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

GESTÃO DE RISCOS EM PILHAS DE REJEITO SUSCETÍVEIS À LIQUEFAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE FMEA, CONTROLES CRÍTICOS E A ISO 31000

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

Letícia Thomaz de Souza VIEIRA
Graduanda em Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Pilhas de rejeito suscetíveis à liquefação apresentam mecanismos de falha e potenciais de impacto comparáveis aos de barragens de rejeitos, porém permanecem, em grande parte, fora de exigências regulatórias específicas quanto à implementação formal de Processos de Gestão de Riscos (PGR). Este artigo propõe e aplica um método estruturado de gestão de riscos especificamente adaptado a pilhas de rejeito, fundamentado na integração da ABNT NBR ISO 31000, da Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) ajustada ao contexto geotécnico e do conceito de Controles Críticos do International Council on Mining and Metals (ICMM). A metodologia compreende a decomposição da estrutura em subsistemas técnicos e organizacionais, a padronização de cenários de falha por meio de Eventos Indesejados Principais (MUEs), a avaliação integrada de severidade, probabilidade e detectabilidade, a priorização dos riscos via RPN e seu enquadramento segundo o princípio ALARP. Os resultados demonstram que riscos associados à instabilidade global, à degradação de sistemas de drenagem e à liquefação permanecem predominantemente no domínio crítico, evidenciando a limitação de abordagens prescritivas isoladas. O método proposto mostrou-se tecnicamente consistente, rastreável e aplicável ao longo do ciclo de vida da estrutura, oferecendo um suporte objetivo à tomada de decisão, à definição de

controles críticos e ao fortalecimento da governança e da cultura de segurança em empreendimentos de mineração.

ABSTRACT

Tailings stacks susceptible to liquefaction exhibit failure mechanisms and impact potentials comparable to those of tailings dams; however, they largely remain outside specific regulatory requirements regarding the formal implementation of Risk Management Processes (RMP). This paper proposes and applies a structured risk management methodology specifically adapted to tailings stacks, grounded in the integration of ABNT NBR ISO 31000, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) tailored to the geotechnical context, and the Critical Controls framework of the International Council on Mining and Metals (ICMM). The methodology comprises the decomposition of the structure into technical and organizational subsystems, the standardization of failure scenarios through Major Unwanted Event (MUEs), the integrated assessment of severity, likelihood, and detectability, and the prioritization of risks using the Risk Priority Number (RPN), followed by their classification according to the ALARP principle. The results demonstrate that risks associated with global instability, degradation of drainage systems, and liquefaction predominantly remain within the critical domain, highlighting the limitations of isolated prescriptive approaches. The proposed method proved to be technically robust, traceable, and applicable throughout the entire lifecycle of the structure, providing objective support for decision-making, the definition of critical controls, and the strengthening of governance and safety culture in mining operations.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de riscos em estruturas de mineração no Brasil evoluiu significativamente após acidentes com barragens de rejeitos [1], que evidenciaram fragilidades técnicas e institucionais e impulsionaram o fortalecimento regulatório e da governança. Nesse contexto, os Processos de Gestão de Riscos (PGR) consolidaram-se como instrumentos centrais para a segurança de estruturas críticas, sob abordagem preventiva e integrada [2].

Por outro lado, pilhas de rejeito e estruturas de disposição compartilhada, embora apresentem mecanismos de falha e impactos comparáveis aos de barragens, não estão, em geral, sujeitas a exigências normativas específicas de gestão estruturada de riscos. A literatura aponta que tais estruturas podem apresentar falhas abruptas, incluindo instabilidade, erosão interna e fluxos de massa, com consequências severas [3,4].

Essa lacuna regulatória é particularmente relevante em climas tropicais, onde variabilidade hidrológica, eventos extremos e ciclos de secagem-umedecimento influenciam o comportamento hidrogeotécnico e a suscetibilidade à liquefação, ampliando incertezas de desempenho. Estudos recentes reforçam a necessidade de incorporar explicitamente fatores climáticos e hidráulicos na avaliação de risco dessas estruturas [5,6].

1.1 Contexto Técnico e Regulatório

O estudo baseia-se na Resolução ANM nº 95/2022 [7], especialmente nos Artigos 49 a 53, que estabelecem diretrizes para implementação de PGR em estruturas de mineração. Essa resolução foi substituída pela Resolução ANM nº 220/2025 [8], publicada em outubro de 2025 e com vigência a partir de agosto de 2027, que reorganiza a gestão de segurança de barragens de mineração sob a lógica de gestão integrada de risco e, de forma particularmente relevante para este estudo, submete os empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação às obrigações aplicáveis às estruturas de maior criticidade. Complementarmente, a ABNT NBR 13028-3:2025 [9] estabeleceu, pela primeira vez, critérios normativos específicos para pilhas de rejeitos desaguados, incluindo requisitos de estabilidade geotécnica, drenagem e monitoramento e, em seu Anexo A, metodologias de avaliação de liquefação estática e cíclica alinhadas ao GISTM, à ICOLD e à ANCOLD.

O referencial é complementado por normas e diretrizes internacionais, como a ABNT NBR ISO 31000 [10], o *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) [11], publicações do *International Commission on Large Dams* (ICOLD) [12] e do *International Council on Mining and Metals* (ICMM) [13], além de princípios internacionais de governança [14], assegurando alinhamento às boas práticas globais. Nesse conjunto, a ANCOLD [15] é especialmente relevante por consolidar critérios para caracterização geotécnica, controle de poropressões, drenagem, instrumentação, monitoramento e resposta operacional ao risco ao longo do ciclo de vida de estruturas de rejeitos.

