



**CARLOS ALBERTO JUNIOR**

**GESTÃO DE RISCOS EM PILHAS DE REJEITOS:  
APLICAÇÃO DO PADRÃO GLOBAL DA INDÚSTRIA PARA  
GESTÃO DE REJEITOS E PROPOSIÇÃO DE UM ÍNDICE  
GLOBAL DE RISCOS**

**LAVRAS – MG**

**2025**

**CARLOS ALBERTO JUNIOR**

**GESTÃO DE RISCOS EM PILHAS DE REJEITOS: APLICAÇÃO DO PADRÃO  
GLOBAL DA INDÚSTRIA PARA GESTÃO DE REJEITOS E PROPOSIÇÃO DE UM  
ÍNDICE GLOBAL DE RISCOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento e Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

**Prof. DSc. Eduardo Souza Cândido**  
**Orientador**

**Prof.<sup>a</sup> DSc. Danielle Aparecida de Menezes**  
**Coorientadora**

**LAVRAS – MG**  
**2025**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração  
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com  
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Alberto Junior, Carlos.

Gestão de riscos em pilhas de rejeitos: aplicação do Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos e proposição de um índice global de riscos / Carlos Alberto Junior. - 2025.

123 p. : il.

Orientador: Eduardo Souza Cândido

Coorientadora: Danielle Aparecida de Menezes

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Gistm. 2. Pilhas de rejeitos. 3. Gestão de rejeitos. 4. Análise de risco. 5. Índice global de risco. I. Souza Cândido, Eduardo . II. Aparecida de Menezes, Danielle . III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

**CARLOS ALBERTO JUNIOR**

**GESTÃO DE RISCOS EM PILHAS DE REJEITOS: APLICAÇÃO DO PADRÃO  
GLOBAL DA INDÚSTRIA PARA GESTÃO DE REJEITOS E PROPOSIÇÃO DE UM  
ÍNDICE GLOBAL DE RISCOS**

**RISK MANAGEMENT IN TAILINGS STACKS: APPLICATION OF THE GLOBAL  
INDUSTRY STANDARD ON TAILINGS MANAGEMENT AND PROPOSAL OF A  
GLOBAL RISK INDEX**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento e Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 09 de julho de 2025.

DSc. Eduardo Souza Cândido UFLA

DSc. André Geraldo Cornélio Ribeiro UFLA

DSc. Tatiana Barreto dos Santos UFOP

Documento assinado digitalmente



**EDUARDO SOUZA CANDIDO**  
Data: 24/09/2025 14:04:28-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. DSc. Eduardo Souza Cândido**  
**Orientador**

**Prof.<sup>a</sup> DSc. Danielle Aparecida de Menezes**  
**Coorientadora**

**LAVRAS – MG**  
**2025**

*Dedico este trabalho a todas as vítimas e pessoas afetadas por acidentes envolvendo estruturas de disposição de rejeitos. Também o dedico às gerações futuras, com a esperança de que não gerem nem herdem passivos ambientais, mas que vivam, de fato, a sustentabilidade e segurança na gestão de rejeitos.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos Àquele que é o verdadeiro Mestre da minha vida, Mestre em transformar meus caminhos, em direcionar meus passos, em me surpreender com novos sonhos, mesmo quando tudo parece incerto. Quando pensava em desistir, era Ele quem me lembrava que o final é logo ali, afinal, é Ele quem conduz minha história. A cada etapa, colocou pessoas, recursos e tudo o que fosse necessário para que eu pudesse chegar até aqui. A Ele, toda a minha gratidão.

Agradeço imensamente à minha família. Minha mãe Cidinha, meu pai Carlinho e minha irmã Carol. Agradeço também a todos os meus, vocês são meu alicerce. Mesmo quando diziam que eu ia enlouquecer de tanto estudar rsrs, nunca me deixaram sozinho nesta caminhada.

Minha gratidão também ao meu amigo, grande professor e hoje orientador, DSc. Eduardo, famoso Dr. Dudu. Saiba que você é minha inspiração profissional, o amor que coloca em tudo que faz, é singular, e foi quem me fez amar a geotecnia. Agradeço profundamente pela amizade, pelo profissionalismo e por todo o apoio e ensinamento oferecido ao longo deste trabalho e em cada etapa da minha trajetória acadêmica. Você é fera!

Estendo meu agradecimento à Dani, que, numa conversa de congresso, me abriu portas, deu base à minha pesquisa e me incentivou a buscar mais. Além de me ensinar e me encorajar, sua contribuição técnica e amiga foi essencial, nunca vou me esquecer do que fez por mim.

Sou grato aos meus amigos, especialmente à Kellen e ao Waldecy, que me incentivaram a cursar o mestrado, pelas terapias coletivas e pela torcida em toda minha jornada acadêmica.

Quero deixar meu agradecimento também aos colegas de trabalho que fizeram parte desta jornada, em especial à Júlia Sattomura e ao Giovani Pedrosa, que estiveram ao meu lado em cada passo dessa fase. É uma grande satisfação compartilhar aprendizados e vivências em geotecnia com vocês.

Por fim, registro meu sincero agradecimento à Universidade Federal de Lavras, que me acolheu desde os tempos de graduação. Tenho imenso orgulho em dizer que tive a oportunidade de estudar em uma das melhores universidades do País. Expresso aqui minha profunda gratidão a todos do programa de Pós-Graduação, professores, técnicos e demais colaboradores que, de alguma forma, contribuíram para essa trajetória.

Muito bom saber que nunca estamos sozinhos, seguimos juntos!

*Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no oceano. Mas o oceano seria menor se lhe faltasse uma gota.*

*Santa Tereza de Calcutá*

## RESUMO

A crescente demanda por soluções mais seguras e sustentáveis para a disposição de rejeitos na mineração tem impulsionado a adoção das pilhas de disposição de rejeitos (PDRs) como alternativa às barragens convencionais. Nesse cenário, o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM), lançado em 2020, tornou-se referência internacional para a gestão de riscos em estruturas de rejeitos. No entanto, sua aplicação às PDRs ainda carece de interpretações específicas que considerem as particularidades dessas estruturas. Esta dissertação, apresentada em formato de artigos, tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do GISTM na gestão de riscos em PDRs e propor uma metodologia de análise baseada em um Índice Global de Riscos ( $\alpha g$ ), que integra dimensões estruturais, ambientais, legais, reputacionais, financeiras e psicossociais. No primeiro artigo, são analisados dados de cinco PDRs com base na metodologia do *Risk Control Management System* (RCMS), evidenciando como o GISTM distribui seus requerimentos em diferentes categorias de risco e quais riscos são mais recorrentes. No segundo artigo, é proposta uma ferramenta semiquantitativa de avaliação de riscos fundamentada nos requisitos do GISTM, aplicada ao mesmo conjunto de estruturas, permitindo classificar zonas de risco e priorizar ações mitigadoras. Os resultados indicam que o GISTM atua como uma ferramenta eficaz de controle de riscos, embora apresente fragilidades específicas quando aplicado a PDRs. A proposta do índice  $\alpha g$  demonstrou ser uma alternativa robusta para apoiar a governança de riscos e fortalecer a tomada de decisão em empreendimentos minerários, promovendo maior segurança, conformidade e sustentabilidade no setor.

Palavras-chave: GISTM; PDR; gestão de rejeitos; análise de risco; mineração sustentável; índice global de riscos.

## ABSTRACT

The growing demand for safer and more sustainable tailings disposal solutions in mining has encouraged the adoption of dry-stacked tailings facilities (DSTFs), or dry disposal piles (PDRs), as alternatives to conventional tailings dams. In this context, the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), launched in 2020, has become an international reference for risk management in tailings storage facilities. However, its application to PDRs still lacks specific interpretations that consider the unique characteristics of these structures. This dissertation, presented in article format, aims to assess the applicability of the GISTM to PDRs and to propose a risk analysis methodology based on a Global Risk Index ( $\alpha g$ ) that integrates structural, environmental, legal, reputational, financial, and psychosocial dimensions. The first article analyzes data from five PDRs using the Risk Control Management System (RCMS) methodology, identifying how GISTM requirements are distributed across different risk categories whose risks are most frequent. The second article proposes a semi-quantitative risk assessment tool grounded in GISTM requirements, applied to the same structures, allowing the classification of risk zones and the prioritization of mitigation actions. The results show that the GISTM functions as an effective risk control tool, although it presents specific limitations when applied to PDRs. The proposed  $\alpha g$  index proved to be a robust alternative to support risk governance and enhance decision-making in mining operations, contributing to improved safety, regulatory compliance, and sustainability in the sector.

Keywords: GISTM; dry-stacked tailings; risk management; tailings governance; sustainable mining; Global risk index.

## INDICADORES DE IMPACTO

Este trabalho apresenta impactos relevantes de caráter social, tecnológico, ambiental e institucional, com efeitos diretos para a sociedade, para o setor mineral e os territórios onde se inserem estruturas de disposição de rejeitos. A pesquisa propõe uma metodologia para avaliação de riscos em pilhas de disposição de rejeitos (PDRs), fundamentada no Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM), por meio da construção de um Índice Global de Riscos ( $\alpha$ ) que integra dimensões estruturais, ambientais, legais, reputacionais, financeiras e psicossociais. Tal proposição oferece subsídios técnicos concretos para a melhoria da gestão de rejeitos na mineração, com potencial de aplicação prática por operadores, consultores e órgãos reguladores, contribuindo para a redução de passivos ambientais e para a prevenção de desastres com elevado potencial de dano. A análise de cinco PDRs no Brasil e no Peru permitiu validar a ferramenta proposta e demonstrar sua aplicabilidade em diferentes contextos geotécnicos, ampliando o escopo de uso do GISTM de forma adaptada às realidades regionais. O estudo contou com a participação de profissionais externos e instituições privadas que forneceram dados, caracterizando interação entre a universidade e o setor produtivo. As comunidades localizadas no entorno das estruturas analisadas são diretamente beneficiadas, em potencial, pela maior segurança operacional proporcionada pelas análises de risco propostas, especialmente no que tange à proteção da saúde, da integridade física e da qualidade ambiental, que também é objetivo do GISTM. Alinhado às áreas temáticas de meio ambiente, tecnologia e produção e trabalho, conforme a Política Nacional de Extensão, este trabalho também contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, destacando-se os ODS 6, 9, 11, 12, 13 e 15. Com isso, a pesquisa reforça o papel da ciência na promoção de práticas minerárias mais seguras, responsáveis e alinhadas às diretrizes globais de sustentabilidade, representando uma contribuição significativa para a governança de rejeitos aos níveis nacionais e internacionais.

## IMPACT INDICATORS

This work presents relevant social, technological, environmental, and institutional impacts, both direct for society, the mining sector, and the territories where tailings disposal structures are located. The research proposes an innovative methodology for risk assessment in dry-stacked tailings facilities (PDRs), based on the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), through the development of a Global Risk Index ( $\alpha g$ ) that integrates structural, environmental, legal, reputational, financial, and psychosocial dimensions. This proposal provides concrete technical support for improving tailings management in mining, with practical applicability for operators, consultants, and regulatory bodies, contributing to the reduction of environmental liabilities and the prevention of high-impact disasters. The analysis of five PDRs in Brazil and Peru validated the proposed tool and demonstrated its applicability in different geotechnical contexts, expanding the scope of GISTM in ways adapted to regional realities. The study involved external professionals and private institutions that provided data characterizing interaction between the university and the productive sector. Communities surrounding the analyzed structures are directly and potentially benefited by the increased operational safety provided by the proposed risk analyses, particularly regarding the protection of health, physical integrity, and environmental quality, that is also an objective of the GISTM. Aligned with the thematic areas of environment, technology and production, and work, according to the National Extension Policy, this work also contributes to the United Nations Sustainable Development Goals, particularly SDGs 6, 9, 11, 12, 13, and 15. Thus, the research reinforces the role of science in promoting safer and more responsible mining practices aligned with Global sustainability guidelines, representing a significant contribution to tailings governance at both national and international levels.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipo de pilha por disposição de rejeitos e resíduos .....	18
Figura 2 – Tipos de pilhas pela topografia do terreno .....	21
Figura 3 - Relação entre os principais documentos .....	29
Figura 4 – Análise de Risco por Hazop .....	32
Figura 5 - Modelo esquemático nó borboleta .....	33
Figura 6 – Organograma de aplicação do índice Global de risco .....	36
Figura 7 - Régua de atendimento .....	52
Figura 8 - Frequência dos valores de somatório por tópico .....	56
Figura 9 - Distribuição de Riscos por Requerimento .....	60
Figura 10 - Distribuição de frequência de riscos no GISTM por requerimentos (Heatmap) ...	61
Figura 11 - Boxplot Aderência por Tipo de Risco. ....	62
Figura 12 – Exemplificação da distribuição dos fatores .....	84
Figura 13 – Quadro modelo de pontuação para análise de risco. ....	88
Figura 14 – Preenchimento dos valores de $\alpha_i$ .....	95
Figura 15 – Fluxo interativo para análise de risco do GISTM .....	97
Figura 16 - Distribuição do somatório de $\alpha_i$ para cada fator de risco .....	99
Figura 17 – Distribuição dos resultados dos fatores de risco .....	101

