



Estabilidade de Estruturas de Disposição de Rejeitos: Análise dos Fatores de Segurança Mínimos à Luz das Normas Brasileiras e Recomendações Internacionais

Robert Nagai Gonçalves da Cruz

Engenheiro Civil, PPGEC, UFSC, Florianópolis, Brasil, robertnagaig@gmail.com

Helena Paula Nierwinski

Professora, PPGEC, UFSC, Florianópolis, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Lúcio Flávio de Souza Villar

Professor, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em estruturas de disposição de rejeitos na mineração, como barragens e pilhas de rejeito e/ou estéril, é essencial para a segurança operacional dessas estruturas, o que torna imprescindível o atendimento às normas brasileiras e diretrizes internacionais. Essa exigência decorre da necessidade de alinhamento com boas práticas de engenharia reconhecidas mundialmente e da crescente exigência de órgãos fiscalizadores e investidores por critérios mais conservadores de segurança. A partir da comparação entre critérios adotados por órgãos internacionais, como a *Canadian Dam Association* (CDA, 2019) e o *Australian National Committee on Large Dams* (ANCOLD, 2019), e os parâmetros estabelecidos pelas normas brasileiras NBR 13.028 (ABNT, 2024a) e NBR 13.029 (ABNT, 2024b), este trabalho propõe uma análise comparativa dos valores mínimos de fator de segurança a serem adotados em diferentes cenários de análise - estático, pseudoestático e não drenado - considerando tanto resistência de pico quanto residual. Essa análise busca evidenciar eventuais divergências entre os referenciais normativos e discutir a suficiência ou a necessidade de maior rigor nos critérios nacionalmente adotados, à luz de acidentes recentes e de contextos geotécnicos complexos. Também são abordadas as diretrizes da Agência Nacional de Mineração (ANM), especialmente a Resolução nº 95 (ANM, 2022) e suas atualizações por meio das Resoluções nº 130 (ANM, 2023) e nº 175 (ANM, 2024), que consolidam as exigências regulatórias para estruturas de mineração no Brasil. O objetivo deste artigo é fornecer subsídios técnicos, a partir da análise comparativa entre as diretrizes normativas de fator de segurança, para auxiliar na tomada de decisão quanto à adoção dos critérios mais adequados em análises de estabilidade de taludes em obras de mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes; Fator de segurança; Barragens de rejeito; Pilha de rejeito e/ou estéril.

ABSTRACT: Slope stability in mine waste disposal structures, such as tailings dams, dry stack tailings facilities, and waste rock dumps, is critical to their operational safety, making compliance with Brazilian standards and international guidelines essential. This requirement stems from the need to align with globally recognized engineering best practices and the increasing demands from regulatory agencies and investors for more conservative safety criteria. This study presents a comparative analysis of minimum safety factor values adopted by international organizations, such as the Canadian Dam Association (CDA, 2019) and the Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD, 2019), alongside Brazilian standards NBR 13.028 (ABNT, 2024a) and NBR 13.029 (ABNT, 2024b). The analysis covers different scenarios - static, pseudostatic, and undrained - considering both peak and residual shear strength parameters. The goal is to identify divergences among normative references and discuss the adequacy or need for increased rigor in national criteria, especially in light of recent failures and complex geotechnical contexts. Additionally, this work addresses the guidelines of the Brazilian National Mining Agency (ANM), particularly Resolution No. 95 (ANM, 2022) and its updates through Resolutions No. 130 (ANM, 2023) and No. 175 (ANM, 2024), which consolidate regulatory requirements for mining structures in Brazil. The objective is to provide technical support for decision-making regarding the adoption of the most appropriate safety factor criteria in slope stability analyses for mining works.



KEYWORDS: Slope stability; Safety factor; Tailings dams; Dry stack tailings; Waste rock dumps.

1 INTRODUÇÃO

Os padrões internacionais de segurança para estruturas de disposição de rejeitos evoluíram significativamente nas últimas décadas, impulsionados por acidentes de grande impacto e pelo aumento da pressão social, ambiental e regulatória. Estudos de referência, como o de Schnaid *et. al.* (2020), discutem extensivamente o contexto normativo, os princípios de governança e as boas práticas recomendadas por organizações internacionais, incluindo o *International Council on Mining and Metals* (ICMM) e comissões técnicas como ANCOLD (2019) e CDA (2019). Entretanto, observa-se na prática profissional uma demanda por sínteses objetivas que consolidem os principais parâmetros normativos em termos quantitativos, especialmente os fatores de segurança mínimos recomendados em diferentes condições de análise.