1.2 Justificativa, Objetivo e Inovação Operacional

A inovação do trabalho consiste na adaptação integrada de ferramentas consolidadas de gestão de riscos ao contexto de pilhas de rejeito, com ênfase na liquefação como mecanismo progressivo e no papel da saturação, da poropressão, da resposta não drenada e das condições de drenagem na definição da criticidade [16]. O modelo articula engenharia geotécnica, gestão de riscos estruturada e governança, alinhado às exigências da Resolução ANM nº 220/2025 [8] e da ABNT NBR 13028-3:2025 [9], independentemente de exigência normativa prévia.

A proposta trata pilhas de rejeito como sistemas geotécnicos complexos ao longo do ciclo de vida, superando abordagens simplificadas. O aumento na frequência e severidade de falhas reforça a necessidade de modelos estruturados de suporte à decisão [17].

Assim, o estudo propõe e exemplifica um PGR adaptado às condições geotécnicas e ambientais dessas estruturas, integrando a ISO 31000, a FMEA aplicada à geotecnia, o princípio ALARP e o conceito de Controles Críticos do ICMM [18], com ganhos em segurança, governança e rastreabilidade.

2. ESTRUTURAÇÃO DO PROCESSO DE GESTÃO DE RISCO

O Processo de Gestão de Riscos (PGR) foi estruturado com base na ABNT NBR ISO 31000 [10] (Figura 1), compreendendo as etapas de estabelecimento do contexto, identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos, além de comunicação e monitoramento contínuos.

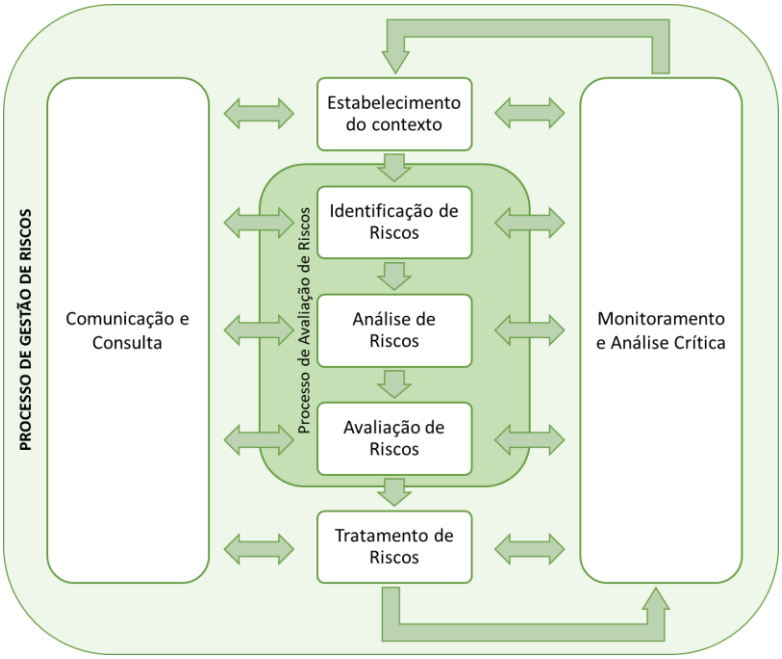


Figura 1 – Fluxograma do Processo de Gestão de Risco (Adaptado de [10])

No estabelecimento do contexto, são definidos os limites do sistema e as variáveis relevantes, com decomposição da estrutura em subsistemas técnicos e organizacionais, base para a identificação sistemática dos riscos.

A identificação é conduzida por meio de um framework baseado em Análise de Modos e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effects Analysis – FMEA*), estruturando, por subsistema, os modos de falha, causas e efeitos. Os cenários são organizados a partir de Evento Indesejado Principal (*Major Unwanted Event – MUE*), permitindo a consolidação de consequências equivalentes e maior consistência analítica.

A análise de riscos segue a abordagem FMEA adaptada à geotecnia de mineração de Robertson e Shaw (2004) [19], integrando severidade, probabilidade e detectabilidade. Essa análise é complementada por matrizes temáticas de impacto: (i) meio biótico e uso do solo, (ii) regulatório, (iii) imagem e percepção pública e (iv) saúde e segurança, assegurando rastreabilidade entre causas, mecanismos e consequências.

A avaliação resulta no Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number – RPN*), interpretado segundo o princípio “Tão Baixo Quanto Razoavelmente Praticável” (*As Low As Reasonably Practicable – ALARP*), permitindo classificar os riscos em aceitáveis, toleráveis ou inaceitáveis, considerando também a confiabilidade dos controles e a capacidade de detecção.

O tratamento dos riscos é orientado pela definição de Controles Críticos, conforme diretrizes do International Council on Mining and Metals, com foco na prevenção e mitigação de MUEs por meio de requisitos de desempenho e gatilhos de ação.

De forma transversal, o monitoramento e a comunicação asseguram a verificação contínua da efetividade dos controles e a atualização do modelo de risco ao longo do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Contextualização da Estrutura: Subsistemas

A contextualização da estrutura compreende a definição do contexto interno e externo da pilha de rejeito. O contexto interno inclui características geométricas, geotécnicas e hidrogeológicas, histórico construtivo e operacional, instrumentação e práticas de gestão. O contexto externo abrange condições climáticas, uso do entorno, sensibilidade ambiental e requisitos regulatórios.

A partir desse enquadramento, a estrutura é decomposta em subsistemas técnicos e organizacionais, gestão e governança, maciço, fundação, drenagem interna e superficial, monitoramento e estruturas de contenção, constituindo a base para a identificação sistemática dos riscos.

Essa segmentação permite uma análise estruturada e rastreável, reduzindo omissões e organizando, para cada subsistema, os modos de falha, causas, mecanismos, MUEs e consequências, em alinhamento com a ABNT NBR ISO 31000.

3.2 Identificação dos Riscos: FMEA

A identificação dos riscos foi conduzida por meio de um framework baseado em FMEA, estruturando, para cada subsistema, os modos de falha, suas causas, efeitos e respectivos Eventos Indesejados Principais (MUEs). A abordagem foi empregada como ferramenta de sistematização, assegurando rastreabilidade entre causas, mecanismos e consequências [20–22].