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tópicos, Princípios e Requerimentos do GISTM.....	25
Quadro 2 - Divisão dos tópicos, princípios e requerimentos.....	50
Quadro 3 - Porcentagem de Atendimento das Pilhas. ....	55
Quadro 4 - Classificação dos requerimentos conforme o tipo de risco associado. ....	59
Quadro 5 - Requerimentos distribuídos por cada tipo de risco no GISTM.....	82
Quadro 6 - Discriminação dos descritores e das regras gerais de classificação para cálculo do índice Global de risco .....	85
Quadro 7 – Valores atribuídos a $\alpha_i$ baseado nas tabelas de classificação do GISTM.....	87
Quadro 8 – Somatório da pontuação por tipo de fator de risco .....	90
Quadro 9 – Valores calculados para os fatores de risco .....	90
Quadro 10 - Apreciação e categorização de zonas de risco para $\alpha_g$ . ....	92
Quadro 11 - Apreciação e categorização de zonas de risco para fatores.....	93
Quadro 12 - Somatório de requerimentos ( $\sum \alpha_i$ ) para as PDRs .....	98
Quadro 13 – Fatores calculados para as PDRs .....	100
Quadro 14 – Valores encontrados de $\alpha_g$ .....	101
Quadro 15 – Zonas de risco por PDRs .....	102
Quadro 16 - Categorização das zonas de risco das PDRs para os fatores de risco .....	104

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIGB	Comissão Internacional de Grandes Barragens
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
ETA	Event Tree Analysis
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FMECA	Failure Mode, Effect and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GISTM	Global Industry Standard on Tailings Management
GTMI	Global Tailings Management Institute
HAZOP	Hazard and Operability Analysis
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	International Council on Mining and Metals
ICOLD	International Commission on Large Dams
MASqt	Método de Avaliação Semiquantitativa
Noeud Papillon	Modelo do tipo “nó borboleta” (combinação de FTA e ETA)
PDE	Pilha de Disposição de Estéril
PDR	Pilha de Disposição de Rejeitos
PDER	Pilha de Disposição de Estéril e Rejeitos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PRI	Princípios para o Investimento Responsável
RCMS	Risk Control Management System
SDGs	Sustainable Development Goals
TSF	Tailings Storage Facility

## SUMÁRIO

### PRIMEIRA PARTE

<b>1. Introdução</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Referencial Teórico</b> .....	<b>17</b>
2.1 Estruturas de disposição de rejeitos e gestão de riscos .....	17
2.2 Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos (GISTM) .....	24
2.3 Abordagens para análise de risco .....	30

### SEGUNDA PARTE – ARTIGO 1

<b>1. Introdução</b> .....	<b>47</b>
<b>2. Metodologia</b> .....	<b>49</b>
2.1 GISTM.....	49
2.2 Distribuição de atendimento das pilhas .....	50
2.3 Tratamento dos dados .....	51
2.4 Distribuição de atendimento por tópicos .....	52
2.5 GISTM como ferramenta de redução de riscos .....	52
<b>3. Resultados</b> .....	<b>55</b>
3.1 Atendimento dos requerimentos do GISTM .....	55
3.2 Atendimento por tópicos do GISTM .....	55
3.3 Distribuição de riscos .....	57
<b>4. Conclusões</b> .....	<b>62</b>

### TERCEIRA PARTE – ARTIGO 2

<b>1. Introdução</b> .....	<b>78</b>
<b>2. Metodologia</b> .....	<b>81</b>
2.1 Classificação de riscos.....	81
2.2 Índice Global de Riscos: Categorização dos fatores.....	82
2.3 Quadro modelo de pontuação .....	86
2.4 Definição de limites para análises .....	89
2.5 Apreciação e categorização de zonas de risco .....	91
2.6 Procedimentos para avaliação.....	94
2.7 Controles de mitigação .....	95
2.8 Estudo de caso .....	96
<b>3. Resultados</b> .....	<b>97</b>
3.1 Fluxograma para análise de risco do GISTM .....	97
3.2 Cálculo de $\alpha_i$ para as PDRs .....	98
3.3 Cálculo de fatores para as PDRs .....	99
a. Cálculo do índice de risco ( $\alpha_g$ ) para as PDRs .....	101
3.5 Categorização das zonas de ( $\alpha_g$ ) para as PDRs .....	102
3.6 Categorização das zonas de risco para os fatores de risco .....	103
<b>4. Conclusões</b> .....	<b>106</b>

<b>QUARTA PARTE - CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>120</b>
--	------------

## PRIMEIRA PARTE

### 1. INTRODUÇÃO

A gestão de rejeitos na mineração representa uma das fases mais críticas e desafiadoras do setor, principalmente devido aos riscos ligados às estruturas de disposição (Santos *et al.*, 2024). Isso tornou-se ainda mais evidente diante dos desastres causados pelos rompimentos da barragem de Fundão, em Mariana (2015), e da barragem B1, em Brumadinho (2019), que expuseram fragilidades técnicas, falhas de governança e lacunas regulatórias, resultando em severos impactos ambientais, sociais e econômicos (Do Nascimento *et al.*, 2024).

