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/COBRAMSEG2026.1/54

Monitoramento, instrumentação e alerta: limites do modelo brasileiro e caminhos para um sistema integrado de resposta rápida

Michelle Cristina dos Reis Braga
MSc. Engenharia Ambiental, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, michelle_crb@yahoo.com.br

Danilo Manata Eloi
Senior Geotechnical Consultant, WSP Canada, Vancouver, Canada, danilo.eloi@wsp.com

RESUMO: A regulamentação vigente da Agência Nacional de Mineração (ANM) dispõe sobre uma série de exigências técnicas para barragens classificadas como DPA alto, incluindo monitoramento automatizado, redundância de energia, vídeo-monitoramento ativo, registros contínuos, armazenamento mínimo de 90 dias de dados e sistemas de alerta com sirenes instaladas fora da mancha de inundação. Embora essas medidas representem avanço significativo, sua aplicação prática demonstra desafios operacionais que podem comprometer a eficácia real do sistema de resposta. Em contraste, modelos internacionais como os adotados no Canadá, Estados Unidos e Austrália enfatizam sistemas híbridos, combinando monitoramento automático, supervisão humana contínua, análise probabilística de tendência e integração com protocolos estruturados de tomada de decisão. Além disso, grande parte dos empreendimentos ainda não dispõe de modelos robustos de *early warning* que integrem dados de instrumentação aos protocolos de emergência, limitando a capacidade de acionar alertas com base em limiares dinâmicos de comportamento. O trabalho discute também a ausência de integração plena entre instrumentação automatizada, paineis de risco, controle operacional e diretrizes de quem aciona o sistema de alerta. A partir dessa análise, propõe-se um caminho para evolução do modelo brasileiro, com foco em padronização de limiares operacionais, integração entre dados automáticos e modelos de risco, ampliação da redundância sistêmica e fortalecimento da governança de resposta rápida.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento de barragens; governança; limitações; integração de dados; alerta; práticas internacionais.

ABSTRACT: The current regulations of the National Mining Agency (ANM) stipulate a series of technical requirements for dams classified as having a high potential for flood damage (PDD), including automated monitoring, energy redundancy, active video monitoring, continuous recording, a minimum data storage of 90 days, and warning systems with sirens installed outside the flood zone. While these measures represent significant progress, their practical application demonstrates operational challenges that can compromise the actual effectiveness of the response system. In contrast, international models such as those adopted in Canada, the United States, and Australia emphasize hybrid systems, combining automatic monitoring, continuous human supervision, probabilistic trend analysis, and integration with structured decision-making protocols. Furthermore, a large number of projects still lack robust early warning models that integrate instrumentation data with emergency protocols, limiting the ability to trigger alerts based on dynamic behavioral thresholds. This work also discusses the lack of full integration between automated instrumentation, risk panels, operational control, and guidelines for those who activate the warning system. Based on this analysis, a path is proposed for the evolution of the Brazilian model, focusing on the standardization of operational thresholds, integration between automated data and risk models, expansion of systemic redundancy, and strengthening of rapid response governance.

KEYWORDS: Dam monitoring; governance; limitations; data integration; alert; international practices.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de mineração tem recebido crescente atenção no Brasil e, consequentemente, houve o aprimoramento das normas publicadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Para estruturas classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) alto, o marco regulatório estabelece um conjunto de requisitos que inclui monitoramento automatizado, redundância de energia1, vídeo-monitoramento ativo com registros contínuos e sistemas de alerta fora da mancha de inundação. Embora tais medidas representem avanços relevantes, seu desempenho prático evidencia lacunas estruturais que podem comprometer a eficácia da gestão de risco. Como ressaltado por Vick (2002) e Morgenstern (2018), a segurança de barragens requer não apenas critérios normativos, mas sistemas organizacionais e operacionais capazes de transformar dados em ações decisivas.