A padronização por MUEs permitiu agrupar cenários com consequências equivalentes, reduzindo redundâncias e aumentando a consistência da análise [23]. As Tabelas 1 a 7 consolidam os resultados, com identificação de 8 MUEs associados aos subsistemas avaliados, evidenciando o caráter sistêmico dos riscos.

Tabela 1 – Subsistema A: Gestão e Governança

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	Evento Indesejado (MUE)
A1	Falha de gestão e de governança técnica	Documentação técnica insuficiente, ausência de estudos preliminares e baixa aderência entre projeto e execução	Desempenho incompatível com o projeto, paralisações operacionais e sanções regulatórias	Falha sistêmica com potencial de danos ambientais, socioeconômicos e legais
A2	Falha na estrutura hierárquica e tomada de decisão, operação e manutenção	Cadeia hierárquica fragmentada, indefinição de responsabilidades e decisões sem suporte técnico adequado	Resposta tardia a condições críticas, aceitação de desvios de projeto e agravamento progressivo da instabilidade	Falha sistêmica com potencial de danos ambientais, socioeconômicos e legais

Tabela 2 – Subsistema B: Maciço da Pilha

	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
B1	Instabilidade de taludes (rotação, translação, colapso)	Geometria desfavorável, taludes íngremes, ausência de bermas e erosão não controlada	Abertura de trincas, perda de confinamento e instabilidade localizada	Ruptura local devido à instabilidade geotécnica
B2	Sobrecarga estrutural por tensões verticais excessivas	Alteamento rápido e altura excessiva sem dissipação de poropressões	Redução da segurança global e aumento da suscetibilidade à ruptura profunda	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
B3	Maciço heterogêneo com camadas fracas	Variabilidade do rejeito, baixa compactação e segregação granulométrica	Redução da resistência, anisotropia e recalques diferenciais	Ruptura local devido à instabilidade geotécnica

	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
B4	Erosão interna no maciço por gradientes hidráulicos elevados	Elevação do nível piezométrico e fluxos concentrados em interfaces frágeis	Perda progressiva de material e degradação estrutural	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
B5	Instabilidade do maciço por saturação de taludes	Elevação do grau de saturação por falhas de drenagem e eventos pluviométricos intensos	Redução da resistência ao cisalhamento e mobilização de escorregamentos	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
B6	Trincamento e retração do maciço	Secas prolongadas e perda de sucção em solos não saturados	Formação de trincas e aumento da infiltração subsequente	Ruptura local devido à instabilidade geotécnica
B7	Erosão superficial e escorregamento raso	Chuvas intensas, falha de revegetação e drenagem superficial ineficiente	Remoção de material e degradação geométrica dos taludes	Erosão ou escorregamento superficial
B8	Liquefação estática	Aumento de poropressão sob carregamento monotônico em material saturado	Perda abrupta de resistência e grandes deformações	Ruptura por liquefação
B9	Liquefação cíclica	Acúmulo de poropressão por carregamentos repetidos (tráfego, vibrações, sismos induzidos)	Redução gradual da rigidez e da resistência ao cisalhamento	Ruptura por liquefação

Tabela 3 – Subsistema C: Fundação da Pilha

	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
C1	Reativação de descontinuidades geológicas	Falhas, fraturas, contatos inclinados e zonas de cisalhamento não mapeadas	Redução da resistência ao cisalhamento e desenvolvimento de deslizamento basal	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
C2	Ruptura não drenada da fundação	Solos moles ou saturáveis associados à infiltração e carregamento do maciço	Perda de capacidade de suporte e ruptura basal com extrusão de material	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica

C3	Erosão interna na fundação por gradientes hidráulicos elevados	Gradientes hidráulicos elevados e ausência de filtros adequados	Perda progressiva de material e aumento de deformações	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
C4	Liquefação da fundação	Materiais granulares saturados sob nível freático elevado e carregamento	Perda súbita de resistência e recalques abruptos	Ruptura por liquefação

Tabela 4 – Subsistema D (Drenagem Interna)

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
D1	Deformação do sistema de drenagem interna	Recalques diferenciais, fluência do rejeito, sobrecarga e baixa rigidez dos drenos	Redução da capacidade hidráulica, desvio de fluxos e aumento localizado de poropressões	Ruptura por instabilidade hidráulica
D2	Ineficiência funcional do sistema de drenagem interna	Execução inadequada, materiais impróprios e ausência de manutenção	Elevação do nível freático, aumento de poropressões e perda de controle hidráulico	Ruptura por instabilidade hidráulica

Tabela 5 – Subsistema E: Drenagem Superficial

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
E1	Falha na proteção de taludes	Ausência ou deficiência de proteção superficial associada a drenagem inadequada e eventos pluviométricos intensos	Erosão superficial, carreamento de material e degradação dos taludes	Erosão superficial com impactos ambientais e operacionais
E2	Ineficiência do sistema de drenagem superficial	Subdimensionamento hidráulico e ausência de manutenção	Sobrecarga do sistema, erosão progressiva e carreamento de material	Erosão superficial com impactos ambientais e operacionais

Tabela 6 – Subsistema F: Sistema de Monitoramento

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
F1	Falha de detecção de condições críticas	Instrumentação inadequada	Não identificação de anomalias ou estados críticos	Perda de capacidade de detecção de condições críticas
F2	Interpretação inadequada dos dados	Análise técnica deficiente	Resposta tardia a sinais de instabilidade	Perda de capacidade de detecção de condições críticas
F3	Falta de calibração da instrumentação	Ausência de manutenção	Leituras imprecisas ou não confiáveis	Perda de capacidade de detecção de condições críticas