Como parte desse movimento por maior responsabilidade socioambiental, foi lançado em 2020 o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM), elaborado pelo Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM), pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pelos Princípios para o Investimento Responsável (PRI) (ICMM, 2021). Com a meta de alcançar zero dano às pessoas e ao meio ambiente, o GISTM se destaca como o primeiro Padrão internacional com requerimentos auditáveis voltados à gestão segura de rejeitos, adotando uma abordagem estruturada e multidisciplinar para o gerenciamento de riscos em estruturas de disposição (ICMM, 2020).

Nesse contexto, diante dos eventos com barragens, as pilhas de disposição de rejeitos (PDRs) têm ganhado destaque como uma alternativa técnica e ambientalmente mais segura em relação às barragens convencionais (Bernardes *et al.*, 2024). Essa tendência se intensifica diante das crescentes dificuldades de licenciamento, dos passivos ambientais de longo prazo e da necessidade de soluções mais sustentáveis para a mineração contemporânea (Eloi *et al.*, 2024). No entanto, embora as PDRs sejam reconhecidas pelo GISTM como estruturas passíveis de avaliação, a aplicação direta do Padrão a essas estruturas ainda apresenta lacunas, especialmente no que diz respeito à interpretação de seus requerimentos e à categorização dos riscos envolvidos (Menezes, 2024).

Apesar dos avanços trazidos pelo GISTM, as ferramentas tradicionais de análise de risco aplicadas às barragens nem sempre se mostram adequadas às especificidades das pilhas de disposição de rejeitos (PDRs), especialmente considerando a ausência de legislações específicas voltadas a esse tipo de estrutura (CREA, 2025). Soma-se a isso a escassez de estudos específicos sobre a relação entre os requerimentos do GISTM e os diferentes tipos de riscos nas PDRs, o que dificulta a tomada de decisão técnica, regulatória e gerencial nessas estruturas.

Diante desse cenário, esta dissertação tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade

e os efeitos do GISTM na gestão de riscos em PDRs, por meio de duas abordagens complementares: (i) a análise da distribuição e influência das categorias de risco previstas no Padrão, e (ii) o desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação baseada em um Índice Global de Riscos ( $\alpha g$ ), adaptado para essas estruturas. A dissertação está estruturada em quatro partes. A primeira contempla a revisão de literatura, elaborada com o propósito de complementar os dois artigos científicos. Na segunda parte, apresenta-se o primeiro artigo, e, na terceira parte, o segundo artigo científico. Por fim, apresentam-se as considerações finais de ambos os trabalhos, acompanhadas de sugestões para pesquisas futuras.

O primeiro artigo investiga como os riscos estruturais, ambientais, legais, reputacionais, financeiros e psicossociais são contemplados no GISTM, a partir de dados obtidos em cinco PDRs localizadas no Brasil e no Peru. Por meio de análises estatísticas e distribuição dos requerimentos, o artigo evidencia os riscos mais recorrentes e as fragilidades de atendimento ao Padrão. Já o segundo artigo propõe uma metodologia de avaliação de riscos com base no GISTM, utilizando um índice semiquantitativo ( $\alpha g$ ), que integra diferentes dimensões de risco. A ferramenta permite a categorização das PDRs em zonas de risco e a definição de prioridades para mitigação, oferecendo subsídios práticos para a gestão e a governança dessas estruturas.

Fundamentados no GISTM e nas melhores práticas de gestão de riscos do setor minerário, ambos os trabalhos se apresentam como ferramentas relevantes para o aprimoramento da gestão organizacional, o fortalecimento da conformidade regulatória e o incentivo a soluções mais seguras e responsáveis, especialmente diante da crescente adoção das PDRs. Assim, este estudo avança significativamente no campo da gestão de riscos, ao mesmo tempo em que preenche lacunas na literatura acadêmica, reafirmando o compromisso da mineração com a proteção ambiental e a segurança das comunidades.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Estruturas de disposição de rejeitos e gestão de riscos

#### 2.1.1. Tipos de estruturas de disposição

As atividades relacionadas ao setor mineral estão presentes na sociedade desde os primórdios da civilização e tornaram-se essenciais para o desenvolvimento humano (Curi, 2017), sendo atualmente responsáveis por uma parcela significativa da economia global (Lopes *et al.*, 2022). Entretanto, os processos de lavra e beneficiamento mineral resultam na geração de rejeitos, os quais devem ser dispostos de maneira sustentável em estruturas projetadas para esse fim (Souza *et al.*, 2025). A gestão adequada dessas estruturas é essencial para assegurar a segurança operacional, bem como a proteção das pessoas e do meio ambiente (Patrocínio *et al.*, 2024).

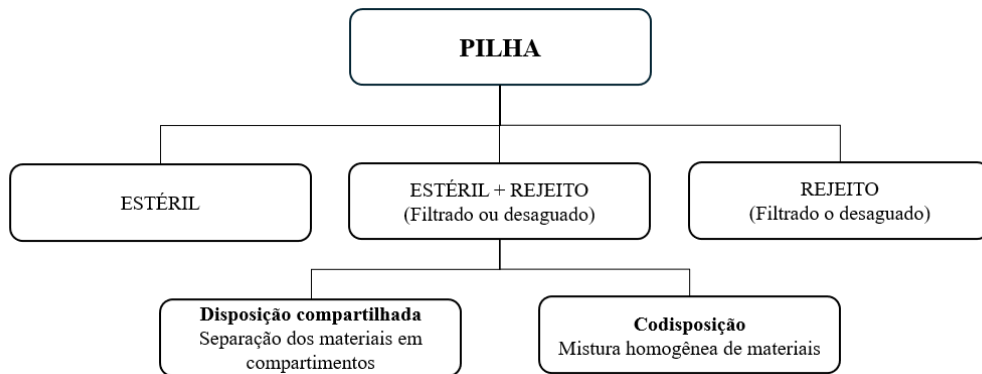
As estruturas destinadas à disposição de rejeitos, conhecidas como TSFs (*Tailings Storage Facilities*) (ICMM, 2020), são selecionadas com base nas características específicas de cada projeto, considerando variáveis como custo, estabilidade e volume (Roquete, 2023). Segundo Stela *et al.* (2020), essas estruturas são projetadas para armazenar rejeitos conforme critérios, premissas e requisitos técnicos definidos, podendo assumir diferentes formas, como barragens, pilhas ou ainda métodos alternativos, como o preenchimento de cavas para a disposição desses materiais.

As barragens, apesar de ainda representarem a maior parte das estruturas de disposição (ANM, 2025), têm perdido espaço no setor devido às crescentes dificuldades no processo de licenciamento, intensificadas pelos recentes desastres ocorridos (Pereira, 2024). Um marco dessa mudança foi a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão, em Mariana (MG), em 5 de novembro de 2015, que inundou as comunidades de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, resultando em 19 mortes e no despejo de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos no Rio Doce (Vasconcelos, 2022). Posteriormente, em 25 de janeiro de 2019, a Barragem I da mina de ferro Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho (MG), sofreu um colapso catastrófico, liberando um grande volume de rejeitos que causou a morte de 272 pessoas, o desaparecimento de outras 3 e a severa contaminação da Bacia do Rio Paraopeba (Rose *et al.*, 2023).

Nesse contexto, os acidentes com barragens ampliaram a atenção voltada às pilhas, como alternativa para disposição de rejeitos e estéril da mineração (Azambuja *et al.*, 2024). Essas estruturas podem ser compostas exclusivamente por rejeitos (PDRs), por estéril (PDEs)

ou por uma combinação de ambos, formando as chamadas pilhas mistas (PDERs). Quando há essa combinação, os materiais podem ser depositados de duas maneiras: por disposição compartilhada ou por codisposição, conforme ilustrado na Figura 1 (FDTE, 2024).

Figura 1 - Tipo de pilha por disposição de rejeitos e resíduos



Fonte: Adaptado de FDTE (2024)

A ABNT NBR 13029 (ABNT, 2024), estabelece os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projetos de pilhas destinadas à disposição de estéril proveniente da lavra de minas a céu aberto ou subterrâneas. Essa norma tem servido como referência para o setor no que se refere ao gerenciamento e à conformidade técnica das pilhas de estéril.

### 2.1.2. PDRs

Apesar da existência de uma legislação brasileira ampla e detalhada sobre mineração, ainda não há normas específicas que regulem diretamente as PDRs. De acordo com as recomendações de métodos e procedimentos em gestão de estruturas de disposição de rejeitos de mineração emitido pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA, 2025), essa lacuna tem motivado a proposição de novas legislações, entre elas o projeto de Lei nº 2.519/2024 (Minas Gerais, 2024), atualmente em tramitação na Assembleia Legislativa de Minas Gerais, que “dispõe sobre ações de segurança, fiscalização e informação sobre Pilhas de Disposição de Rejeitos e Resíduos Industriais ou de Rejeitos, Resíduos e de Estéril de Mineração, no estado de Minas Gerais, e dá outras providências”.

Já no âmbito federal, o Projeto de Lei nº 3.799/2024, em análise na Câmara dos Deputados, propõe alterações no Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, com o objetivo de regulamentar aspectos de segurança relacionados a pilhas de estéril e rejeitos, incluindo empilhamentos secos, drenados, desativados ou em operação (Brasil, 2025).

Embora ainda seja um campo em desenvolvimento, com regulamentações em processo de elaboração, Jaskulski (2022) destaca que, entre os cenários avaliados para a disposição de rejeitos, a alternativa mais viável atualmente é a adoção de PDRs. No entanto, essa solução exige atenção a diversas preocupações técnicas, especialmente no que diz respeito à suscetibilidade à liquefação dos rejeitos. Esse fenômeno ocorre quando o material apresenta comportamento contrátil. Para mitigá-lo, é fundamental adotar premissas de engenharia adequadas, garantindo por meio da compactação e de ensaios que os rejeitos apresentem comportamento dilatante (Mesavilla, 2022; Ferreira, 2025).

Outro aspecto relevante é quanto à disposição adequada dos rejeitos, que exige o lançamento em camadas finas, geralmente com espessura controlada entre 20 e 30 cm, permitindo melhor compactação e homogeneidade do material (França *et al.*, 2022). Esse processo deve ocorrer com umidade próxima à ótima, aquela que maximiza a densidade seca do material, condição essencial para minimizar a presença de vazios, garantir estabilidade e reduzir a suscetibilidade à liquefação e à erosão interna (Gonçalves *et al.*, 2020).

O método construtivo recomendado é o ascendente, no qual a pilha é elevada progressivamente sobre camadas previamente compactadas, assegurando maior controle construtivo e melhor desempenho geotécnico ao longo do tempo (Nunes, 2014). Em contrapartida, o método descendente, caracterizado pelo lançamento de material na borda do talude, conhecido como ponta de aterro, não deve ser empregado em PDRs, pois resulta em camadas com baixa compactação, estrutura heterogênea e aumento do risco de instabilidades (Van Deursen, 2016).

Uma forma de garantir a redução de água dos rejeitos, é o processo de filtragem, onde os rejeitos filtrados são submetidos a um processo de filtragem, para que os materiais possuam um teor de umidade ideal, variando entre 70% e 85%, conforme descreve Portes (2013). A redução de água facilita o transporte dos rejeitos por correias transportadoras ou caminhões, porém a eficácia desse processo pode ser impactada por diversos fatores, como variações no teor de finos, condições climáticas, ou estocagem dos rejeitos (Vieira, 2024).

### **2.1.3. Aspectos de projetos das PDRs**

Embora as pilhas de rejeitos de mineração não estejam submetidas aos mesmos critérios de segurança aplicáveis às barragens, sua construção e operação continuam representando um desafio relevante de engenharia, sobretudo no caso de estruturas de grande porte, com volumes superiores a 100 milhões de metros cúbicos e alturas acima de 100 metros (Roquete, 2023).