A implementação de instrumentação automatizada em regiões remotas constitui um desafio central, sobretudo pela dependência de infraestrutura energética, telecomunicações e manutenção, aspectos já discutidos por Fell et al. (2015) no contexto de *risk-informed dam management*. Além disso, o grande volume de dados gerado por sensores e plataformas de supervisão demanda sistemas robustos de filtragem e análise. Duncan & Wright (2005) destacam que o comportamento de taludes e estruturas de contenção só pode ser adequadamente interpretado quando os dados instrumentais são avaliados sob modelos consistentes de evolução de deformações e pressões neutras. Sem processamentos adequados, há risco de sobrecarga das equipes técnicas e perda de sensibilidade na detecção de anomalias críticas, ponto enfatizado por Mitchell (1993), ao discutir limites de interpretação frente à variabilidade de materiais geotécnicos.

No cenário internacional, países como Canadá, Estados Unidos e Austrália adotam modelos híbridos que combinam monitoramento automático, supervisão humana contínua, análises probabilísticas e protocolos formais de tomada de decisão. Esses modelos refletem princípios descritos por Caldwell (2014) e Fell et al. (2015), que defendem a integração entre monitoramento, análise de tendência e gestão operacional como base da prevenção de rupturas. Tais sistemas apresentam ainda clareza na definição de responsabilidades, como o papel central do *Engineer of Record*, conforme argumentado por Morgenstern (2010), que destaca a importância da autoridade técnica contínua sobre o desempenho da estrutura.

Outro elemento crítico refere-se aos sistemas de alerta e às sirenes de emergência. Embora a exigência de instalação fora da mancha de inundação seja tecnicamente fundamentada, restrições topográficas e logísticas podem dificultar sua implementação efetiva. Vick (2002) ressalta que sistemas de alerta só são eficazes quando integrados a modelos de *early warning* baseados em limiares dinâmicos e indicadores confiáveis de comportamento estrutural. Entretanto, observa-se que muitos empreendimentos brasileiros ainda carecem dessa integração, resultando em limitações na capacidade de detecção precoce e na resposta a sinais de deterioração.

A ausência de integração plena entre monitoramento automatizado, painéis de risco, processos decisórios e governança operacional reforça a necessidade de evolução sistêmica. Fell et al. (2008) observam que uma abordagem de segurança de barragens baseada em risco depende fundamentalmente da padronização de limiares, da consistência entre dados e modelos probabilísticos e da definição clara de responsabilidades de acionamento. Quando comparado a modelos de referência internacional, o arcabouço brasileiro ainda apresenta lacunas relevantes nessas dimensões.

Diante desse contexto, o presente artigo analisa criticamente o modelo brasileiro, suas limitações em relação às práticas internacionais e propõe diretrizes para o aprimoramento técnico e operacional da gestão de segurança de barragens.

2 LIMITAÇÕES DO MODELO BRASILEIRO DE GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO

O modelo brasileiro de monitoramento, instrumentação e alerta em barragens de mineração apresenta avanços normativos importantes, mas ainda está distante das práticas internacionais mais maduras quando analisado sob a perspectiva de desempenho, integração sistêmica e governança técnica. A atualização legal promovida pela Lei nº 14.066/2020, que reforça a Política Nacional de Segurança de Barragens, e a

[1] A Resolução ANM nº 220/2025, que entrará em vigor em 2027, não impõe tal exigência.

consolidação normativa da Resolução ANM nº 95/2022 estabeleceram requisitos essenciais como a implementação de instrumentação com níveis de controle e a criação de centros de monitoramento geotécnico 24 horas/7 dias na semana (BRASIL, 2020; ANM, 2022). Embora esses elementos representem um salto qualitativo, a eficácia prática do sistema ainda é limitada pela ausência de integração plena entre dados instrumentais, modelos de risco, controle operacional e protocolos de resposta - um desafio amplamente discutido em revisões internacionais sobre segurança de barragens de rejeitos (ICOLD, 2022; GISTM, 2020).

Quando comparado ao estado da arte mundial, percebe-se que o arcabouço brasileiro adota uma lógica predominantemente prescritiva, voltada ao cumprimento de requisitos formais, enquanto diretrizes internacionais enfatizam sistemas que integram monitoramento, análise probabilística, governança e resposta rápida. O *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), por exemplo, trata o monitoramento como parte de um processo interdisciplinar de gestão de risco, com ênfase em rastreabilidade, revisão independente e responsabilidade executiva (UNEP; ICMM; PRI, 2020). O ICOLD Boletim 194 reforça que o monitoramento deve ser orientado à detecção precoce e à decisão, e não apenas ao registro de leituras (ICOLD, 2022). Esse contraste se evidencia no Brasil quando leituras instrumentais, mesmo automatizadas, são analisadas de forma isolada, sem ferramentas robustas de análise de tendência, detecção de anomalias ou coerência multissensor, conforme sugerido por Fell et al. (2008; 2015) e por Zare et al. (2024).