Tabela 7 – Subsistema G: Estruturas de Contenção de Cheias ou Sedimentos

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
G1	Falha estrutural ou funcional	Degradação ou projeto inadequado	Vazamento de material	Vazamento com danos ambientais, sociais e regulatórios
G2	Colmatação progressiva	Manutenção insuficiente	Perda de capacidade de contenção	Vazamento com danos ambientais, sociais e regulatórios
G3	Subdimensionamento hidrológico	Eventos hidrológicos extremos	Transbordamento	Vazamento com danos ambientais, sociais e regulatórios

3.3 Análise dos Riscos: Matrizes de Probabilidade e Consequência

A análise dos riscos foi realizada por meio da avaliação integrada da probabilidade de ocorrência dos modos de falha e da severidade das consequências associadas [24], utilizando quatro matrizes independentes baseadas em Robertson e Shaw (2004). As matrizes foram estruturadas nos eixos: (i) meio biótico e uso do solo; (ii) regulatório; (iii) imagem e percepção pública; e (iv) saúde e segurança (Figura 2).

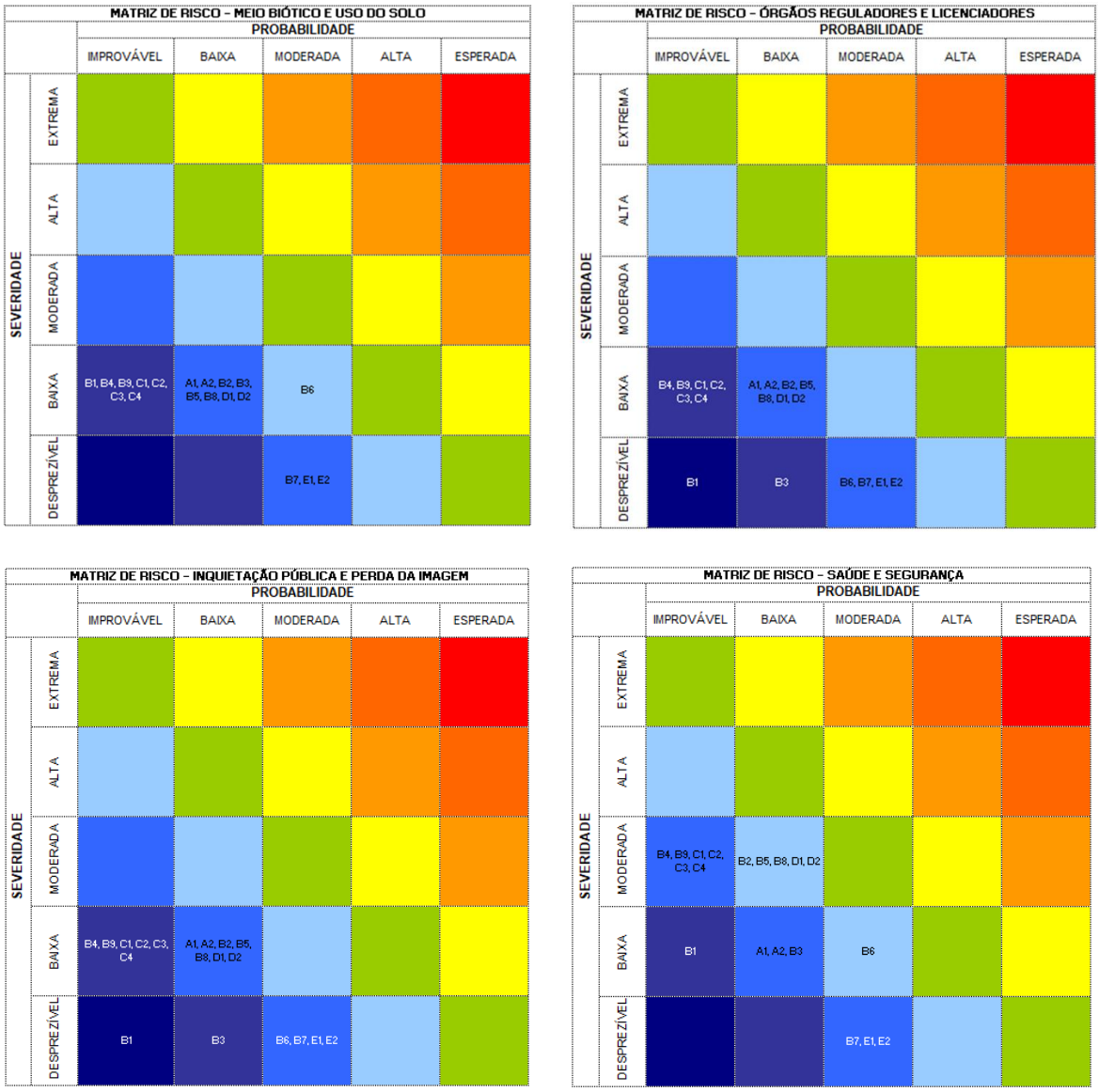


Figura 2 – Matrizes de risco hipotéticas para um PGR de Pilha de Rejeito

A segmentação destes quatro eixos, assegura a consistência na comparação entre modos de falha e subsistemas, definindo sua aplicação pelas Tabelas 8 e 9. O uso de classes discretas e critérios explícitos reduz a subjetividade, aumentando a reprodutibilidade e a rastreabilidade do processo analítico [25].

Tabela 8 – Severidade dos efeitos (Adaptado de [19])

Classe	Meio Biótico e Uso do Solo	Regulatório e Licenciamento	Percepção Pública	Saúde e Segurança
(E) Extrema	Alterações ambientais permanentes e de grande abrangência	Interrupção ou restrição severa das atividades	Repercussão ampla, em âmbito nacional ou internacional,	Ocorrência de perdas humanas

Classe	Meio Biótico e Uso do Solo	Regulatório e Licenciamento	Percepção Pública	Saúde e Segurança
			com impactos relevantes	
(A) Alta	Alterações ambientais significativas, permanentes ou de grande escala reversível	Não conformidades frequentes e sanções expressivas	Repercussão política e institucional relevante	Ocorrências graves à integridade física, com possibilidade de perdas humanas
(M) Moderada	Alterações ambientais relevantes, porém reversíveis	Não conformidades pontuais e sanções de menor porte	Atenção pública ocasional	Ocorrências com afastamento temporário
(B) Baixa	Alterações ambientais localizadas e de pequena escala	Não conformidade isolada, sem sanções relevantes	Repercussão pública limitada	Ocorrências leves
(D) Muito Baixa	Alterações ambientais desprezíveis ou não mensuráveis	Impacto regulatório desprezível	Ausência de repercussão pública	Sem registros de lesões

Tabela 9 – Probabilidade do evento (Adaptado de [19])

Classe	Probabilidade Anual	Frequência Típica
I – Improvável	< 0,01 %	Menor que 1 vez em 10 anos
B – Baixa	0,01 – 0,1 %	Aproximadamente 1 vez em 10 anos
M – Moderada	0,1 – 1 %	Aproximadamente 1 vez em 5 anos
A – Alta	1 – 10 %	Aproximadamente 1 vez em 2 anos
E – Esperada	> 10 %	Aproximadamente 1 vez por ano

3.4 Avaliação dos Riscos: Índice de Risco (RPN)

A avaliação dos riscos foi realizada por meio da integração entre o Índice de Prioridade de Risco (RPN) e o enquadramento segundo o princípio ALARP, permitindo a interpretação conjunta da criticidade e aceitabilidade dos cenários. O RPN foi calculado pelo produto da Severidade (S), Probabilidade (P) e Detectabilidade (D), cada um mensurado de 1 a 5, obtidos pelos eixos de Robertson e Shaw (2004).

A severidade representa a magnitude das consequências associadas aos MUEs; a probabilidade considera mecanismos físicos, histórico operacional e condições

ambientais; e a detectabilidade reflete a capacidade de identificação precoce de condições críticas, influenciada por instrumentação, monitoramento e governança [26]. A inclusão da detectabilidade aumenta a sensibilidade da análise, especialmente para mecanismos de evolução rápida.

A Tabela 10 apresenta um exemplo de aplicação do RPN, evidenciando maiores valores em modos de falha associados à liquefação e à instrumentação, nos quais a combinação de alta severidade e baixa detectabilidade resulta em maior criticidade.

Tabela 10 – Classificação hipotética do Índice de Prioridade de Risco (RPN)

ID	Modo de Falha	(S)	(P)	(D)	RPN
A1	Gestão – Falha de governança técnica	3	2	2	12
A2	Gestão – Falha na tomada de decisão	3	2	3	18
B1	Maciço – Instabilidade de taludes	4	2	2	16
B2	Maciço – Sobrecarga estrutural	4	2	2	16
B3	Maciço – Heterogeneidade estrutural	3	2	3	18
B4	Maciço – Erosão interna no maciço	4	1	4	16
B5	Maciço – Saturação de taludes	4	2	3	24
B6	Maciço – Trincamento por secas prolongadas	2	3	2	12
B7	Maciço – Erosão e escorregamentos superficiais	3	3	2	18
B8	Maciço – Liquefação estática	3	2	5	30
B9	Maciço – Liquefação cíclica	5	1	4	20
C1	Fundação – Reativação estrutural geológica	4	1	4	16
C2	Fundação – Ruptura por poropressão elevada	5	1	3	15
C3	Fundação – Erosão interna na fundação	4	1	4	16
C4	Fundação – Liquefação da fundação	5	1	5	25
D1	Drenagem Interna – Deformação dos drenos	3	2	3	18
D2	Drenagem Interna – Ineficiência funcional	4	2	3	24
E1	Drenagem Superficial – Falha na proteção de taludes	2	3	2	12
E2	Drenagem Superficial – Degradação do sistema	2	3	2	12
F1	Instrumentação – Falha de detecções críticas	4	2	5	40
F2	Instrumentação – Interpretação inadequada de dados	4	2	4	32
F3	Instrumentação – Falta de calibração	3	3	4	36
G1	Estruturas Auxiliares – Falha estrutural ou funcional	4	2	3	24
G2	Estruturas Auxiliares – Colmatação progressiva	3	3	3	27
G3	Estruturas Auxiliares – Subdimensionamento	4	2	4	32

A análise da Tabela 10 evidencia que modos de falha associados à liquefação (B8, B9, C4) concentram os maiores valores de RPN. A liquefação de rejeitos constitui mecanismo crítico de falha em pilhas, particularmente em climas tropicais onde ciclos de saturação-dessaturação, eventos pluviométricos intensos e carregamentos cíclicos

amplificam a suscetibilidade [5,6]. Diferencia-se em duas categorias: liquefação estática (B8) e cíclica (B9), ambas resultando em perda abrupta de resistência ao cisalhamento e grandes deformações [16].

A liquefação estática ocorre sob carregamento monotônico em materiais granulares saturados, quando o aumento de poropressão reduz efetivamente as tensões normais [15]. Em pilhas de rejeito, esse mecanismo é acionado por alteamentos rápidos, elevação do nível freático por falhas de drenagem ou eventos pluviométricos extremos. A suscetibilidade é amplificada pela heterogeneidade granulométrica, baixa compactação e presença de finos, características frequentes em rejeitos de mineração [4]. Segundo diretrizes do GISTM [11] e boletins da ICOLD [12], a avaliação requer ensaios de resistência não drenada (triaxial cíclico e monotônico) e análises de estabilidade com poropressões elevadas, especialmente em fundações e interfaces de alteamento.

A liquefação cíclica resulta do acúmulo progressivo de poropressão sob carregamentos repetidos, incluindo tráfego de equipamentos, vibrações operacionais e sismos induzidos por atividades de mineração [12]. Diretrizes internacionais enfatizam que esse mecanismo é particularmente crítico em rejeitos finos e saturados, onde a rigidez degrada progressivamente, reduzindo a capacidade de dissipação de poropressão [12]. O acúmulo de poropressão pode levar à mobilização de escorregamentos profundos ou ruptura global, mesmo sob carregamentos moderados [4].

A análise de liquefação integra avaliações de: (i) suscetibilidade granulométrica e mineralógica; (ii) estado de tensões efetivas e poropressões *in situ*; (iii) histórico de carregamento e ciclos de saturação; (iv) resistência não drenada por meio de ensaios laboratoriais; e (v) análises numéricas de estabilidade com poropressões dinâmicas [19]. A detectabilidade de liquefação é particularmente desafiadora, pois a evolução pode ser rápida e os sinais precursores (aumento de poropressão, redução de rigidez) frequentemente não são capturados por instrumentação convencional [3]. Isso justifica os elevados valores de RPN observados na Tabela 10 (B8: 30; B9: 20; C4: 25), evidenciando que riscos de liquefação permanecem predominantemente no domínio crítico mesmo com probabilidade moderada, devido à combinação de alta severidade e baixa detectabilidade [26].

Essa caracterização técnica de liquefação reforça a necessidade de abordagens integradas na gestão de riscos, superando análises prescritivas isoladas e alinhando-se ao princípio ALARP [27].

Essa análise integrada de mecanismos críticos é complementada pela interpretação do RPN segundo o princípio ALARP [27], que classifica os riscos em três domínios: (i) aceitável; (ii) tolerável sob ALARP; e (iii) inaceitável. Cenários com severidade elevada mantêm criticidade relevante mesmo com baixa probabilidade. Adicionalmente, riscos classificados como toleráveis podem demandar gestão ativa quando associados a limitada detectabilidade, reforçando a necessidade de controles preventivos robustos.

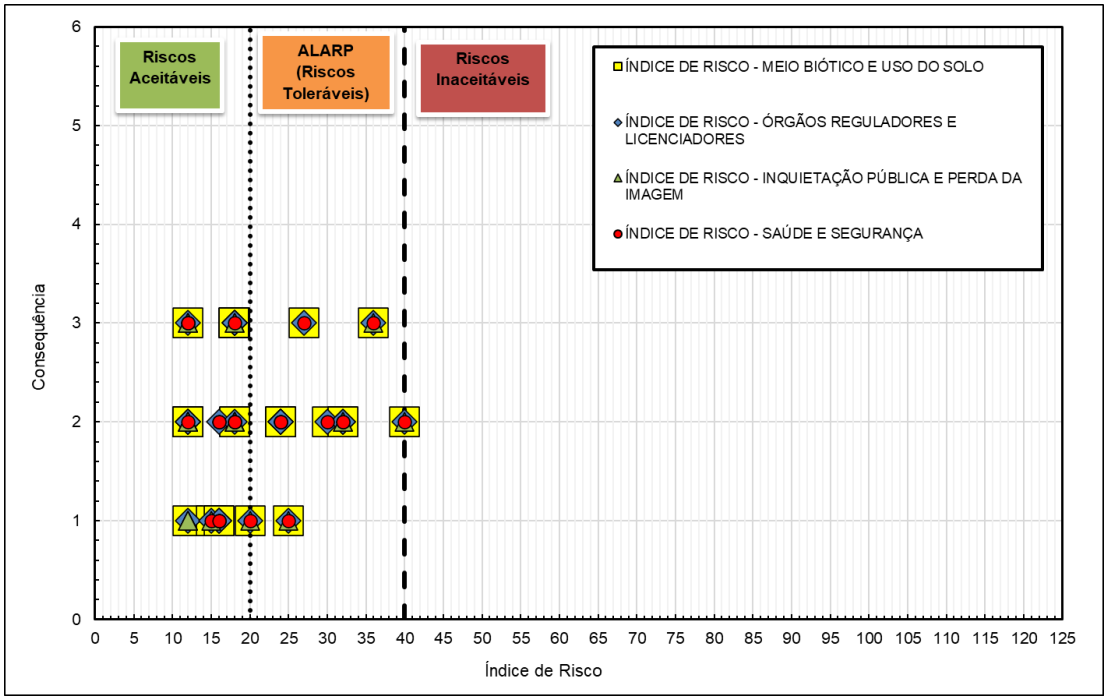


Figura 3 – Identificação hipotética do domínio ALARP para uma Pilha de Rejeitos

A Figura 3 evidencia que modos de falha B8, B9 e C4 (liquefação) situam-se predominantemente na zona inaceitável ou no limite superior da zona tolerável, reforçando a necessidade de controles preventivos robustos.

Os limites de RPN adotados constituem critérios internos de priorização, não normativos, sendo sua interpretação realizada de forma integrada ao ALARP, em alinhamento com a ABNT NBR ISO 31000 e diretrizes internacionais aplicáveis a sistemas geotécnicos de alto risco. A integração entre RPN e ALARP proporciona, assim, uma avaliação mais consistente com a natureza sistêmica e não linear dos riscos em estruturas geotécnicas.

3.5 Tratamento do Risco: Controles Críticos (*Critical Control Management*)

O tratamento dos riscos é conduzido por meio da identificação, implementação e verificação de Controles Críticos, conforme diretrizes do ICMM [13], aplicados aos modos de falha capazes de originar Eventos Indesejados Principais (MUEs). Particularmente para modos de falha associados à liquefação (B8, B9, C4), os controles críticos devem enfatizar monitoramento intensivo de poropressões, restrição operacional durante períodos de saturação elevada e manutenção rigorosa de sistemas de drenagem, conforme diretrizes do GISTM e ANCOLD 2019.

