

CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## TRATAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NO CONTEXTO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.XII-008>

Miler Pereira Alves (\*), Elaine Aparecida da Silva

\* IFPI, miler.alves@ifpi.edu.br

### RESUMO

A gestão segura de rejeitos de mineração tem se consolidado como um dos principais desafios da indústria mineral brasileira, sobretudo após a revisão do arcabouço normativo que restringe práticas tradicionais e impõe critérios mais rigorosos de estabilidade. Nesse contexto, este estudo aborda o marco regulatório nacional aplicável à segurança de barragens e discute a adoção das tecnologias de disposição de rejeitos denominadas *thickened tailings*, *paste tailings* e *dry stacking* como alternativas para mitigação do risco de liquefação. A metodologia baseou-se em análise documental da legislação vigente, levantamento bibliográfico especializado e confronto entre requisitos normativos e soluções tecnológicas. Os resultados indicam que as três técnicas apresentam potencial significativo para atendimento às exigências regulatórias, especialmente por promoverem a redução da água livre e da pressão de poros. Os rejeitos espessados configuram uma solução intermediária com ganhos relevantes de segurança, ainda que dependam de contenção. Os rejeitos em pasta oferecem maior estabilidade e homogeneidade, porém enfrentam limitações operacionais e de escala. O empilhamento a seco destaca-se como a alternativa mais segura, ao praticamente eliminar o potencial de liquefação, embora apresente elevados custos e desafios operacionais. Conclui-se que a escolha da tecnologia deve considerar variáveis específicas de cada empreendimento, sendo fundamental a integração entre inovação tecnológica, governança e conformidade regulatória para o avanço da segurança na mineração brasileira.

**PALAVRAS-CHAVE:** liquefação, rejeitos espessados, rejeitos em pasta, empilhamento a seco, estabilidade geotécnica.

### ABSTRACT

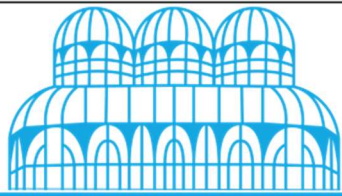
The safe management of mining tailings has become a major challenge for the Brazilian mining industry, particularly after regulatory changes that restrict traditional disposal methods and impose stricter stability criteria. In this context, this study analyzes the Brazilian regulatory framework for dam safety and discusses the adoption of tailings disposal technologies such as thickened tailings, paste tailings, and dry stacking as alternatives to mitigate liquefaction risks. The methodology was based on document analysis of current legislation, a specialized literature review, and a comparative assessment between regulatory requirements and technological solutions. The results indicate that all three techniques show significant potential to meet regulatory standards, mainly by reducing free water content and pore pressure. Thickened tailings represent an intermediate solution with relevant safety improvements, although still requiring containment structures. Paste tailings provide greater stability and homogeneity but face operational and scalability challenges. Dry stacking stands out as the safest alternative by virtually eliminating liquefaction potential, despite its high capital and operational costs. It is concluded that no single solution is universally applicable, and the selection of the most suitable technology must consider site-specific conditions. Ultimately, the integration of technological innovation, governance, and regulatory compliance is essential to enhance safety standards in Brazilian mining.

**KEY WORDS:** liquefaction, thickened tailings, paste tailings, dry stacking, geotechnical stability.

### INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados pela indústria mineral brasileira é o de gerir grandes volumes de rejeitos de forma segura. A ocorrência de incidentes e acidentes de grande magnitude já ocorridos no Brasil impuseram uma revisão estrutural nos métodos de disposição de rejeitos. Nesse contexto, a legislação brasileira estabelece diretrizes rigorosas para a eliminação de barragens de alteamento a montante e incentiva a adoção de tecnologias alternativas, as quais precisam ser devidamente gerenciadas com rigor técnico e transparência.

A demanda básica é de mitigar o risco de liquefação, a partir da adoção de métodos que reduzam a presença de água livre e a pressão dos poros. Entretanto, a transição para métodos de disposição “mais secos”, em muitos casos, necessita de altos investimentos em Capex e Opex, além de adaptações específicas para diferentes tipos de minério (Sousa, 2023; Guedes; Schneider, 2017). Considerando as exigências de estabilidade e governança ambiental contemporâneas, esse



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



estudo discute as soluções de *thickened tailings* (rejeitos espessados), *paste tailings* (rejeitos em pasta) e *dry stacking* (empilhamento a seco) no contexto da segurança de barragens.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é discutir o marco regulatório brasileiro de segurança de barragens no âmbito do tratamento de rejeitos e analisar o uso das tecnologias de *Thickened Tailings*, *Paste Tailings* e *Dry Stacking* como alternativas para mitigação de riscos de liquefação.

## METODOLOGIA

A primeira etapa, análise documental, consistiu na observação da Política Nacional de Segurança de Barragens - Lei 12.334 (Brasil, 2010), as alterações estabelecidas pela Lei 14.066 (Brasil, 2020), além das Resoluções da Agência Nacional de Mineração - ANM nº 13 (Brasil, 2019) e nº 95 (Brasil, 2022). Destas normativas foram extraídos os requisitos, no âmbito da segurança de barragens, que, direta ou indiretamente, estão relacionadas ao tratamento de rejeitos de mineração.

A segunda etapa - levantamento bibliográfico - consistiu na seleção de artigos, a partir da pesquisa com as palavras-chave, especialmente no google scholar e nos periódicos CAPES, "*tailings management, dry stacking, paste tailings, mine waste safety*", priorizando aqueles publicados nos últimos 10 anos. Desses artigos, foram extraídas as principais informações acerca de cada técnica estudada e as principais limitações.

A terceira etapa consistiu no confronto dos resultados obtidos nas duas etapas anteriores, a partir da análise de conteúdo sistemática. Deste modo, foi possível observar as principais vantagens e limitações de cada método e o alinhamento com a legislação vigente.

As ilustrações referentes ao funcionamento de cada técnica estudada neste trabalho foram realizadas por meio da Inteligência Artificial Generativa denominada *Copilot*, seguida de curadoria pelos autores. No *prompt* utilizado foram inseridas as especificações técnicas de cada uma das tecnologias apresentadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

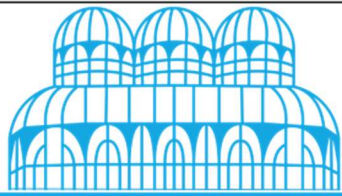
### Aspectos normativos da segurança de barragens aplicáveis ao tratamento de rejeitos de mineração

A Lei nº 14.066/2020, ao alterar a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) - Lei 12.334 (Brasil, 2010), introduziu no Artigo 17, inciso XVIII, a obrigação do empreendedor de avaliar alternativas locais e métodos construtivos, priorizando aqueles que garantam maior segurança. Nesse contexto, a legislação brasileira promoveu uma ruptura com métodos tradicionais de disposição hidráulica ao proibir a utilização do método de alteamento "a montante" em todo o território nacional. A Resolução ANM nº 13 (Brasil, 2019) define esse método como aquele em que "os maciços de alteamento se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado ou depositado, estando também enquadrados nessa categoria os maciços formados sobre rejeitos de reservatórios já implantados". Essa proibição, aliada à obrigatoriedade de descaracterização das estruturas existentes, cria a necessidade técnica imediata de alternativas que não dependam desse tipo de alteamento crítico.

Ademais, um dos pilares da Resolução ANM nº 13 (Brasil, 2019) é a exigência de análises de estabilidade rigorosas. Estudos de susceptibilidade à liquefação na condição não drenada devem apresentar um fator de segurança igual ou superior a 1,3 para resistência de pico. Essa exigência normativa valida a importância de tecnologias de tratamento de rejeitos que aumentem a densidade e reduzam a poropressão, fundamentais para garantir que os parâmetros de resistência exigidos sejam atingidos.

A Resolução ANM nº 13 (Brasil, 2019) também apresenta a definição de empilhamento drenado como "estruturas construídas hidráulica ou mecanicamente que configuram um maciço permeável com espelho d'água reduzido". Destaca que se esses empilhamentos forem construídos por disposição hidráulica e forem suscetíveis à liquefação, estarão sujeitos às mesmas obrigações rigorosas das barragens a montante e, nesse caso, conforme a Resolução ANM nº 95 (Brasil, 2022), devem ser cadastrados de imediato no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM). Entende-se, portanto, que esse é um incentivo a transição para métodos puramente mecânicos (como a filtragem para *Dry Stacking*) que eliminam a susceptibilidade à liquefação.

A nova redação dada à Portaria DNPM nº 70.389, através do Art. 15 da Resolução ANM 13 (Brasil, 2019), define que uma barragem descaracterizada é aquela que, entre outras etapas, concluiu o controle hidrológico e hidrogeológico para



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL  
9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório e garantiu a estabilização física e química de longo prazo das estruturas que permaneceram no local. As tecnologias de tratamento de rejeitos que mitiguem os riscos de liquefação são necessárias para atingir esse estado final de segurança exigido pelo regulador.

## Tecnologias para tratamento dos rejeitos

### *Thickened Tailings*

Essa técnica envolve o uso de espessadores de alta taxa ou de alta compressão para elevar o teor de sólidos do rejeito, geralmente variando entre 57% e 68% em peso, podendo variar em função das características granulométricas e mineralógicas do material (Fitton; Roshdich, 2013). Ao contrário da polpa convencional, os rejeitos espessados apresentam comportamento reológico não newtoniano que lhes permite formar depósitos com declividade (praias) entre 1% e 3% (figura 1). Conseqüentemente, essa característica permite que o rejeito seja armazenado em montes ou pilhas com barragens de perímetro significativamente menores em altura e volume, reduzindo a energia potencial em caso de ruptura. Ademais, o menor conteúdo de água livre no reservatório reduz os riscos relacionados à infiltração e pressão de poros na estrutura de contenção (Schutz, 2021).



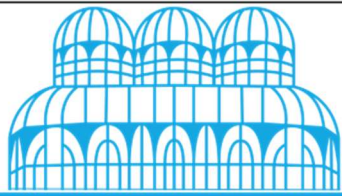
Figura 1 – Ilustração da técnica *Thickened Tailings*

Diferente dos rejeitos convencionais, o material espessado não é segregável, apresentando maior densidade inicial no momento da deposição. Com a redução do volume de água armazenada na estrutura da contenção ocorre a diminuição da pressão de poros e o gradiente de percolação, o que reduz significativamente o potencial de liquefação estática ou dinâmica e a mobilidade da massa em caso de falha. Todavia, é importante ressaltar que embora os diques iniciais possam ser menores, esse método ainda requer algum nível de contenção periférica. A estabilidade do depósito depende fortemente da manutenção de um ângulo de praia consistente, exigindo um controle rigoroso do processo de espessamento e do uso de floclantes (KGHM AJAX MINING INC., 2015).

No contexto brasileiro, apesar da técnica estar alinhada à legislação vigente, sobretudo no que concerne à proibição do método de alteamento a montante e estímulo de alternativas mais seguras, o principal desafio é o custo de infraestrutura e a demanda energética superior à disposição convencional (Bascetin *et al.*, 2016; Batista *et al.*, 2019).

### *Paste Tailings*

A pasta é uma forma avançada de espessamento, onde o conteúdo dos sólidos é elevado a níveis (geralmente 60 a 71%) que resultam em um material com consistência semelhante à uma pasta de dente (Fitton; Roshdich, 2013), conforme observado na ilustração (figura 2). No quesito segurança, a principal vantagem é que a separação mínima de água e sólidos após a deposição elimina a formação de grandes lagoas de decantação sobre o rejeito armazenado, que são frequentemente causas de instabilidade em barragens tradicionais. No que se refere à estabilidade operacional, devido à sua alta tensão de escoamento, a pasta requer sistemas de bombeamento de deslocamento positivo, mas o resultado final é um depósito muito mais estável e homogêneo que os depósitos de polpa (Schutz, 2021).