Outro ponto crítico refere-se aos limites tecnológicos e operacionais da instrumentação automatizada no Brasil, sobretudo em regiões remotas. A Resolução ANM nº 95/2022 exige níveis de controle e centros de monitoramento ininterruptos, mas a qualidade desses sistemas depende de disponibilidade energética, redundância de telecomunicações e rotinas consolidadas de *Quality Assurance e Quality Control* (QA/QC) de dados, elementos frequentemente frágeis na prática (ANM, 2022). Diretrizes internacionais, como o World Bank Technical Note 7 e as recomendações do ICOLD, advogam por soluções redundantes de energia e comunicação, *store-and-forward*, validação físico-estatística e indicadores compostos baseados em taxas e acelerações de comportamento (WORLD BANK, 2021; ICOLD, 2022). Sem essa arquitetura de dados, mesmo um centro 24/7 não garante sensibilidade suficiente a mudanças críticas no comportamento da estrutura.

A transição de limiares estáticos - adotados de forma ainda comum no país - para limiares dinâmicos e multicritério constitui outro ponto de afastamento das melhores práticas. A literatura de risco em barragens, como os manuais do *Bureau of Reclamation* e das *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management*, enfatiza o uso de probabilidades condicionais de falha, análise de tendência e tempo disponível de resposta para estruturar níveis de alerta (USBR, 2019; FERC, 2020). No Brasil, apesar da previsão normativa de níveis de controle, não há padronização nacional consolidada para cálculo, revisão e auditoria desses limiares com base em análise probabilística. Esse descompasso pode comprometer a tempestividade de respostas e aumentar o risco de falsos positivos ou negativos.

A crítica mais profunda, entretanto, recai sobre a governança. O Brasil ainda não formalizou de forma ampla o papel de uma autoridade técnica contínua com prerrogativas explícitas para interpretar anomalias e recomendar o acionamento de alertas. Em contrapartida, o modelo canadense documentado no *Tailings Guide* e no *OMS Guide da Mining Association of Canada* consolida o *Engineer of Record* (EoR) como a figura central de governança técnica. O EoR é responsável por definir limiares dinâmicos, validar dados, avaliar anomalias e recomendar a elevação de estado, com suporte de revisões independentes proporcionais às consequências potenciais da instalação (MAC, 2019; MAC, 2021). O GISTM reforça esse arranjo ao exigir a nomeação e o empoderamento do EoR e ao estabelecer a figura do *Accountable Executive*, que garante que a cadeia de decisão esteja alinhada à proteção de vidas (UNEP; ICMM; PRI, 2020). Morgenstern (2018), ao analisar falhas recentes de barragens de rejeitos, argumenta que a ausência de autoridade técnica clara e contínua é um fator determinante para atrasos decisórios e para a perda de sensibilidade organizacional frente a sinais precoces.

Ao confrontar o modelo nacional com essas referências, torna-se evidente que a estrutura brasileira criou uma espinha dorsal regulatória adequada contemplando: centros de monitoramento geotécnico 24/7, PAEBM, instrumentação e níveis de controle, mas ainda não amadureceu sua musculatura operacional. Sem integração digital ponta a ponta, sem limiares dinâmicos revisados por especialistas independentes e sem uma autoridade técnica com atribuição inequívoca para comandar a resposta, persiste um risco sistêmico: o de que dados existam, mas não se convertam em ação ágil. Como enfatizam Zare et al. (2024) e o World Bank (2021), a qualidade da resposta depende mais da coordenação entre instrumentos, algoritmos, pessoas e protocolos do que da mera presença de sensores.

