poderia ser interpretada como um indício de potencial para a iniciação do *piping* e, portanto, justifica-se a análise do potencial para continuação do fenômeno. Em todos os casos, os autores recomendam que sejam verificados os critérios de filtragem.

Salienta-se, entretanto, que tal gradiente hidráulico simulado também pode ser entendido como artefato numérico, consequência da descontinuidade artificial de permeabilidade na interface entre dois materiais cujos coeficientes de permeabilidade diferem em algumas ordens de grandeza (Tabela 2). Na prática, a transição granulométrica entre maciço e filtro ocorre ao longo de uma zona com gradiente distribuído, que o MEF com elementos homogêneos não representa fielmente.

4.2 Critérios de Filtragem e Autofiltragem

A análise combinatória das 36 duplas de amostras, verificadas pelos critérios de Terzaghi ($D_{15}/d_{85} \leq 5$) e Karpoff ($D_{50}/d_{50} \leq 25$), é apresentada na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente. Legenda: At. = Aterro; S.R. = Solo Residual; D.N. = Drenagem Interna (Areia).

Tabela 3 - Critério de Terzaghi — razão $D_{15}/d85$.

Filtro / Base	01 (At.)	02 (At.)	03 (At.)	04 (S.R.)	05 (S.R.)	06 (D.N.)
01 (At.)	0,0020	0,0088	0,0047	0,0085	0,0033	0,0020
02 (At.)	0,0008	0,0037	0,0020	0,0036	0,0014	0,0008
03 (At.)	0,0015	0,0067	0,0036	0,0065	0,0025	0,0015
04 (S.R.)	0,0011	0,0052	0,0028	0,0050	0,0020	0,0011
05 (S.R.)	0,0040	0,0179	0,0096	0,0174	0,0068	0,0040
06 (D.N.)	0,2307	1,0358	0,5554	1,0042	0,3930	0,2309

Tabela 4 - Critério de Karpoff — razão D_{50}/d_{50}.

Filtro / Base	01 (At.)	02 (At.)	03 (At.)	04 (S.R.)	05 (S.R.)	06 (D.N.)
01 (At.)	1,0000	3,7350	2,0430	1,3480	2,0860	0,2090
02 (At.)	0,2680	1,0000	0,5470	0,3610	0,5590	0,0560
03 (At.)	0,4890	1,8280	1,0000	0,6600	1,0210	0,1020
04 (S.R.)	0,7420	2,7710	1,5160	1,0000	1,5480	0,1550
05 (S.R.)	0,4790	1,7900	0,9790	0,6460	1,0000	0,1000
06 (D.N.)	4,7810	17,86	9,7670	6,4430	9,9740	1,0000

Todos os 36 pares atenderam ao critério de retenção de Terzaghi ($D_{15}/d_{85} \leq 5$), com valores variando de 0,001 a 1,036. Da mesma forma, todos os pares atenderam ao critério de Karpoff ($D_{50}/d_{50} \leq 25$), com valores entre 0,056 e 17,855. Em conjunto, os resultados indicam que, caso o processo de erosão interna se iniciasse, os materiais presentes no modelo geológico-geotécnico apresentam condições granulométricas favoráveis à contenção da progressão do *piping*.

4.3 Fator de Segurança Contra Piping no Pé da Barragem

Na região do pé da estrutura, os gradientes hidráulicos totais são baixos, resultando em FSs amplamente satisfatórios, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de Segurança contra piping obtidos para os materiais analisados.

Material	$i_{simulado}$	i_{crit}	FS
Aterro	0,031	1,10	35,18
Solo Residual	0,123 [1]	1,15	9,35

[1] Valor extraído na região do pé de taludes de jusante, junto à camada superficial de fundação.

Os FSs obtidos (35,18 para o Aterro e 9,35 para o Solo Residual) superam amplamente o limiar de 3 (preferencialmente, 5) recomendado por Fell *et al*. (2005).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma metodologia para avaliação preliminar do potencial de *piping* em barragens de mineração, estruturada em três frentes complementares: análise do potencial de iniciação do fenômeno pela comparação entre gradientes hidráulicos simulados e críticos, avaliação dos critérios de filtragem e autofiltragem de Terzaghi e Karpoff, e cálculo do FS contra *piping* no pé da estrutura.

A aplicação ao estudo de caso hipotético demonstrou que a metodologia pode ser executada com dados tipicamente disponíveis na prática da engenharia geotécnica de mineração: ensaios de granulometria, ensaios físicos de caracterização e leituras de instrumentação de campo para calibração do modelo numérico. Os resultados indicaram FSs contra piping no pé da estrutura amplamente satisfatórios, superando o limiar de 5 recomendado pela literatura. A verificação dos critérios de filtragem e autofiltragem confirmou a adequação granulométrica das interfaces presentes no modelo, sugerindo baixo potencial de progressão do fenômeno.

Reitera-se o caráter preliminar e complementar da metodologia proposta. Por se tratar de um "fenômeno dos extremos" (Fell *et al*., 2005; ICOLD, 2017), o *piping* é melhor identificado por inspeções regulares de campo e por análise dos registros de instrumentação, que permanecem as verificações mais importantes, sendo insubstituíveis. A metodologia aqui descrita é, portanto, uma ferramenta analítica expedita que fornece ao engenheiro geotécnico uma perspectiva quantitativa sistemática, integrável às práticas correntes de monitoramento e gestão de segurança de barragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 7181: *Solo — Análise Granulométrica.* Rio de Janeiro.

Cruz, P. T. (1996). *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto.* Oficina de Textos, São Paulo.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams.* Taylor & Francis, London.

Fell, R., Fry, J. J. (Eds.) (2007). *Internal Erosion of Dams and Their Foundations.* Taylor & Francis, London.

Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal,* 37(5), 1000–1024.

ICOLD — International Commission on Large Dams (2017). *Bulletin 164: Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations.* Paris.

Karpoff, K. P. (1955). The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters. *Proceedings of ASTM,* 55, 1183–1198. Apud Moffat, R. (2002). *A Laboratory Study of Particle Migration in Cohesionless Soils.* MASc Thesis, University of British Columbia.

Terzaghi, K., Peck, R. B. (1962). *Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia.* Editora Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro.