COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4 – MODOS DE FALHA E ANÁLISE DE RISCOS DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

INTERFERÊNCIAS GEOTÉCNICAS ENTRE ESTRUTURAS DE MINA: LIÇÕES APRENDIDAS E IMPLICAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO

Luisa de Moura LEÃO
Engenheira Civil Geotécnica, DSc. em Geotecnia
3EM Mineração e Geologia

Marta Sawaya MIRANDA
Engenheira Geóloga, MSc. em Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Lúcio Miranda CAMÊLO
Engenheiro de Minas, Esp. em Geotecnia e Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Marconi Bicalho CESCO
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia Geotécnica
3EM Mineração e Geologia

Caio Araújo Borges CASTRO
Graduando em Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O aumento da complexidade dos empreendimentos de mineração, aliado à intensificação produtiva, restrições espaciais e maior rigor regulatório, tem exposto limitações das abordagens geotécnicas tradicionais, geralmente baseadas na análise isolada de estruturas. Entretanto, barragens de rejeitos, pilhas de estéril, cavas e sistemas de drenagem compõem um sistema interdependente, no qual interações hidráulicas e mecânicas evoluem ao longo do tempo. Este trabalho investiga interferências geotécnicas entre estruturas de mineração por meio de estudos de caso reais, utilizando abordagem qualitativa e comparativa baseada em análise documental, reconstrução da evolução geométrica e operacional, e identificação de mecanismos dominantes. As interferências foram classificadas em quatro categorias: geométricas, hidráulicas, operacionais e estrutural-construtivas. Os resultados evidenciam padrões recorrentes em que o aumento da produção e as limitações de espaço atuam como principais vetores de risco, frequentemente associados à subavaliação das interações hidráulicas e à ausência de reavaliações globais de estabilidade frente a mudanças operacionais. Observa-se ainda que instabilidades inicialmente localizadas podem se propagar para estruturas adjacentes, ampliando o risco sistêmico. Conclui-se que a gestão geotécnica em mineração deve incorporar abordagens integradas e sistêmicas ao longo de todo o

ciclo de vida do empreendimento, como condição essencial para mitigação de riscos e aumento da resiliência das estruturas.

ABSTRACT

The increasing complexity of mining operations, combined with production intensification, spatial constraints, and stricter regulatory requirements, has exposed limitations in traditional geotechnical approaches, which are generally based on the isolated analysis of structures. However, tailings dams, waste rock piles, open pits, and drainage systems form an interdependent system in which hydraulic and mechanical interactions evolve over time. This study investigates geotechnical interferences among mining structures through real case studies, using a qualitative and comparative approach based on document analysis, reconstruction of geometric and operational evolution, and identification of dominant mechanisms. The interferences were classified into four categories: geometric, hydraulic, operational, and structural-constructive. The results reveal recurring patterns in which increased production and spatial limitations act as primary risk drivers, frequently associated with the underestimation of hydraulic interactions and the absence of comprehensive stability reassessments following operational changes. It is also observed that initially localized instabilities may propagate to adjacent structures, amplifying systemic risk. It is concluded that geotechnical management in mining should incorporate integrated and systemic approaches throughout the entire life cycle of the operation as an essential condition for risk mitigation and enhancement of structural resilience.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade dos empreendimentos de mineração, associado à intensificação da produção, à limitação progressiva de áreas disponíveis e ao maior rigor regulatório, tem evidenciado limitações relevantes das abordagens tradicionais de projeto geotécnico. Em geral, estruturas como barragens de rejeitos, pilhas de estéril, cavas e sistemas de drenagem são concebidas e avaliadas de forma segmentada, apesar de integrarem um mesmo sistema físico e hidráulico, no qual alterações em uma estrutura podem influenciar diretamente o comportamento das demais [1].

Essa dissociação contrasta com o comportamento real dessas estruturas, que compartilham campos de tensões, trajetórias de fluxo e zonas de influência que evoluem ao longo do tempo. Como consequência, alterações em uma estrutura podem induzir respostas significativas em outras, configurando mecanismos de instabilidade progressiva que não são capturados por análises isoladas.

Eventos recentes têm demonstrado que critérios clássicos baseados exclusivamente em fatores de segurança determinísticos são insuficientes para representar a complexidade desses sistemas. Embora avanços regulatórios tenham incorporado conceitos de gestão de risco e avaliação ao longo do ciclo de vida, a análise ainda permanece predominantemente centrada em estruturas individuais, com pouca ênfase nas interações geotécnicas entre sistemas coexistentes [2].

Nesse contexto, observa-se uma lacuna entre a compreensão conceitual do comportamento integrado das estruturas e sua aplicação efetiva no planejamento e na operação de empreendimentos minerários, especialmente em cenários de expansão contínua e restrição espacial.

A justificativa deste trabalho fundamenta-se na evidência de que uma parcela significativa dos riscos geotécnicos críticos não decorre de falhas conceituais nos projetos iniciais, mas da evolução não integrada das estruturas ao longo do tempo. Demandas operacionais, restrições físicas e pressões econômicas frequentemente conduzem à adoção de soluções localizadas que, embora viáveis sob uma ótica pontual, podem gerar efeitos indiretos sobre estruturas adjacentes, ampliando o potencial de transferência de risco no sistema como um todo.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar as interferências geotécnicas entre estruturas de disposição e lavra inseridas em um mesmo empreendimento minerário, a partir de estudos de caso reais. Busca-se identificar mecanismos dominantes de instabilidade, reconhecer padrões recorrentes de interferência e discutir suas implicações para a segurança global do sistema.

Importante destacar que o foco do trabalho não reside na análise isolada de eventos de falha, mas na compreensão das interferências entre estruturas como mecanismo de degradação sistêmica. Nesse sentido, os estudos de caso são utilizados como base empírica para identificação de padrões de interação, e não como objeto de análise individual.

A principal contribuição do artigo consiste na sistematização dessas interferências como categoria explícita de análise, fornecendo um enquadramento técnico voltado ao planejamento integrado e à gestão de riscos em estruturas de mineração.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se em uma análise qualitativa e comparativa de estudos de caso representativos de interferências geotécnicas em empreendimentos minerários. Os casos foram selecionados a partir de sua relevância técnica e disponibilidade de informações documentais, incluindo relatórios técnicos, registros operacionais e dados públicos.

A seleção dos casos obedeceu a critérios explícitos de inclusão: (i) coexistência, em um mesmo empreendimento ou em empreendimentos contíguos, de duas ou mais estruturas geotécnicas, pilhas, barragens, diques, cavas ou sistemas de drenagem, com potencial de interação física ou hidráulica; (ii) existência de evolução geométrica, operacional ou hidráulica documentada ao longo do tempo; (iii) disponibilidade de fontes verificáveis que permitissem reconstruir a trajetória do evento; e (iv) representatividade do mecanismo de interferência em relação às quatro categorias analisadas. Foram excluídos eventos cuja causa se restringisse a uma única estrutura, sem interação intersistêmica identificável.

Para assegurar a rastreabilidade das inferências, cada caso foi associado a um nível de evidência, conforme a natureza das fontes utilizadas: Nível I – Estudos técnicos revisados por pares e relatórios de painéis de investigação; Nível II – comunicados e documentos oficiais de órgãos reguladores e do Ministério Público; e Nível III – registros jornalísticos e imagens de sensoriamento remoto. Ao longo da análise, os fatos documentados são apresentados de forma distinta das interpretações dos autores: afirmações fundamentadas em fontes primárias são reportadas de modo assertivo, enquanto as leituras integradas propostas neste trabalho são explicitadas por expressões como "as evidências sugerem" ou "a interpretação dos autores indica", evitando atribuir caráter factual a hipóteses de mecanismo.

Cada caso foi analisado segundo quatro eixos de interferência: (i) geométrica, (ii) hidráulica, (iii) operacional e (iv) estrutural-construtiva, permitindo a identificação dos principais mecanismos de interação entre estruturas. A análise considerou a evolução temporal dos empreendimentos, com reconstrução das mudanças geométricas, operacionais e hidráulicas ao longo do ciclo de vida das estruturas.

A partir dessa abordagem, foi realizada uma comparação sistemática entre os casos, com o objetivo de identificar padrões recorrentes de interferência, mecanismos dominantes de instabilidade e trajetórias de propagação de risco no sistema minerário.

Os estudos de caso apresentados a seguir são analisados sob a ótica das interferências geotécnicas entre estruturas, com ênfase nos mecanismos de interação e não na caracterização individual dos eventos.

2.1 Interferência Hidráulica entre Estruturas de Disposição e Contenção

O sistema integrado entre a Pilha de Estéril Permanente, seu sistema de drenagem e a Barragem do Fundão constitui um caso representativo de interferência geotécnica progressiva, no qual a interação hidráulica entre estruturas adjacentes controlou a evolução da instabilidade (Figura 1).



Figura 1 – Vista aérea da Barragem do Fundão após o rompimento [3]

De acordo com as investigações técnicas e estudos publicados sobre o evento, a contribuição contínua de fluxos provenientes dos drenos de fundo da pilha favoreceu a elevação do nível freático e a saturação progressiva da ombreira da barragem, alterando as condições de contorno originalmente previstas. As evidências disponíveis indicam que esse processo esteve associado à redução das tensões efetivas e à degradação da resistência ao cisalhamento, sendo potencialmente agravado pelos alteamentos sucessivos realizados em intervalos reduzidos, sem tempo suficiente para a dissipação das poropressões [4] [5].

Como consequência, o sistema evoluiu para uma condição crítica, culminando em ruptura associada à liquefação estática. O caso evidencia que a transferência hidráulica entre estruturas, particularmente de pilhas para barragens, pode controlar o comportamento global do sistema, configurando um mecanismo dominante de propagação de risco.

2.2 Interferência entre Estrutura de Disposição e Sistema de Contenção

O sistema formado pela pilha de co-disposição, estrutura de contenção hidráulica e infraestrutura viária associada representa um caso de interferência geotécnica sob forte restrição espacial, no qual a interação entre disposição de materiais e capacidade de contenção resultou em perda de desempenho do sistema (Figura 2).



Figura 2 – Vista aérea do sistema pilha Cachoeirinha-Dique Lisa (Mina Pau Branco) após o rompimento [6]

O deslizamento de bancos da pilha mobilizou material que atingiu diretamente o reservatório do dique (Figura 3), reduzindo sua capacidade hidráulica e induzindo extravasamento por galgamento. As evidências observadas indicam a ocorrência de um mecanismo acoplado pilha-dique, no qual a instabilidade da estrutura de disposição comprometeu diretamente a função da estrutura de contenção.



Figura 3 – Estruturas antes e após o rompimento da pilha [7], em junho de 2021 e após, em junho de 2022.

Como consequência, o fluxo gerado ultrapassou os limites operacionais e atingiu a infraestrutura a jusante, evidenciando que a perda de função hidráulica, mesmo sem ruptura estrutural, pode resultar em propagação de impactos para fora da área minerária. O caso demonstra a sensibilidade de sistemas acoplados sob restrição

espacial e a importância da compatibilização entre crescimento de pilhas e capacidade de contenção [8].

2.3 Interferência Geométrico-Hidráulica em Sistema de Lavra e Disposição

O presente caso corresponde a um empreendimento minerário analisado de forma anonimizada devido à confidencialidade operacional e contratual associada aos dados técnicos. Ainda assim, o caso foi incluído por representar, de forma particularmente clara, mecanismos de interferência geotécnica associados à incompatibilização espacial entre estruturas de lavra, disposição e contenção. Por essa razão, e diferentemente dos demais casos amparados em fontes públicas verificáveis, as relações de causa e efeito aqui descritas são apresentadas explicitamente como interpretação dos autores a partir do acervo disponível.

A análise da documentação técnica disponível indica a existência de forte interação entre estruturas de lavra superficial, disposição de estéreis, contenção de rejeitos e acessos subterrâneos, caracterizada pela proximidade entre os elementos do sistema e pela evolução progressivamente conflitante de suas geometrias operacionais.

Entre os elementos documentados, destacam-se a implantação de acessos subterrâneos em áreas adjacentes às estruturas de disposição e o desenvolvimento de frentes de lavra em proximidade direta com estruturas de contenção. Adicionalmente, observou-se o direcionamento preferencial da drenagem para o fundo da cava, favorecendo a ocorrência de surgências e a elevação dos níveis piezométricos em diferentes setores do empreendimento.

A interpretação integrada dessas evidências sugere a ocorrência de um mecanismo acoplado geométrico-hidráulico, no qual decisões de layout adotadas ao longo da evolução do empreendimento contribuíram para modificar as condições hidrogeológicas e geotécnicas originalmente previstas.

Como consequência, o sistema evoluiu para perda de viabilidade operacional, com inviabilização do retaludamento seguro, aumento do risco à estrutura adjacente, necessidade de reconfiguração geométrica parcial das estruturas de disposição e alteração da frente de lavra. O caso evidencia que decisões de *layout* não integradas podem induzir trajetórias progressivas de degradação sistêmica geotécnica e perda de desempenho hidráulico, particularmente em sistemas nos quais as condições hidrogeológicas e geomecânicas não são avaliadas de forma integrada [9].

2.4 Interferência entre Estrutura de Disposição e Meio Antrópico

Este caso representa uma interferência geotécnica entre estrutura de disposição e o meio antrópico adjacente, na qual a proximidade com áreas ocupadas ampliou significativamente as consequências da instabilidade [10].

A evolução da pilha sob regime operacional intensificado, associada a condições hidráulicas desfavoráveis e à ausência de reavaliações sistemáticas de estabilidade, resultou em um mecanismo de ruptura progressiva em massa. A combinação entre geometria elevada, heterogeneidade do material e drenagem insuficiente favoreceu a mobilização do maciço [11].

Como consequência, a instabilidade extrapolou os limites da área minerária, atingindo diretamente a comunidade e a infraestrutura associada. O caso evidencia que pilhas de disposição, mesmo em configuração a seco, podem atuar como fontes relevantes de risco sistêmico quando não consideradas de forma integrada ao entorno.



Figura 4 – Imagem aérea da Pilha Satinoco após o rompimento [12]

2.5 Interferência Hidráulica entre Sistemas Minerários e Rede Hidrográfica

Este caso representa uma interferência geotécnica e hidráulica entre estruturas minerárias distintas e o sistema hídrico regional, evidenciando a conectividade funcional entre empreendimentos vizinhos (Figura 5).



Figura 5 – Imagem aérea do extravasamento de sistema de drenagem de cava [13]

O extravasamento de sistema de drenagem de cava, operando próximo à sua capacidade sob condições hidrológicas intensas, resultou em escoamento não confinado e mobilização de grandes volumes de água e sedimentos. Esse processo caracteriza um mecanismo de sobrecarga hidráulica progressiva, no qual a função operacional da cava como reservatório entra em conflito com a segurança do sistema.

Como consequência, o fluxo atingiu estruturas operacionais adjacentes e cursos d'água a jusante, evidenciando a propagação de impactos em escala de bacia. O caso demonstra que sistemas de drenagem e contenção, mesmo quando considerados auxiliares, podem atuar como elementos críticos de transferência de risco entre estruturas, empreendimentos e o meio externo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa dos estudos de caso permitiu identificar padrões recorrentes de interferência geotécnica entre estruturas de mineração. Considerando os quatro eixos técnicos adotados — (i) geométrico, (ii) hidráulico, (iii) operacional e (iv) estrutural-construtivo, verificou-se que os mecanismos de instabilidade não atuam de forma isolada, mas resultam da interação progressiva entre diferentes componentes do sistema.