A convergência com práticas internacionais, portanto, requer que o Brasil avance para um modelo orientado a desempenho e risco, institucionalizando funções técnicas contínuas, harmonizando limiares dinâmicos multicritério, integrando dados em painéis decisórios e assegurando a rastreabilidade das decisões. O arcabouço já existente permite esse avanço, contudo, falta consolidar a cultura técnica, os processos e as estruturas de autoridade que encurtam o caminho entre a detecção de uma anomalia e a proteção efetiva de vidas e comunidades.

3 DIRETRIZES PARA O APRIMORAMENTO TÉCNICO E OPERACIONAL DA GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL

O aperfeiçoamento da gestão de segurança de barragens demanda a adoção de soluções que já se mostraram eficazes em contextos internacionais maduros, nos quais monitoramento, análise e resposta rápida formam um sistema integrado e orientado a desempenho. As diretrizes adotadas em países como Canadá, Estados Unidos, Austrália e os padrões globais consolidados pelo ICOLD e pelo GISTM demonstram que a eficiência de um sistema de segurança depende menos da quantidade de instrumentos e mais da forma como dados, modelos e pessoas operam de modo coordenado ao longo de todo o ciclo de vida da infraestrutura.

Um dos pilares mais consistentes diz respeito à padronização de limiares operacionais dinâmicos e multicritério, abordagem amplamente recomendada nas diretrizes do *Bureau of Reclamation* e nas *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management* (USBR, 2019; FERC, 2020). Nesses modelos, limiares deixam de ser valores absolutos e passam a refletir probabilidades condicionais de falha, incorporando variáveis como taxa e aceleração de deslocamentos, variações transientes de poropressão, coerência entre diferentes sensores e, sobretudo, o tempo disponível para resposta. Essa lógica, alinhada à visão de Fell et al. (2008; 2015), posiciona o limiar como ferramenta de decisão e não como marcador estático. Sistemas desse tipo reduzem ruídos, tornam anomalias mais perceptíveis e vinculam cada nível de alerta a ações proporcionais e previamente ensaiadas.

Outro eixo central nas práticas internacionais contemporâneas é a integração entre dados automáticos e modelos de risco, combinando telemetria contínua, inspeções estruturadas e análises probabilísticas. O GISTM estabelece que dados de monitoramento, independentemente de sua origem, devem alimentar um modelo de risco vivo, que reflita o desempenho atual da estrutura, atualize hipóteses de comportamento e permita reavaliações rápidas sempre que surgirem novos indícios (UNEP; ICMM; PRI, 2020). O ICOLD Bulletin 194 reforça que sistemas de monitoramento devem ser interpretados à luz de modelos físicos e probabilísticos, e nunca de forma isolada (ICOLD, 2022). De acordo com Zare et al. (2024), países que empregam pipelines de qualidade de dados com validações físico-estatísticas, detecção de anomalias, algoritmos de *rate-of-change* e cruzamentos multissensores apresentam maior capacidade de antecipação frente a trajetórias de instabilidade.

A literatura também evidencia que a confiabilidade operacional de instalações críticas depende da ampliação sistemática da redundância técnica, garantindo continuidade de dados mesmo em cenários adversos. Referenciais como o *Technical Note 7 – Tailings Storage Facilities* do Banco Mundial recomendam redundância em quatro níveis: energia (solar-bateria-gerador), telecomunicações (dupla rota, rádio, satélite), sensores (sobreposição instrumental para variáveis críticas) e armazenamento local (*store-and-forward*) com capacidade suficiente para suportar períodos prolongados de indisponibilidade remota (WORLD BANK, 2021). Sistemas desse tipo não apenas aumentam a disponibilidade de dados, como também reduzem vulnerabilidades em situações de emergência, quando a confiabilidade da informação é especialmente determinante.

O fortalecimento da governança de resposta rápida é outro componente recorrente em países referência. No Canadá, o modelo liderado pela *Mining Association of Canada* (MAC) se consolidou como uma das práticas mais maduras ao instituir a figura do *Engineer of Record* (EoR) como autoridade técnica permanente da instalação, responsável por definir limiares, interpretar dados, avaliar anomalias e recomendar a elevação de estado e o acionamento de alertas (MAC, 2019; MAC, 2021). O GISTM adota e globaliza essa abordagem, ao exigir que o EoR seja formalmente nomeado, tecnicamente independente e inserido em uma cadeia decisória que inclui revisões independentes e a figura do *Accountable Executive* (UNEP; ICMM; PRI, 2020). A literatura de governança geotécnica argumenta que a presença de um responsável técnico contínuo e investido de autoridade reduz atrasos decisórios e aumenta a rastreabilidade, como destacado por Morgenstern (2018) ao discutir as falhas organizacionais que precederam diversos colapsos recentes.

No mesmo sentido, práticas internacionais recomendam a incorporação de sistemas integrados de resposta que conectem monitoramento, painéis de risco, controle operacional e planos de emergência em uma única cadeia lógica e auditável. O *Tailings Guide* e o *OMS Guide* da MAC estabelecem que níveis de alerta devem ser vinculados a procedimentos operacionais e comunitários claramente definidos e testados periodicamente em exercícios simulados, com registro de tempos de resposta, falhas de execução e planos de melhoria contínua (MAC, 2019; 2021). O ICOLD reforça que sistemas eficazes devem manter "traços de decisão" (*decision traces*) que permitam reconstruir o raciocínio técnico e identificar pontos de atenção após qualquer evento, mesmo que não evolua para emergência (ICOLD, 2022).

Além disso, organismos como a ANCODE e o *World Bank* recomendam que sistemas de monitoramento incorporem múltiplas tecnologias convergentes, como sensores *in situ*, VANTs, interferometria por radar, imagens orbitais de alta resolução e modelos digitais de superfície, permitindo verificar coerência entre diferentes fontes de informação (WORLD BANK, 2021; ZARE et al., 2024). Essa convergência não substitui métodos tradicionais, mas os complementa, aumentando a robustez da curva de evidências e reduzindo a probabilidade de interpretações equivocadas.

O conjunto dessas práticas internacionais demonstra que o aprimoramento da segurança de barragens depende de uma visão sistêmica que integre padrões técnicos, governança, tecnologia e cultura organizacional. O caminho para evolução de qualquer sistema de gestão passa por estabelecer limiares dinâmicos orientados por risco, assegurar redundância técnica proporcional ao dano potencial, integrar dados contínuos a modelos probabilísticos vivos e investir na institucionalização de uma autoridade técnica contínua com autonomia e responsabilidade formal na cadeia de decisão. Esses elementos definem a maturidade dos sistemas internacionais e constituem referências sólidas para orientar o aperfeiçoamento técnico-operacional da gestão de barragens em qualquer país que busque convergir para padrões de excelência e desempenho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste artigo demonstra que a gestão de segurança de barragens, especialmente no contexto de estruturas de rejeitos, exige uma abordagem sistêmica que transcenda a simples conformidade normativa e avance para um modelo integrado, orientado ao desempenho e sustentado por governança técnica robusta. Embora o Brasil tenha introduzido avanços significativos em seu arcabouço legal e regulatório, sobretudo com a Lei nº 14.066/2020 e a Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2020; ANM, 2022), o panorama internacional evidencia que a maturidade operacional em segurança de barragens depende da capacidade de converter dados confiáveis em decisões oportunas, justificadas e rastreáveis.

As contribuições de autores como Mitchell (1993), Duncan e Wright (2005) e Fell et al. (2015), além dos referenciais internacionais recentes do ICOLD (2022), da MAC (2019; 2021), do GISTM (UNEP; ICMM; PRI, 2020) e de organismos multilaterais como o Banco Mundial (WORLD BANK, 2021), reforçam que a segurança de barragens é um produto da integração entre conhecimento do comportamento físico das estruturas, análise probabilística de risco, monitoramento robusto, redundância sistêmica e governança clara.

A literatura contemporânea converge na defesa de limiares operacionais dinâmicos, capazes de captar tendências e probabilidades condicionais; de sistemas de dados com QA/QC integrados e interoperabilidade; e de cadeias decisórias que posicionam a autoridade técnica contínua, exemplificada internacionalmente pelo *Engineer of Record*, como elemento central da resposta rápida (MAC, 2019; MORGENSTERN, 2018).

A partir desse conjunto de evidências, o artigo propõe um caminho para o aprimoramento do modelo brasileiro com base em quatro dimensões estruturantes: padronização de limiares multicritério orientados a risco; integração entre monitoramento automatizado, análise probabilística e painéis de decisão; ampliação da redundância técnica para assegurar continuidade de dados e confiabilidade operacional; e fortalecimento da governança, com institucionalização de uma autoridade técnica responsável por consolidar, interpretar e transformar evidências em ação. Essas diretrizes não apenas alinham o sistema nacional às melhores práticas internacionais, mas também reconhecem a natureza dinâmica, incerta e altamente consequente da gestão de barragens de rejeitos.

O avanço necessário é, portanto, menos regulatório e mais operacional, exigindo convergência de tecnologia, processos e capacidades humanas. A construção de um sistema capaz de identificar precocemente mudanças de comportamento, interpretar riscos de forma probabilística e acionar respostas proporcionais

depende de investimentos em cultura técnica, padronização metodológica e clareza institucional. A experiência internacional demonstra que sistemas bem-sucedidos são aqueles capazes de reduzir a distância entre o monitoramento e a decisão, bem como entre a decisão e a ação.

Conclui-se, assim, que a evolução da segurança de barragens no Brasil depende da consolidação de um modelo integrado, orientado ao risco e suportado por governança técnica contínua. Este artigo contribui ao identificar, estruturar e justificar diretrizes para esse aprimoramento, oferecendo um arcabouço conceitual alinhado às práticas internacionais e direcionado à construção de um sistema efetivamente preventivo, resiliente e comprometido com a proteção da vida humana e do meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022*. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

BRASIL. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.* Altera a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, 1 out. 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm>. Acesso em: 13 fev. 2026.

CALDWELL, J. A. Risk-Informed Decision Making for Tailings Dam Safety. In: *Tailings and Mine Waste Conference*, 2014, Vancouver. Proceedings… Vancouver: University of British Columbia, 2014.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. *Soil Strength and Slope Stability.* 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

FELL, R. et al. *Guidelines for Dam Safety Risk Assessment.* Sydney: Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD), 2008.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. *Geotechnical Engineering of Dams.* 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

FERC – FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management.* Washington, D.C., 2020. Disponível em: <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/draft-guidelines.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Bulletin 194 – Tailings Dam Safety*. Paris, 2022. Disponível em: <https://klohn.com/wp-content/uploads/B194-ICOLD-Tailings-Dam-Safety.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

MAC – MINING ASSOCIATION OF CANADA. *A Guide to the Management of Tailings Facilities.* Version 3.1. Ottawa, 2019. Disponível em: <https://mining.ca/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/06/MAC-Tailings-Guide_2019.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

MAC – MINING ASSOCIATION OF CANADA. *Developing an Operation, Maintenance, and Surveillance (OMS) Manual for Tailings and Water Management Facilities.* Version 2.1. Ottawa, 2021. Disponível em: <https://mining.ca/wp-content/uploads/dlm_uploads/2023/02/MAC-OMS-Guide-March-2021-no-popups.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

MITCHELL, J. K. *Fundamentals of Soil Behavior.* 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1993.

MORGENSTERN, N. R. *Geotechnical Risk, Regulation, and Public Policy.* 6th Victor de Mello Lecture, 2018. Disponível em: <https://victorfbdemello.com.br/arquivos/Lectures/6TH_VICTOR_DE_MELLO_LECTURE.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

MORGENSTERN, N. R. Safety and Risk in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2010.

UNEP; ICMM; PRI – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING & METALS; PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT. *Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM).* 2020. Disponível em: <https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_EN.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis.* Denver: U.S. Department of the Interior, 2019. Disponível em: <https://www.usbr.gov/damsafety/risk/methodology.html>. Acesso em: 13 fev. 2026.

VICK, S. G. *Degrees of Belief: Subjective Probability and Engineering Judgment.* Reston, VA: ASCE Press, 2002.

WORLD BANK. *Good Practice Note on Dam Safety – Technical Note 7: Tailings Storage Facilities.* Washington, D.C., 2021. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/981621619171243500/pdf/Tailings-Storage-Facilities.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

ZARE, M. et al. A Review of Tailings Dam Safety Monitoring Guidelines and Systems. *Minerals*, v. 14, n. 6, 2024. DOI: 10.3390/min14060551. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/6/551>. Acesso em: 13 fev. 2026.