A estabilidade de taludes em estruturas de disposição de rejeitos na mineração, como barragens e pilhas de rejeito e/ou estéril, constitui um requisito fundamental para garantir a segurança operacional e ambiental dessas obras. No Brasil, as normas NBR 13.028 (ABNT, 2024a) e NBR 13.029 (ABNT, 2024b), juntamente com as diretrizes da Agência Nacional de Mineração (ANM), consolidadas na Resolução nº 95 (ANM, 2022) e suas atualizações (nº 130, ANM, 2023 e nº 175, ANM, 2024), estabelecem requisitos que buscam alinhar as práticas nacionais a padrões internacionais de referência.

Diante da diversidade de cenários de análise de estabilidade - condições estáticas, pseudoestáticas (sísmicas) e não drenadas - e da possibilidade de adoção de parâmetros de resistência de pico ou residual dos materiais do modelo, torna-se essencial compreender em que medida os critérios brasileiros convergem ou divergem dos referenciais internacionais. Assim, este trabalho propõe uma análise comparativa dos valores mínimos de fator de segurança estabelecidos por normas e diretrizes nacionais e internacionais, buscando evidenciar possíveis lacunas, inconsistências ou oportunidades de aprimoramento dos critérios atualmente vigentes.

Ao sistematizar essas informações, o presente artigo pretende facilitar a consulta a parâmetros de projeto para a definição de fatores de segurança recomendados para estruturas geotécnicas.

2 REVISÃO NORMATIVA

A definição de requisitos técnicos para garantir a estabilidade de barragens de mineração, pilhas de estéril e demais estruturas de disposição de rejeitos no Brasil baseia-se em um conjunto de normas, resoluções regulatórias e guias complementares de caráter técnico e socioambiental. Essa regulamentação estabelece parâmetros mínimos de projeto, construção, monitoramento e operação, buscando alinhamento com referências internacionais de boas práticas.

2.1 Diretrizes Brasileiras

No Brasil, a regulamentação técnica para projetos, construção, operação e fechamento de estruturas de disposição de rejeitos, como barragens e pilhas de estéril, é composta por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resoluções específicas da Agência Nacional de Mineração (ANM) e diretrizes complementares de caráter técnico e socioambiental. Os principais documentos de referência considerados neste trabalho são apresentados a seguir:

NBR 13.028 (ABNT, 2024a)

Estabelece requisitos técnicos para projeto, construção, operação e descomissionamento de barragens de mineração. Define critérios mínimos para estudos geotécnicos, investigações de campo, análises de estabilidade de taludes em diferentes condições de carregamento (estático, pseudoestático e não drenado) e valores mínimos de fator de segurança a serem adotados em cada fase da estrutura.



NBR 13.029 (ABNT, 2024b)

Define requisitos técnicos para a elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilhas, abrangendo diretrizes para caracterização geotécnica dos materiais, métodos construtivos, sistemas de drenagem, monitoramento e critérios de estabilidade. A norma estabelece parâmetros mínimos para análise de estabilidade em diferentes condições operacionais, com foco na segurança e na gestão adequada dos materiais de estéril. Não há, até o momento, uma normativa específica para pilhas de rejeito e de estéril e rejeito (FDTE; AECOM, 2024).

Resoluções ANM nº 95/2022, 130/2023 e 175/2024

A Resolução ANM nº 95 (ANM, 2022) estabelece procedimentos para a gestão da segurança de barragens de mineração, detalhando responsabilidades, prazos de inspeção, revisões periódicas de estabilidade e comunicação de riscos. As Resoluções nº 130 (ANM, 2022) e nº 175 (ANM, 2022) atualizam e complementam as exigências, incluindo disposições sobre auditorias externas independentes, planos de ação emergencial e reforço nos critérios mínimos de fator de segurança, alinhando as práticas nacionais a padrões internacionais mais conservadores.

Diretrizes Técnicas e Socioambientais para Projetos de Pilhas de Rejeitos de Mineração (FDTE; AECOM, 2024)

Este manual técnico, elaborado pela FDTE em parceria com a AECOM do Brasil e promovido pelo Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MPMG), tem caráter orientativo e foi desenvolvido para apoiar a elaboração de projetos de pilhas de rejeitos, considerando não apenas os aspectos geotécnicos, mas também as exigências socioambientais e de gestão de riscos. O documento apresenta recomendações para planejamento, execução e monitoramento de pilhas, incluindo orientações para definição de fatores de segurança mínimos em função do tipo de material, das condições de drenagem e do contexto local (FDTE; AECOM, 2024).

2.2 Diretrizes Internacionais

Diversas organizações internacionais especializadas estabelecem diretrizes técnicas para garantir a estabilidade física de estruturas de disposição de rejeitos, com foco em fatores de segurança conservadores, boas práticas de projeto, construção, operação e fechamento. Os principais documentos de referência considerados neste trabalho são apresentados a seguir:

ANCOLD - Guidelines on Tailings Dams - Planning, Design, Construction, Operation and Closure - Revision 1 (ANCOLD, 2019)

O *Australian National Committee on Large Dams* (ANCOLD) publica diretrizes amplamente reconhecidas para barragens de rejeitos, abrangendo todas as fases do ciclo de vida da estrutura. O documento de 2019 detalha critérios de projeto, seleção de parâmetros de resistência, abordagem de cenários pseudoestáticos (sísmicos) e estabelece fatores de segurança recomendados para diferentes níveis de risco.

Canadian Dam Association - Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams (CDA, 2019)

O *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*, publicado pela *Canadian Dam Association* (CDA, 2019), é referência para projetos de barragens de rejeitos no Canadá e em empreendimentos que buscam padrões internacionais equivalentes. O guia apresenta recomendações para análise de estabilidade em condições normais, extremas e sísmicas, incluindo fatores de segurança mínimos e práticas de monitoramento e inspeção.



2 0 2 5

ICMM - Global Industry Standard on Tailings Management (ICMM, 2020)

O *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISMT), elaborado pelo *International Council on Mining and Metals* (ICMM) em conjunto com o UNEP e o *Principles for Responsible Investment* (PRI), define princípios para governança, gestão de riscos e desempenho técnico de estruturas de rejeitos. Embora não estabeleça valores numéricos fixos de fator de segurança, o documento exige que sejam adotados critérios alinhados a referências internacionais reforçando a necessidade de justificativas técnicas claras e auditorias independentes.

3 COMPILAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA

Nesta seção, são apresentados os fatores de segurança mínimos recomendados pelos principais documentos normativos e diretrizes técnicas, nacionais e internacionais, organizados por condição de análise - estática, pseudoestática (sísmica), rebaixamento rápido, pós-sísmica e não drenada - com a indicação, quando pertinente, do tipo de resistência ao cisalhamento não drenada considerada (pico ou residual), para análises de estabilidade em duas dimensões (2D). O objetivo é facilitar a comparação direta entre os critérios, apoiar a verificação de convergências e diferenças entre as referências consultadas e subsidiar discussões sobre eventuais lacunas normativas. As condições de análise mencionadas são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Definição das Condições de Análise

Condição de Análise	Descrição
Estática	Corresponde à análise de estabilidade em condições normais de operação, sem ação sísmica ou carregamentos excepcionais, utilizando geralmente parâmetros efetivos de resistência provenientes de condições de carregamento drenadas.
Pseudoestática	Abrange situações de carregamento sísmico ou vibrações induzidas, avaliadas por meio de coeficientes de pseudoaceleração aplicados como forças estáticas equivalentes.
Não drenada	Aplica-se a materiais saturados submetidos a carregamentos rápidos, nos quais não há tempo suficiente para dissipação das pressões neutras - exige uso de parâmetros de pico ou residual obtidos de ensaios não drenados, conforme o caso.
Rebaixamento rápido	Refere-se a cenários em que há a descida rápida do nível d'água no reservatório.
Pós-sísmico	Trata da estabilidade após a ocorrência de sismos, considerando possíveis reduções de resistência ou mobilização de condições residuais ou liquefeitas.

Na Tabela 2 são apresentados os fatores de segurança mínimos recomendados para barragens de rejeitos, enquanto na Tabela 3 são apresentados os critérios sugeridos para pilhas de estéril com destaque para eventuais diferenças entre as referências consultadas.