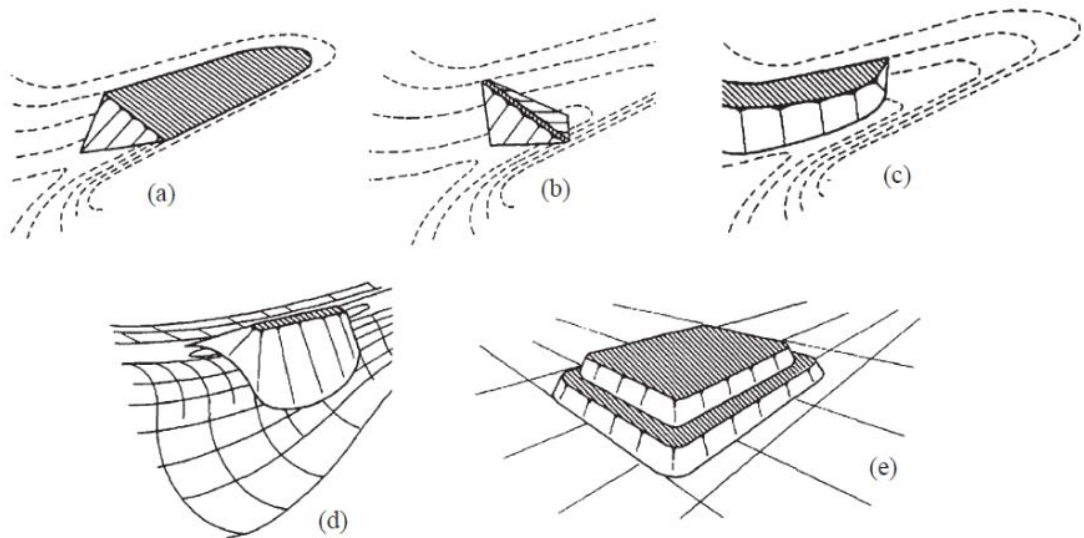
Diante disso, torna-se essencial adotar critérios rigorosos na definição e no controle dos parâmetros que regem o projeto e a operação de uma PDR.

No projeto de uma PDR, é essencial considerar uma série de fatores geotécnicos, como a altura dos taludes entre as bermas, a altura total da estrutura (do topo à base) e a taxa de alteamento. Nesse contexto, a aplicação dos princípios da mecânica dos solos críticos é de grande relevância, pois permite avaliar as limitações impostas à altura das pilhas em função do comportamento contrátil dos materiais sob elevadas tensões (Carneiro *et al.*, 2023). Além desses aspectos, devem ser considerados outros parâmetros fundamentais, como a largura entre bermas, o volume total de rejeito a ser disposto, a inclinação dos taludes, o controle da superfície freática e as taxas de infiltração (Souza, 2020).

Hawley e Cunning (2017) sugerem três tipos diferentes de pilhas, a depender da topografia, sendo elas:

- a) Pilhas em vale: ocupam um espaço que vai de um ponto da encosta até outro, permitindo o escoamento da água descendente, que pode ser tratada, a depender da qualidade da água coletada pelos drenos. As superfícies dessas pilhas são inclinadas para evitar o represamento de água sobre elas, ou possuem canais para desviar as águas superficiais, como demonstrado na Figura 2a. Já as pilhas transversais a um vale são uma variação das pilhas em vale, onde a estrutura abrange o vale, mas não o preenche completamente. Normalmente, estradas, vias de acesso para veículos ou trilhos ferroviários passam sobre esse tipo de estrutura. A principal desvantagem é a necessidade de uma drenagem eficiente para evitar o acúmulo de água na parte superior (Figura 2b);
- b) Pilhas em encostas: são construídas ao longo das encostas, e são alteadas a partir do fundo do vale. Essas estruturas geralmente possuem mais canais de desvio, especialmente em alturas maiores, devido ao formato que favorece o acúmulo de água nesses canais, como ilustrado na Figura 2c. Por outro lado, as pilhas de crista são uma variante das pilhas em encostas, onde os declives da pilha seguem ambos os lados do cume. Um exemplo desse modelo é mostrado na Figura 2d.
- c) Pilhas em pirâmide: No Brasil, este método também é chamado “bolo de noiva”. Pode ter uma base quase quadrada ou um dos lados alongado, sendo preferível que a base da pirâmide seja plana ou ligeiramente inclinada para a construção. Uma vantagem desse formato é que ele recebe apenas a precipitação diretamente sobre a estrutura, o que reduz a quantidade de água a ser tratada. No entanto, uma desvantagem é que essa configuração resulta em menor quantidade de rejeito por área impactada em comparação com as outras. Este modelo é ilustrado pela Figura 2e.

Figura 2 – Tipos de pilhas pela topografia do terreno: (a) pilha em vale, (b) pilha transversal a um vale, (c) pilha de encosta, (d) pilha de crista, e (e) pilha em pirâmide



Fonte: Hawley e Cunning (2017)

#### 2.1.4. Riscos associados às PDRs

Toda obra de engenharia, incluindo as PDRs, deve seguir padrões e melhores práticas para evitar o rompimento das estruturas, que pode ocasionar sérios danos. Por isso, controles preventivos e mitigatórios são fundamentais para mitigar esse risco estrutural (Andrade, 2016). Segundo Batista (2019), a instabilização do maciço é o modo de falha mais comum nas pilhas de rejeitos, geralmente avaliada por meio de análises de equilíbrio limite. Contudo, em condições de fundação específicas e com materiais altamente deformáveis, tornam-se necessários estudos mais detalhados, como as análises de tensão-deformação, que avaliam tanto os recalques quanto a estabilidade da estrutura frente às mudanças nas tensões decorrentes das deformações (Wayhs, 2024).

As superfícies de ruptura causadas pela instabilização do maciço podem apresentar geometria circular ou não circular, caracterizando-se por rupturas profundas. Segundo as diretrizes técnicas e socioambientais para projetos de pilhas de rejeitos de mineração, divulgada pela Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia e AECOM do Brasil (FDTE, 2024), há alguns fatores que podem influenciar na instabilização do maciço, como o aumento do nível freático dentro do maciço, a formação de lençóis suspensos devido à saturação das camadas superiores do maciço, a redução da resistência do material de fundação devido ao acréscimo de poropressão durante a fase operacional, o risco de saturação da PDR devido à

infiltração de precipitação nas camadas superiores do maciço, os altos níveis de tensão, a erosão nos taludes e por fim o mau funcionamento do sistema de drenagem no fundo.

Pinheiro *et al.* (2020) destacam que, para verificar as condições de segurança e a estabilidade do maciço, é fundamental realizar análises de risco que garantam que a estrutura atenda aos critérios mínimos de aceitação estabelecidos pelas normas e pelas melhores práticas da engenharia, ao mesmo tempo em que se otimizam a geometria e a sequência de construção. Acrescido a isso, Patrocínio *et al.* (2024) ressaltam a importância de conceitos específicos para embasar estudos que busquem minimizar os impactos associados à mancha de ruptura dessas estruturas, conhecidas como *stackbreak*. Segundo esses autores, a mancha de impacto deve ser representada cartograficamente como o resultado de um estudo de ruptura hipotética, abrangendo a envoltória máxima ao redor da pilha.

Em casos dessa envoltória possuir interação com outras estruturas, é necessário realizar uma análise adicional do impacto gerado. Caso barragens sejam impactadas, devem ser seguidas as diretrizes e boas práticas aplicáveis aos estudos de ruptura, considerando o escoamento dos materiais oriundos da falha da pilha em direção ao reservatório. Um exemplo significativo ocorreu em 8 de janeiro de 2021, na Mina Pau Branco, em Minas Gerais, quando a ruptura parcial da PDE gerou uma onda que atingiu o dique a jusante, desencadeando um efeito em cascata e resultando no galgamento da barragem (Araujo, 2022).

Para além do risco estrutural, diversos outros riscos podem estar atrelados ao projeto, operação e fechamento dessas estruturas. Em 7 de dezembro de 2024, a empresa Jaguar Mining foi multada pelo órgão ambiental em R\$ 320 milhões, devido aos danos sociais e ambientais causados pelo deslizamento da pilha. O evento desalojou 255 pessoas de 75 famílias, que habitavam 120 casas, sendo que sete delas foram soterradas ou sofreram impactos diretos. A área atingida pela massa de rejeitos, estimada pela empresa em 750 mil m<sup>3</sup>, alcançou 10 hectares, incluindo um hectare de vegetação da Mata Atlântica em área de preservação permanente que foi removida. Também foi necessário o resgate de 678 animais de criação, estimação e silvestres. O Córrego casquilho, próximo à oficina da Jaguar, teve seu trecho afetado em pelo menos 180 metros, conforme o auto de infração (Lambranh, 2025).

Diante dos eventos de ruptura dessas estruturas, é importante compreender que esses desastres não são exceções isoladas, mas sim parte dos custos humanos, sociais e ambientais que esse tipo de ocorrência tem provocado mundialmente. Essa compreensão é fundamental para estimular reflexões e possibilitar o mapeamento de outros riscos envolvidos (Freitas *et. al*, 2016). Por isso, além do risco estrutural, é necessário estar atento a outros riscos associados às PDRs, como os riscos ambientais, psicossociais, financeiros, legais e reputacionais.

Os riscos ambientais estão atrelados aos impactos gerados tanto pela operação quanto por possíveis rupturas de pilhas de rejeitos. Durante a operação, podem ocorrer geração de poeira, contaminação gradual do solo e da água por infiltrações, além da supressão de vegetação (Silvestrini, 2013). Em caso de ruptura, esses impactos se intensificam drasticamente, provocando a dispersão de grandes volumes de material, contaminação de corpos hídricos, soterramento de áreas vegetadas, inclusive em zonas de preservação, e danos severos à fauna (Lopes, 2016).

Já os riscos psicossociais estão relacionados aos impactos emocionais e sociais. A realocação de famílias, a incerteza quanto à segurança das estruturas e a perda de vínculos com o território geram estresse, ansiedade e sensação de insegurança na população (Mendes, 2022). Além disso, os trabalhadores também podem ser afetados psicologicamente pela pressão constante, pelo medo de acidentes e pelas mudanças nas rotinas laborais em contextos de risco elevado (Pereira, 2017). Esses fatores comprometem a saúde mental e o bem-estar coletivo, exigindo ações preventivas e de apoio contínuo (Camelo *et al.*, 2008).

Os riscos financeiros associados às PDRs envolvem custos elevados com multas ambientais, processos judiciais e indenizações em caso de acidentes (Souza, 2018). Além disso, a paralisação ou atraso nas operações, exigências de readequação de projetos e os investimentos necessários para recuperação das áreas impactadas geram prejuízos significativos (Martins, 2020).

Embora ainda não existam legislações específicas voltadas exclusivamente às PDRs, essas estruturas devem se atentar quanto ao risco legal e seguir as normas vigentes e guias de boas práticas para garantir a integridade operacional e evitar sanções legais. No Brasil, destacam-se como marco regulatório a Lei nº 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e estabelece diretrizes para estruturas destinadas à disposição de rejeitos. O não cumprimento das legislações podem resultar em multas, autuações e paralisação das operações (Tonietto *et al.*, 2011).

Já o risco reputacional está relacionado aos danos da imagem e credibilidade da empresa diante da sociedade, órgãos reguladores e investidores (Nakamura *et al.*, 2019). No contexto das pilhas de rejeitos, incidentes como rompimentos, impactos ambientais ou falhas na comunicação e na gestão podem comprometer a confiança do público e gerar repercussões negativas na mídia. Isso pode afetar diretamente o valor de mercado, dificultar parcerias e influenciar a obtenção de licenças e financiamentos (Rojas, 2020).

Diante dos riscos associados às pilhas de rejeitos, torna-se indispensável a adoção de uma gestão de riscos robusta, contínua e integrada ao longo de todo o ciclo de vida dessas

estruturas (ICOLD, 2016). Uma abordagem preventiva, baseada em análises técnicas criteriosas e no cumprimento das normas vigentes, contribui não apenas para a segurança das operações, mas também para a sustentabilidade do empreendimento e a proteção das partes interessadas (IBRAM, 2019). Nesse contexto, o alinhamento às boas práticas internacionais é fundamental para elevar o padrão de gestão e reduzir a probabilidade de falhas. Iniciativas como o *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) surgem para fortalecer esse compromisso, fornecendo diretrizes globais que integram aspectos técnicos, sociais, ambientais e éticos à gestão segura de rejeitos (ICMM, 2020).

A classificação dos riscos em categorias estruturais, ambientais, psicossociais, financeiros, legais e reputacionais foi adaptada a partir de diferentes referenciais que abordam a gestão de riscos em estruturas de disposição de rejeitos (ICOLD, 2016; IBRAM, 2019; Nakamura et al., 2019; Patrocínio et al., 2024). Não existe um consenso absoluto na literatura quanto a uma tipologia única, a segmentação varia conforme a área de aplicação e o objetivo da análise (Menezes, 2024). Entretanto, há recorrência na adoção de categorias que combinem aspectos técnicos (estruturais e ambientais) e não técnicos (legais, reputacionais e psicossociais), de forma a integrar uma visão holística de riscos (Freitas et al., 2016; ICMM, 2020). No presente trabalho, optou-se por essa tipologia por permitir a associação direta dos riscos com os requerimentos do GISTM e facilitar a análise integrada de impactos físicos, socioambientais e organizacionais.