As evidências reunidas indicam que alterações operacionais, como aumento da produção, alteamentos sucessivos e modificações no layout, frequentemente induzem mudanças geométricas e hidráulicas capazes de alterar as condições originalmente previstas em projeto. Em diversos casos analisados, essas alterações favoreceram a elevação dos níveis piezométricos, modificaram os fluxos internos e

reduziram a eficiência dos sistemas de drenagem, contribuindo para a degradação progressiva das condições de estabilidade.

Embora os mecanismos específicos variem entre os casos, a comparação evidencia que pequenas alterações localizadas podem produzir respostas em estruturas adjacentes, reforçando o caráter interdependente dos sistemas minerários. Nesse contexto, os resultados sugerem que a estabilidade global depende não apenas do desempenho individual de cada estrutura, mas também da evolução das interações estabelecidas entre elas ao longo do tempo.

3.1 Padrões Recorrentes Identificados

A análise comparativa dos casos evidencia a recorrência de quatro padrões principais:

- Produção como vetor primário de risco: O aumento da taxa de disposição e alteamento atua como força dominante, reduzindo o tempo geotécnico disponível para dissipação de poropressões, acomodação estrutural e adaptação dos sistemas de drenagem [14].
- Subestimação das interferências hidráulicas: A transferência de fluxos entre estruturas (pilha → barragem, pilha → dique, cava → rio) e a perda progressiva de capacidade hidráulica são fatores sistematicamente subavaliados, apesar de seu papel central na redução das tensões efetivas.
- Ausência de reavaliações globais de estabilidade: Mudanças operacionais relevantes ocorrem sem revisões integradas do sistema, mantendo-se análises compartimentalizadas que não capturam o comportamento acoplado das estruturas.
- Transferência progressiva de risco: A instabilidade raramente permanece confinada à estrutura de origem, sendo transferida ao longo do sistema (pilha → barragem → cava → meio externo), um processo de propagação de risco.

A Tabela 1 apresenta a síntese comparativa das interferências identificadas, permitindo a visualização dos mecanismos dominantes e das trajetórias de transferência de risco entre estruturas.

Tabela 1 – Interferências encontradas em cada caso estudado

Caso Analisado	Interferência Geométrica	Interferência Hidráulica	Interferência Operacional	Interferência Estrutural	Mecanismo Dominante	Efeito Geotécnico Principal	Padrão De Transferência
Caso 1: Disposição, Drenagem e Contenção (Nível I)	Proximidade pilha–barragem e modificação de berma	Drenagem da pilha induzindo saturação da ombreira	Alteamento acelerado sem tempo geotécnico	Inserção de galeria em zona crítica	Saturação progressiva da fundação	Elevação de poropressões e perda de resistência	Pilha → Barragem
Caso 2: Disposição e Contenção Hidráulica (Nível III)	Expansão da pilha sobre área do reservatório	Redução da capacidade hidráulica do dique	Crescimento sem redimensionamento de drenagem	Fundação heterogênea não tratada	Sobrecarga hidráulica com aporte sólido	Galgamento e perda de função hidráulica	Pilha → Dique de Contenção
Caso 3: Lavra, Disposição e Contenção (Acesso Restrito)	Interferência direta entre cava, pilha e contenção	Concentração de fluxo no fundo da cava	Layout condicionado à produção	Taludes incompatíveis com litologia	Acoplamento geométrico–hidráulico	Instabilidade progressiva e inviabilização do sistema	Pilha → Cava → Barragem
Caso 4: Disposição Próxima a Área Ocupada (Nível II)	Elevada altura e proximidade com área ocupada	Condições de drenagem desfavoráveis	Intensificação da disposição	Estrutura subavaliada como crítica	Ruptura progressiva em massa	Mobilização do maciço e impacto externo	Pilha → Área Habitada
Caso 5: Sistemas Minerários e Rede Hidrográfica (Nível III)	Alta densidade e proximidade entre estruturas	Extravasamento e conectividade hídrica regional	Operação sob restrição espacial	Sistemas de drenagem críticos	Sobrecarga hidráulica em escala de bacia	Escoamento não confinado e propagação regional	Sistema → Hidrografia Regional

A leitura integrada da matriz comparativa evidencia que, independentemente do tipo de estrutura ou método de disposição, os eventos analisados compartilham um conjunto limitado de mecanismos recorrentes de degradação sistêmica.