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Figura 2 – Ilustração da técnica *Paste Tailings*

A técnica apresentada também está alinhada aos preceitos estabelecidos na legislação quanto à segurança de barragens, visto que a pasta possui alta viscosidade e tensão de escoamento, o que lhe confere propriedade de suporte de carga superiores. Esse material resultante libera pouca água livre (*bleed water*), eliminando os riscos de pressões neutras excessivas e tornando o material menos suscetível à liquefação. Um dos maiores desafios associados a *paste tailings* é o transporte, o qual exige bombas de deslocamento positivo de alto custo, visto que o material não é transportável por sistemas centrífugos convencionais. Além disso, a implementação em alta escala produtiva é considerada arriscada e pouco comprovada para depósitos de superfície de grande porte. No contexto brasileiro um dos grandes desafios é referente a grande variabilidade mineralógica, que pode dificultar a produção de uma pasta consistente. A incerteza operacional em grandes volumes torna o licenciamento ambiental mais complexo para projetos de larga escala (Batista et al., 2019; KGHM AJAX MINING INC., 2015).

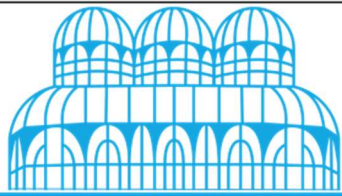
### Dry Stacking

O empilhamento a seco é considerado a solução superior em termos de segurança sustentável e consiste na desidratação intensiva dos rejeitos através de tecnologias de filtragem (como prensas de filtro ou filtros a vácuo) até atingirem um teor de sólidos superior a 85%, permitindo o transporte por caminhões ou correias e a compactação mecânica. O material resultante possui um teor de umidade baixo, tipicamente entre 13% e 17%, comportando-se como um sólido úmido. Uma das grandes vantagens dessa técnica é que permite que os rejeitos sejam empilhados e compactados em aterros mecanizados (figura 3), eliminando a necessidade de grandes barragens de retenção de água (Hahn; Dobler, 2025).



Figura 3 - Ilustração da técnica *Dry Stacking*

Um dos grandes perigos em barragens de rejeitos é a liquefação estática ou sísmica. O *Dry Stacking*, quando realizado com compactação adequada e controle de umidade, produz um material com comportamento dilatante e potencial de liquefação muito baixo, garantindo a estabilidade da instalação mesmo em áreas sísmicas. Ademais, do ponto de vista da



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026



segurança ambiental, a redução drástica de água livre minimiza a probabilidade de infiltração de contaminantes no lençol freático e reduz a área de pegada do depósito, facilitando o fechamento progressivo da mina. (Schutz, 2021).

O material é disposto em estado não saturado e compactado até atingir densidades elevadas (grau de compactação usual >95%). As estruturas compactadas tendem a apresentar comportamento dilatante, aumentando a resistência ao cisalhamento durante o carregamento. Embora essa seja a técnica mais segura contra a liquefação, o *dry stacking* possui os maiores custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) devido à planta de filtragem e a logística de transporte. Adicionalmente, a operação é sensível a condições climáticas, como chuvas intensas, que podem prejudicar a trafegabilidade e a compactação, o que pode representar um desafio para implementação em algumas regiões do Brasil. Outro desafio é o da escala, visto que o Brasil possui minas com produções massivas onde o empilhamento a seco ainda não foi totalmente testado (Cirio, 2025; KGHM AJAX MINING INC., 2015).

## CONCLUSÕES

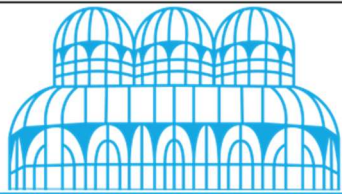
A análise integrada do arcabouço normativo brasileiro e das tecnologias de tratamento de rejeitos evidencia uma mudança paradigmática na gestão de estruturas de disposição, impulsionada sobretudo pela necessidade de mitigação dos riscos de liquefação e pela elevação dos padrões de segurança exigidos. A proibição do alteamento a montante e a imposição de critérios mais rigorosos de estabilidade consolidam um ambiente regulatório que não apenas restringe práticas historicamente utilizadas, mas também induz a adoção de soluções tecnológicas mais seguras e alinhadas às melhores práticas internacionais. Nesse contexto, as tecnologias de *thickened tailings*, *paste tailings* e *dry stacking* demonstram elevado potencial para atendimento às exigências normativas, especialmente por promoverem a redução da água livre e da poropressão nos depósitos.