Cada controle crítico dispõe de requisitos mínimos de desempenho, incluindo: (i) definição de sua função e do mecanismo de falha; (ii) requisitos mensuráveis de desempenho; (iii) definição de responsáveis pela sua implementação e verificação; (iv) estabelecimento de rotinas de inspeção, monitoramento e manutenção; e (v) definição de gatilhos de ação (*Trigger Action Response Plans* – TARPs), que indiquem as respostas operacionais diante da perda de efetividade do controle (Tabela 11).

Tabela 11 – Ficha simplificada de um Controle Crítico (CC)

<table>
<tr><td colspan="2">MUE:
Falha sistêmica com potencial de danos ambientais, socioeconômicos e legais</td><td>Modos de Falha:
A1, A2</td><td>Nº MUE:
MUE01</td><td>Nº Controle Crítico:
CC1</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="3">Objetivo do controle crítico:
Assegurar que decisões técnicas críticas sejam tomadas de forma estruturada, rastreável e alinhada ao projeto, prevenindo desvios, alterações não controladas e respostas tardias.</td><td>Status:</td><td>Futuro</td></tr>
<tr><td>Tipo:</td><td>Preventivo</td></tr>
<tr><td>Classificação:</td><td>Procedimento</td></tr>
<tr><td>Requisitos de desempenho:</td><td>Implementação:</td><td colspan="3">Monitoramento e Verificação:</td></tr>
<tr><td>• 100% da documentação técnica crítica aprovada antes da execução
• 100% das decisões técnicas críticas formalmente registradas
• 100% das mudanças tratadas via MOC
• 0% de execução fora dos limites de projeto
• 100% dos riscos críticos incorporados às decisões</td><td>• Sistema formal de gestão documental com rastreabilidade;
• Matriz RACI de responsabilidades técnicas;
• Gate reviews multidisciplinares obrigatórios;
• Processo formal de gestão de mudanças (MOC).</td><td colspan="3">Antes de cada marco do projeto ou trimestral:
• Checklists de conformidade documental
• Registros formais de decisões técnicas
• Registros de MOCs e análises de risco
• Auditorias periódicas de governança técnica
• Revisões técnicas por marcos do projeto</td></tr>
<tr><td>TARPs (Gatilhos e Ações):</td><td>Responsabilidades:</td><td colspan="3">Nota técnica:</td></tr>
<tr><td>• Execução sem documentação → paralisação imediata;
• Alterações sem MOC → bloqueio e reavaliação;
• Decisão sem responsável técnico → suspensão;
• Desvios projeto–execução → revisão obrigatória.</td><td>• Dono: Engenheiro Geotécnico Responsável
• Implementação: Projeto e Operação
• Verificação: Auditoria Técnica Interna
• Apoio: Meio Ambiente, Planejamento.</td><td colspan="3">• Este é um controle estruturante; sua falha compromete a eficácia dos demais controles e a integridade da gestão de riscos.</td></tr>
</table>

Para cada MUE, os controles são classificados em preventivos (atuam na redução da probabilidade) e detectivos/mitigadores (atuam na identificação precoce ou redução das consequências), sendo priorizados aqueles associados a riscos classificados como inaceitáveis ou toleráveis sob ALARP. A gestão dos controles críticos requer ainda a verificação contínua de sua eficácia para cada MUE, por meio de auditorias técnicas, validação de dados de instrumentação, inspeções de campo e revisão periódica das premissas de projeto e operação.

3.6 Monitoramento do Risco e Comunicação

O monitoramento do risco é contínuo e visa verificar a eficácia dos controles, identificar desvios e detectar precocemente a evolução de mecanismos de falha. É realizado pela integração de inspeções, auditorias, indicadores e instrumentação geotécnica, com análise orientada à identificação de tendências, anomalias e proximidade de limites críticos.

A interpretação dos dados deve ocorrer de forma integrada, correlacionando variáveis geotécnicas, hidráulicas e operacionais, com suporte de níveis de alerta e gatilhos operacionais (TARPs) para definição de ações.

A comunicação do risco assegura a transmissão clara, tempestiva e rastreável das informações aos níveis decisórios, incluindo reporte de anomalias e escalonamento de eventos críticos. Deve ser estruturada para garantir alinhamento entre as áreas envolvidas, evitando ambiguidades e atrasos hierárquicos na resposta ao risco.

4. CONCLUSÕES

A metodologia proposta mostrou-se adequada como ferramenta estruturante para Processos de Gestão de Riscos (PGR) aplicáveis a pilhas de rejeito suscetíveis à liquefação [4]. A integração entre a ABNT NBR ISO 31000, a FMEA adaptada, os MUEs e o enquadramento ALARP permitiu representar de forma consistente a complexidade técnica e organizacional dessas estruturas, assegurando rastreabilidade e coerência ao longo do processo.

A incorporação da detectabilidade como parâmetro explícito aumentou a sensibilidade na priorização dos riscos, especialmente para mecanismos de evolução rápida ou difícil monitoramento. O tratamento por meio de Controles Críticos, conforme diretrizes do *International Council on Mining and Metals*, estabeleceu base estruturada para prevenção e mitigação, com definição de desempenho, responsabilidades e gatilhos de ação.

Modos de falha associados à liquefação concentram maior criticidade, evidenciando a dominância da severidade e da detectabilidade no processo decisório. A análise integrada de suscetibilidade granulométrica, poropressões dinâmicas e histórico de carregamento, conforme diretrizes do GISTM, ICOLD e ANCOLD 2019, reforça a necessidade de controles críticos específicos e monitoramento intensivo para esse mecanismo, particularmente em climas tropicais onde variabilidade hidrológica amplifica riscos. Essa abordagem alinha-se, no plano normativo nacional, às

metodologias de avaliação de liquefação estática e cíclica introduzidas pelo Anexo A da ABNT NBR 13028-3:2025, que consolidam tais análises como requisito de projeto para pilhas de rejeitos desaguados. A estruturação de tratamento, monitoramento e comunicação, alinhada à ISO 31000 e ao princípio ALARP, estabelece assim uma abordagem integrada e rastreável, superando análises prescritivas isoladas e fornecendo suporte objetivo à governança e à segurança de pilhas de rejeito ao longo de seu ciclo de vida [22].