Verifica-se que a interferência hidráulica se mostrou como um dos principais mecanismos de controle da estabilidade nos casos analisados, enquanto a interferência operacional atua como principal gatilho de instabilização. Em todos os casos, a perda de desempenho está associada à elevação não prevista de níveis piezométricos, ao aumento de fluxos internos e à redução da eficiência dos sistemas de drenagem.

Do ponto de vista geotécnico, isso implica que a estabilidade passa a depender fortemente do balanço hídrico global do sistema, além dos parâmetros clássicos de resistência, aspecto frequentemente não considerado de forma integrada nas análises convencionais [15].

Adicionalmente, observa-se que os sistemas analisados operam frequentemente em estado metaestável, no qual as condições de equilíbrio são mantidas sob margens reduzidas de segurança e forte dependência do regime hidráulico. Nesses cenários, pequenas perturbações, como eventos pluviométricos intensos, alterações geométricas ou incrementos de carga, são suficientes para desencadear processos de ruptura progressiva.

Outro aspecto crítico é a natureza cumulativa das interferências. As falhas não decorrem de eventos isolados, mas da superposição de modificações ao longo do tempo, o que é consistente com mecanismos de instabilidade progressiva e, em alguns casos, liquefação estática. De forma geral, observa-se uma sequência típica de evolução dos eventos, na qual gatilhos operacionais induzem alterações geométricas e hidráulicas, resultando em elevação de poropressões, perda de resistência e posterior propagação da instabilidade para estruturas adjacentes [16].

A proximidade física entre estruturas, frequentemente imposta por restrições espaciais, amplifica o acoplamento entre mecanismos, reduz a redundância do sistema e aumenta sua sensibilidade a perturbações externas. Como consequência, observa-se a ocorrência sistemática de transferência de risco entre estruturas, caracterizando cadeias de propagação que extrapolam os limites da estrutura inicialmente instabilizada.

3.2 Implicações para a Gestão de Riscos

Os resultados obtidos permitem estabelecer implicações diretas para a prática de engenharia geotécnica em mineração:

- A unidade de análise deve migrar da estrutura isolada para o sistema minerário integrado;
- Sistemas de drenagem devem ser tratados como infraestrutura crítica compartilhada;
- O tempo geotécnico (dissipação de poropressões, consolidação e adaptação hidráulica) deve ser incorporado explicitamente como variável de projeto;

- Alterações operacionais devem acionar gatilhos formais de reavaliação global de estabilidade;
- A gestão de riscos deve considerar cadeias de propagação de falha, e não apenas cenários locais.

3.3 Limitações do Estudo

O presente trabalho possui natureza qualitativa e baseia-se na análise comparativa de estudos de caso, com reconstrução de eventos a partir de dados públicos e documentação técnica disponível. A ausência de informações detalhadas de instrumentação, parâmetros geotécnicos e séries temporais limita a quantificação dos mecanismos identificados.

Adicionalmente, a simplificação inerente à categorização em eixos de interferência pode não capturar toda a complexidade dos processos físicos envolvidos, especialmente em sistemas altamente heterogêneos e dependentes de trajetória.

3.4 Perspectivas Futuras

As evidências obtidas indicam a necessidade de evolução das abordagens de análise geotécnica em mineração, com incorporação explícita de modelos capazes de representar a interação entre múltiplos fatores ao longo do tempo. Nesse contexto, destaca-se o potencial de desenvolvimento de ferramentas preditivas baseadas em análise multicritério, capazes de integrar variáveis geométricas, hidráulicas e operacionais sob condições de incerteza.