Os rejeitos espessados (*thickened tailings*) representam uma solução intermediária viável, com ganhos relevantes em segurança quando comparados à disposição convencional, embora ainda dependam de estruturas de contenção e de rigoroso controle operacional. Os rejeitos em pasta (*paste tailings*) apresentam desempenho superior no controle da segregação e da água livre, contribuindo significativamente para a estabilidade geotécnica, mas enfrentam limitações relacionadas ao transporte, à escala e à variabilidade mineralógica. O empilhamento a seco (*dry stacking*) configura-se como a alternativa mais segura sob a ótica da estabilidade física e da redução do potencial de liquefação, ao eliminar praticamente a saturação do material. Contudo, seus elevados custos e desafios operacionais, especialmente em larga escala e sob condições climáticas adversas, ainda restringem sua ampla adoção no Brasil.

Dessa forma, conclui-se que não existe uma solução única e universalmente aplicável, sendo necessária a adoção de abordagens específicas para cada empreendimento, considerando variáveis como tipo de minério, escala de produção, condições climáticas e viabilidade econômica. Por fim, ressalta-se que a efetiva transição para métodos mais seguros não depende apenas da escolha tecnológica, mas também de uma gestão integrada que envolva planejamento de longo prazo, governança efetiva, monitoramento contínuo e transparência. Nesse cenário, o avanço tecnológico aliado ao rigor regulatório tende a consolidar um novo padrão de segurança na mineração brasileira, reduzindo significativamente os riscos associados às barragens de rejeitos.

## REFERÊNCIAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre a segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2026.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, DF: ANM, 2019. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=381453>. Acesso em: 6 mar. 2026.
3. BASCETIN, A. et al. **New Technologies on Mine Process Tailing Disposal**. *Journal of Geological Resource and Engineering*, [s. l.], v. 2, p. 63-72, 2016. DOI: 10.17265/2328-2193/2016.02.002.
4. BATISTA, Larissa Pedrosa; ALEXANDRINO, Júnia Soares; BARROS, Adriano José de; FERREIRA, Telma Ellen Drumond; CRUZ, Tatiana Valeria Mendes da. **Estudo de caso comparativo dos métodos de disposição de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais - Brasil**. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, [S. l.], abr. 2019. Disponível em: <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/04/rejeito-mineracao-brasil.html>. Acesso em: 02 abr. 2026.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



5. BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/L12334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/L12334.htm). Acesso em: 6 mar. 2026.
6. BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm). Acesso em: 6 mar. 2026.
7. BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017.** Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece diretrizes para o Plano de Segurança de Barragens. Brasília, DF: DNPM, 2017.
8. FITTON, Timothy; ROSHDIEH, Arash. **Filtered tailings versus thickened slurry: four case studies.** In: INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, 16., 2013, Perth. *Proceedings...* Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. ISBN 9780987093769. Disponível em: [https://doi.org/10.36487/acg\\_rep/1363\\_21\\_fitton](https://doi.org/10.36487/acg_rep/1363_21_fitton). Acesso em: 6 mar. 2026.
9. GUEDES, G.; SCHNEIDER, C. A. **A busca das melhores opções tecnológicas para evitar acidentes.** Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2017. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/periodicos/2017/saneamento-ambiental.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2026.
10. HAHN, Jorgen; DOBLER, Timo. A case study showing the reduction of capex and opex by filtering fine and coarse fractions separately. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASTE, THICKENED AND FILTERED TAILINGS (PASTE 2025), 27., 2025, Swakopmund. *Anais...* Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2025. p. 399–412. DOI: 10.36487/ACG\_repo/2555\_28.
11. KGHM AJAX MINING INC. **Tailings disposal best available technology assessment.** Revision 1. 27 Aug. 2015. [S.l.]: KGHM Ajax Mining Inc., 2015.
12. MESSIAS, Gabriel Ribeiro Drumond e Sousa. Utilização de metodologias inovadoras como uso alternativo à disposição de rejeitos em barragens. 2023. **Monografia (Graduação em Engenharia de Minas)** – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.
13. SCHÜTZ, Didier L. **Tailings & Tailings Management Facilities (TMF) Handbook.** [S.l.]: SCOR Global P&C, 2021.