5. PALAVRAS-CHAVE

Pilhas de Rejeito, Controles Críticos, ISO 31000, ALARP, Liquefação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARAUJO, F.; CRUZ, C. O. (2022). Avaliação da Maturidade na Gestão de Segurança de Barragens de Rejeitos. Holos, v. 6. p. 1 -19. Brasil.

[2] FRANKS, D. M., et al, (2021). Tailings Facility Disclosures Reveal Stability Risks. Sci Rep. v. 11, p. 5353. [S.L]

[3] HUDSON-EDWARDS, K.A. et al, (2024). Tailings Storage Facilities, Failures And Disaster Risk. Nat Rev Earth Environ. v. 5, p. 612–630. [S.L]

[4] CHOVAN K. et al., (2021). A Risk Assessment Tool For Tailings Storage Facilities. Canadian Geotechnical Journal. v. 58. p. 1898-1914. Canadá.

[5] SU C. et al., (2024). Tailings Storage Facilities In China: Historical Failure Incidents, Existing Status, and Database-Driven Quantitative Risk Assessment. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 114. p. 104973. [S.L]

[6] VINET, L. et al., (2025). Risk Management Model for Tailings Storage Facilities in Chile: an Approach from Geological and Mining Engineering and the Regulatory Framework. Mining. v. 5, p. 80. [S.L]

[7] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) – Resolução ANM nº 95, de 7 de Fevereiro de 2022. Brasília, Brasil.

[8] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2025) – Resolução ANM nº 220, de 15 de Janeiro de 2025. Diretrizes para Gestão de Segurança de Estruturas de Mineração, incluindo Barragens e Pilhas de Rejeito. Brasília, Brasil.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2025) – NBR 13028-3: Disposição de rejeitos desaguados em pilhas. Rio de Janeiro, Brasil.

[10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (2018) – ISO 31000: Risk Management — Guidelines. Genebra, Suíça.

[11] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP; INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM; PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT – PRI. (2020) – Global Industry Standard on Tailings Management. Londres, Reino Unido.

[12] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2019) – Tailings

Dams: Risk Assessment and Management. Paris, França.

[13] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM (2021) – Position Statement on Tailings Governance. Londres, Reino Unido.

[14] UNITED NATIONS (2011) – Guiding Principles on Business and Human Rights. Genebra, Suíça.

[15] AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS – ANCOLD (2019) – Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure. Melbourne, Austrália.

[16] JEFFERIES, M.; BEEN, K. (2016) – Soil Liquefaction: A Critical State Approach. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental. v. 142, Estados Unidos.

[17] OWEN, J. R. et al., (2020) – Catastrophic Tailings Dam Failures and Disaster Risk Disclosure. International Journal of Disaster Risk Reduction. v. 42, p. 101361. Brisbane, Australia. [S.L]

[18] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM (2015) – Health and Safety Critical Control Management – Good Practice Guide. Londres, Reino Unido.

[19] ROBERTSON, A., SHAW, S. (2004) – Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines, 11th British Columbia MEND Metal Leaching/Acid Rock Drainage Workshop. Vancouver, Canadá.

[20] DUTRA, P. et al. (2024) – Modified FMEA for Risk Management in Geotechnical Structures During Hydraulic Circuit Filling of a Hydroelectric Power Plant. Soils and Rocks. V. 47, p. e2024014422. Brasil.

[21] JYOTI (2018) – A State-Of-The-Art Review of FMEA/FMECA Including Patentes. International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering. v. 5, p. 4, Índia.

[22] SCHAFER, H. L. et al., (2021) – A Failure Modes and Effects Analysis Framework for Assessing Geotechnical Risks of Tailings Dam Closure, Minerals. v. 11, p. 1234. Suíça.

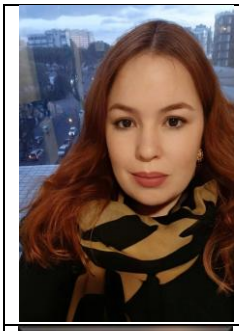
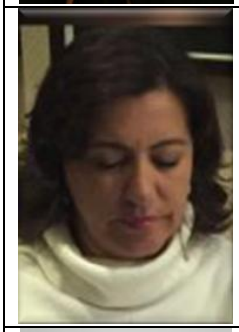
[23] IVANČAN, J. et al. (2021) – New FMEA Risks Ranking Approach Utilizing Four Fuzzy Logic Systems, *Machines*. [S.L]

[24] MENČÍK, J. (2016) – Failure Modes and Effects Analysis. Concise Reliability for Engineers. Czech Republic.

[25] ALEKSIĆ, A. et al. (2025) – Failure Mode and Effects Analysis Integrated with Multi-Attribute Decision-Making Methods Under Uncertainty: A Systematic Literature Review, Mathematics. [S.L]

[26] ZANDI, P. et al. (2020) – Agricultural Risk Management Using Fuzzy TOPSIS Analytical Hierarchy Process (AHP) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Agriculture. v. 10, p. 504. Suíça.

[27] MASELLI, G. et al. (2021) – ALARP Criteria to Estimate Acceptability and Tolerability Thresholds of the Investment Risk, Applied Sciences. [S.L]

	**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.
	**Letícia Thomaz de Souza VIEIRA** Graduanda em Engenharia de Minas (UFMG) e técnica em Edificações (CEFET-MG). Atua no apoio a estudos geotécnicos, análise de dados e elaboração de materiais técnicos, com foco em segurança.