Adicionalmente, observa-se a necessidade de avanço na modelagem do balanço hídrico integrado em escala de empreendimento, considerando a conectividade entre estruturas e a variabilidade temporal associada a eventos climáticos extremos. A incorporação de conceitos da mecânica dos solos não saturados e de estados dependentes de trajetória constitui uma linha promissora para representação mais realista do comportamento desses sistemas.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de metodologias que permitam a definição de gatilhos operacionais baseados em indicadores de desempenho hidráulico e geotécnico, visando à transição de uma abordagem reativa para uma gestão preditiva de riscos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que a estabilidade de estruturas de mineração não pode ser adequadamente avaliada de forma isolada, sendo fortemente condicionada pelas interações entre elementos do sistema minerário.

Confirmou-se que as interferências atuam de forma acoplada, com a componente hidráulica como principal mecanismo de controle da estabilidade e os fatores operacionais, sobretudo o aumento de produção sem reavaliações integradas, como gatilhos de instabilização. Operando frequentemente em estado metaestável, os sistemas analisados propagam instabilidades inicialmente localizadas ao longo de

cadeias de transferência de risco entre pilhas, barragens, cavas e estruturas adjacentes.

Conclui-se, portanto, que abordagens baseadas exclusivamente na avaliação individual das estruturas tendem a subestimar os efeitos das interferências geotécnicas entre sistemas coexistentes. A incorporação de análises integradas, considerando conjuntamente a evolução geométrica, hidráulica e operacional, bem como os mecanismos de transferência de risco, representa um avanço importante para o planejamento e a gestão geotécnica dos empreendimentos de mineração.

5. PALAVRAS-CHAVE

Interferência Geotécnica; Planejamento Integrado; Gestão de risco; Expansão de minas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AGBOOLA, O. et al. A Review on The Impact of Mining Operation: Monitoring, Assessment and Management. Results in Engineering, v. 8, p. 100181. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100181.

[2] GRANGEIA, C. et al. Mine Tailings Integrated Investigations: The Case of Rio Tailings (Panasqueira Mine, Central Portugal). Engineering Geology, v. 123, n. 4, p. 359–372. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.10.001.

[3] G1 MINAS. Cidades afetadas por rompimento de barragem do Fundão terão verba para obras sanitárias. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/05/09/cidades-afetadas-por-rompimento-de-barragem-do-fundao-terao-verba-para-obras-sanitarias.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2026.

[4] SADREKARIMI, A.; RIVEROS, G. A. Static Liquefaction Analysis of the Fundão Dam Failure. Geotechnical and Geological Engineering, v. 38, p. 6431–6446, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-020-01446-8.

[5] STARK, T. D.; LIN, J.; GIMENES, E. A. Pore-water pressure accumulation during closely spaced earthquakes: Fundão Tailings Dam. Applied Earth Science, v. 132, n. 1, p. 16–35, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/25726838.2022.2147682.

[6] ZUBA, F. Imagens mostram momento em que o dique de mineradora transborda em Nova Lima, na Grande BH. G1 Minas, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/11/imagens-flagram-momento-em-que-o-dique-de-mineradora-transborda-em-nova-lima-na-grande-bh.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2026

[7] Google Earth (2026), Imagem Maxar Technologies.

[8] WICKLAND, B. E.; WILSON, G. W.; WIJEWICKREME, D. Hydraulic Conductivity and Consolidation Response of Mixtures of Mine Waste Rock and Tailings. Canadian

Geotechnical Journal, v. 47, n. 4, p. 472–485. 2010. DOI: https://doi.org/10.1139/T09-115.

[9] WATERHOUSE, J. Integrating Hydrogeology with Geotechnical Engineering. In: IMWA 2019 – Mine Water: Technological and Ecological Challenges. 2019. Disponível em: https://www.imwa.info/docs/imwa_2019/IMWA2019_Waterhouse_564.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

[10] BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Comunicado sobre deslizamento de pilha de rejeitos na Mina Turmalina, em Minas Gerais. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/comunicado-sobre-deslizamento-de-pilha-de-rejeitos-na-mina-turmalina-em-minas-gerais>. Acesso em: 11 maio 2026.