Tabela 2. Fatores de segurança mínimos recomendados por normas e diretrizes para Barragens de Rejeitos

Condição de Análise	NBR 13.028 (ABNT, 2024a)	ANCOLD (2019)	CDA (2019)	Res. ANM nº 95/2022
Estática Drenada	1,5 ⁽¹⁾	1,5	1,5	-
Estática Não Drenada (Resistência de Pico)	1,3 ⁽²⁾	1,5 / 1,3 ⁽³⁾	1,3 ⁽⁵⁾	1,3 / 1,5 ⁽⁷⁾



Condição de Análise	NBR 13.028 (ABNT, 2024a)	ANCOLD (2019)	CDA (2019)	Res. ANM nº 95/2022
Pseudoestática (Sísmico)	1,1	-	1,0 ⁽⁶⁾	-
Rebaixamento rápido	1,1		1,3	-
Pós-Sísmico⁽⁸⁾ (Resistência Residual)	-	1,0 - 1,2 ⁽⁴⁾	1,2	-

Nota 1: Operação com rede de fluxo em condição do N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor).

Nota 2: Operação com rede de fluxo em condição do N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor) com resistência não drenada de pico.

Nota 3: Condição estática não drenada de curto prazo, com fator de segurança 1,5 para casos com potencial de perda de contenção e 1,3 para casos sem risco de perda de contenção.

Nota 4: Deve estar relacionada à confiança na seleção da resistência ao cisalhamento residual. O valor 1,0 pode ser adequado para uso com resultados de limite inferior.

Nota 5: Condição estática não drenada de curto prazo, com fator de segurança 1,3 para casos sem risco de perda de contenção.

Nota 6: A menos que as deformações causadas pelo carregamento sísmico sejam avaliadas e consideradas aceitáveis

Nota 7: Para estruturas com presença de comunidade na Zona de Autossalvamento (ZAS), quando mantidas mediante obras de reforço, recomenda-se Fator de Segurança (FS) $\geq 1,50$ na condição não drenada, utilizando resistência de pico.

Nota 8: Resistência ao cisalhamento não drenada/drenada cicличamente reduzida e/ou resistência ao cisalhamento residual liquefeita para materiais que apresentam potencial de liquefação.

Tabela 3. Fatores de segurança mínimos recomendados para Pilhas de Estéril

Condição de Análise	NBR 13.029 (ABNT, 2024b)
Estática Drenada - Ruptura Global	1,5 ⁽¹⁾
Estática Drenada - Ruptura de talude entre bermas	1,3 / 1,5 ⁽¹⁾

Nota 1: Ruptura de talude nos cenários operacional e definitivo/fechamento.

Com base nos dados das Tabelas 2 e 3, observa-se maior uniformidade entre as referências para as análises estáticas drenadas, refletindo práticas consolidadas no setor. Já os fatores de segurança para cenários sísmicos, não drenados e de rebaixamento rápido ainda apresentam variações importantes, reforçando a necessidade de justificativa técnica adequada para os valores adotados.

Embora a NBR 13.029 (ABNT, 2024b) apresente diretrizes específicas para pilhas de estéril, sua abrangência ainda é limitada, sobretudo em relação a aspectos detalhados de fatores de segurança. Grande parte dos documentos técnicos e diretrizes disponíveis indicam valores mínimos de fator de segurança baseados na NBR 13.028 (ABNT, 2024a), norma voltada para barragens, e estes são frequentemente aplicados, por analogia, às pilhas de rejeitos e/ou estéril, como apresentado no manual de Diretrizes Técnicas e Socioambientais para Projetos de Pilhas de Rejeitos de Mineração (FDTE; AECOM, 2024), para os demais cenários (pseudoestático e não drenado – com resistência ao cisalhamento de pico e residual).

Essa sobreposição evidencia uma lacuna normativa e técnica no Brasil, já que não existem, até o momento, documentos específicos que abordem integralmente os critérios de estabilidade para pilhas de disposição de rejeitos. Essa ausência reforça a necessidade de aprimoramento e/ou atualização de normativas específicas para garantir maior segurança e confiabilidade nas estruturas de disposição em pilhas, as quais vêm ganhando ascensão como alternativa às barragens tradicionais de rejeitos.

É importante ressaltar que a NBR 13.028 (ABNT, 2024a) não se aplica retroativamente a estruturas existentes, especialmente barragens de rejeitos alteadas a montante ou em processo de descaracterização. Nesses casos, a aplicação direta da norma poderia resultar na adoção de fator de segurança (FS) 1,3 na condição não drenada, em desacordo com a exigência da ANM (2022) de FS $\geq 1,5$ para estruturas com



presença de comunidade na Zona de Autossalvamento (ZAS) mantidas mediante obras de reforço. Essa situação evidencia a necessidade de análise criteriosa da normativa aplicável e interpretação técnica adequada.

Em termos de prática profissional, a adoção de critérios de FS mínimo em projetos de barragens e pilhas de estéril requer fundamentação técnica e análise contextual, garantindo alinhamento às melhores práticas recomendadas por normas nacionais, diretrizes internacionais e exigências dos órgãos reguladores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados indicam que os fatores de segurança mínimos previstos nas normas brasileiras estão, em geral, alinhados aos principais referenciais internacionais para análises estáticas, evidenciando um avanço importante na harmonização das boas práticas de engenharia. Contudo, identificam-se oportunidades de aprimoramento especialmente no que se refere à padronização dos critérios em análises pseudoestáticas, não drenadas e em cenários envolvendo resistência residual - temas que ainda carecem de detalhamento consistente na regulamentação vigente.

Embora a NBR 13.029 (ABNT, 2024b) apresente diretrizes para pilhas de estéril, sua abrangência permanece limitada, e grande parte das referências técnicas com aplicação analógica para pilhas de rejeito e/ou estéril ainda se baseia em normas direcionadas a barragens, como a NBR 13.028 (ABNT, 2024a). Essa sobreposição evidencia uma lacuna normativa e técnica importante no Brasil, sobretudo considerando a crescente adoção de pilhas de rejeitos como alternativa às barragens tradicionais. Vale destacar que, embora os fatores de segurança definidos para barragens sejam frequentemente aplicados por analogia às pilhas de estéril e rejeitos, as diferenças de configuração geométrica, mecanismos de ruptura e níveis de consequência potencial podem exigir critérios específicos para garantir segurança adequada e proporcional ao risco. Tal cenário reforça a necessidade de desenvolvimento, aprimoramento e atualização de normas específicas para pilhas, garantindo maior segurança e confiabilidade dessas estruturas para os diversos cenários de disposição.

Para estruturas existentes é fundamental considerar a aplicação adequada da normativa vigente, evitando retroatividade que possa gerar inconsistências regulatórias. A escolha dos fatores de segurança mínimos deve ser sempre baseada em critérios técnicos claros, alinhados às melhores práticas nacionais e internacionais, visando garantir segurança operacional e consistência na tomada de decisão.

Embora o presente artigo apresente uma sistematização e resumo das recomendações contidas em normas e diretrizes, é fundamental destacar que as fontes originais não devem ser ignoradas. Para projetos específicos e análises detalhadas, a consulta direta aos documentos normativos é imprescindível, garantindo a interpretação e aplicação dos critérios técnicos, além da atualização frente a eventuais revisões. Além disso, recomenda-se que os profissionais considerem outras normativas complementares relacionadas à geotecnia, segurança de barragens, meio ambiente e gestão de riscos, a fim de assegurar uma abordagem integrada e abrangente, alinhada às melhores práticas nacionais e internacionais.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Mineração (2022). *Resolução nº 95/2022 – Estabelece Procedimentos para Gestão da Segurança de Barragens de Mineração*. Brasília, DF.

Agência Nacional de Mineração (2023). *Resolução nº 130/2023 – Atualiza Disposições sobre Auditorias e Planos de Ação Emergencial*. Brasília, DF.

Agência Nacional de Mineração (2024). Resolução nº 175/2024 – *Dispõe sobre Critérios de Fator de Segurança e Requisitos Complementares*. Brasília, DF.

ANCOLD (2019). *Guidelines on Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation and Closure – Revision 1*. Australian National Committee on Large Dams, Hobart.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024a). NBR 13.028. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024b). NBR 13.029. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha*.

Canadian Dam Association (2019). *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams – Revision*. Toronto, Canadá.

Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia – FDTE; AECOM do Brasil (2024). *Diretrizes Técnicas e Socioambientais para Projetos de Pilhas de Rejeitos de Mineração*. Ministério Público do Estado de Minas Gerais – MPMG, Belo Horizonte.

International Commission on Large Dams (2016). *Bulletin 154 – Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle*. Paris.

International Council on Mining and Metals (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. Londres.

Schnaid, F., Mello, L.G.F.S., Dzialoszynski, B.S. (2020) *Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams*. *Soils and Rocks*, 43 (3), p. 369–395. DOI: 10.28927/SR.433369.