[11] ANM/SFI/COFAM, Marina Tietz. MINERAÇÃO EM FOCO – TRATATIVAS SOBRE PILHAS DE MINERAÇÃO. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/atuacao/ccr4/coordenacao/eventos/eventos-2025-1/oficina-tematica-201cmineracao-em-foco-dialogos-sobre-impactos-ambientais201d-1/oficina060225PGR.pdf>. Acesso em: 11 maio 2026.

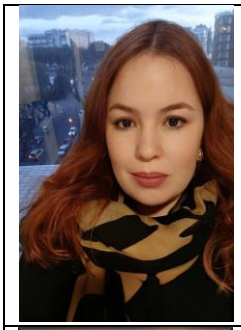
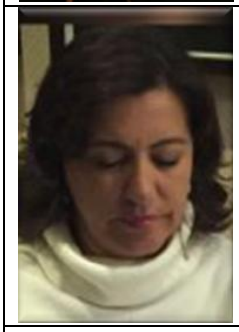
[12] MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS – MPMG. Mineradora pagará R$ 42 milhões em decorrência de danos causados por deslizamento de pilha de rejeitos em Conceição do Pará | Portal. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/mineradora-pagara-r-42-milhoes-em-decorrencia-de-danos-causados-por-deslizamento-de-pilha-de-rejeitos-em-conceicao-do-para.shtml>. Acesso em: 11 maio. 2026.

[13] COSTA, D. ANM e Defesas Civis avaliam transbordamento de água e sedimentos em mina da Vale entre Congonhas e Ouro Preto. CBN Brasil, São Paulo, 2026. Disponível em: <https://cbn.globo.com/brasil/noticia/2026/01/25/defesas-civis-avaliam-impactos-de-rompimento-de-dique-da-vale-entre-congonhas-e-ouro-preto.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2026.

[14] WANG, F. et al. Research on the static liquefaction failure of upstream tailings dams under continuous discharge conditions. Computers and Geotechnics, v. 176, p. 106785, 24 set. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106785.

[15] CAMPBELL, R.; MACKIE, D.; ANDERSON, W. Integrated Slope Stability Assessment in a Complex Geotechnical and Hydrogeological Setting. 2013. Disponível em: https://papers.acg.uwa.edu.au/d/1308_36_Campbell/36_Campbell.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

[16] OLSON, S. M.; STARK, T. D. Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727).

	**Luisa de Moura LEÃO** Engenheira Civil Geotécnica, doutora em Geotecnia (UFOP) e mestra em Saneamento e Geotecnia Ambiental (UFLA). Possui 8 anos de experiência em geotecnia aplicada à mineração, com atuação em segurança de barragens e pilhas, fechamento de minas, modelagem numérica e gestão de riscos com foco climático e normativo.
	**Marta Aparecida Sawaya MIRANDA** Geóloga/Geotécnica, mestra em Engenharia de Barragens (UFOP) e graduada em Geologia (UFMG). Possui mais de 20 anos de experiência em geotecnia de mineração, com atuação em segurança, auditoria de barragens, projetos de pilhas e descaracterização, incluindo estudos geológico-geotécnicos, hidráulicos e de liquefação. Auditora cadastrada na FEAM e ANM.
	**Lúcio Miranda CAMÊLO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas), especialista em barragens de rejeitos e membro da CBRR. Possui 13 anos de experiência em consultoria mineral, com atuação em planejamento de lavra, projetos geotécnicos, estudos de dambreak/stackbreak e estudos ambientais.
	**Marconi Bicalho CESCO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas) e mestrando em Engenharia Mineral (UFOP). Possui 13 anos de experiência em mineração, com atuação em gestão e operação de mina, planejamento de lavra e projetos de mineração e geotecnia.
	**Caio Araújo Borges Castro** Graduando em Engenharia de Minas (UFMG). Atua no apoio a estudos geotécnicos, análise de dados e elaboração de materiais técnicos, com foco em projetos geotécnicos.