## **2.2. Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos (GISTM)**

### **2.2.1. GISTM**

O rompimento catastrófico da barragem da mina Córrego do Feijão, da Vale, ocorrido em Brumadinho em 2019, representou uma tragédia humana e ambiental de grandes proporções. De acordo com o *Global Tailings Review* (2020), o evento exigiu respostas firmes e eficazes para elevar os padrões de segurança e fortalecer a governança das estruturas de rejeitos em escala global. A tragédia estabeleceu um marco importante na necessidade de se avançar rumo a uma gestão segura dessas estruturas, com foco na meta de dano zero às pessoas e ao meio ambiente.

Diante dessa necessidade, em 5 de agosto de 2020, foi lançado o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM), com o objetivo de estabelecer uma referência

internacional para alcançar resultados técnicos e socioambientais robustos na gestão de rejeitos. O GISTM é fruto de uma colaboração entre o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM) e os Princípios para o Investimento Responsável (PRI) (ICMM, 2021).

Voltado para os operadores, o GISTM se aplica a todas as instalações de rejeitos, sejam existentes ou futuras, independentemente do tipo de estrutura, incluindo PDRs. O Padrão afirma que consequências extremas para pessoas e o meio ambiente, decorrentes de falhas catastróficas em instalações de rejeitos, são inaceitáveis. Assim, os operadores devem adotar uma política de tolerância zero para fatalidades humanas e se comprometer a causar dano zero às pessoas e ao meio ambiente desde a fase inicial de concepção do projeto (Dladla, 2022).

O Padrão oferece flexibilidade para que os operadores escolham a melhor forma de atingir esse objetivo. Para fins de auditoria e certificação, ele é composto por um preâmbulo, uma seção de requisitos, glossário e anexos. Os requerimentos devem ser aplicados por estrutura de disposição, conforme definido no Glossário. Todos os requerimentos foram elaborados para serem aplicáveis e auditáveis (ICMM, 2021). O GISTM possui 6 tópicos, 15 princípios e 77 requerimentos, conforme descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Tópicos, Princípios e Requerimentos do GISTM

<b>Tópicos</b>	<b>Princípio</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade de Requerimentos</b>
I: Comunidades Afetadas	1	Respeitar os direitos de pessoas afetadas pelo projeto e procurar engajá-las significativamente em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento.	4
II: Base integrada de conhecimentos	2	Desenvolver e manter uma base de conhecimentos interdisciplinar para apoiar uma gestão segura dos rejeitos ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento.	4
	3	Usar todos os elementos da base de conhecimentos – sociais, ambientais, econômicos e técnicos locais – para subsidiar decisões ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento.	4
III: Projeto, construção, operação e monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos	4	Desenvolver planos e critérios de projeto para as estruturas de disposição de rejeitos no sentido de minimizar riscos em todas as fases do seu ciclo da vida, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento.	8
	5	Desenvolver um projeto robusto que integre a base de conhecimentos e minimize o risco de falhas que possam atingir as pessoas e o meio ambiente em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento.	8
	6	Planejar, construir e operar a estrutura de disposição de rejeitos de modo a garantir a gestão de riscos em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, incluindo nas fases de fechamento e pós-fechamento.	6

Quadro 1 - Continuação

	7	Projetar, implementar e operar sistemas de monitoramento para gerenciar riscos em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento.	5
IV: Gestão e governança	8	Estabelecer políticas, sistemas e responsabilidades para apoiar a segurança e a integridade das estruturas de disposição de rejeitos.	7
	9	Designar e habilitar um Engenheiro de Registro.	5
	10	Estabelecer e implementar níveis de revisão como parte de um sistema robusto de gestão da qualidade e de riscos para todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento.	7
	11	Desenvolver uma cultura organizacional que promova a aprendizagem, a comunicação e o reconhecimento precoce de problemas.	5
	12	Estabelecer um processo para a apresentação de denúncias e resposta a preocupações e implementar medidas de proteção para denunciante.	2
V: Resposta às emergências e recuperação de longo prazo	13	Preparar-se para resposta às emergências diante de falhas nas estruturas de disposição de rejeitos.	4
	14	Preparar-se para uma recuperação de longo prazo na eventualidade de uma falha catastrófica.	5
VI: Divulgação pública e acesso à informação	15	Divulgar publicamente e oferecer acesso a informações sobre as estruturas de disposição de rejeitos para apoiar a prestação de contas e responsabilização pública.	3

Fonte: ICMM (2020)

Embora o GISTM seja atualmente a principal referência internacional em gestão de rejeitos, outras organizações, como a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), também publicam diretrizes e boletins técnicos amplamente reconhecidos, como o Boletim 121 (“*Tailings Dams – Risk of Dangerous Occurrences*”) e o Boletim 154 (“*Guidelines for Dam Safety Management*”).

Há pontos de convergência entre o GISTM e as orientações da ICOLD, especialmente no enfoque em gestão de riscos ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas, na ênfase à segurança a jusante e na necessidade de inspeções e monitoramento contínuo. No entanto, o GISTM diferencia-se por estabelecer requerimentos auditáveis e obrigatórios, enquanto as diretrizes da ICOLD assumem caráter mais orientativo e técnico, servindo como boas práticas, mas sem a mesma exigibilidade formal.

Além disso, o GISTM incorpora dimensões sociais, éticas e de governança de forma mais explícita, como o engajamento de comunidades afetadas, a transparência e o direito à informação, aspectos menos detalhados na ICOLD, cujo foco é predominantemente técnico e de engenharia. Essa combinação torna o GISTM um padrão mais abrangente, ainda que complementar às diretrizes da ICOLD, de modo que a utilização conjunta pode fortalecer a

governança e a segurança das estruturas.

### 2.2.2. Os Protocolos de Conformidade

Além do GISTM, o ICMM publicou, em 2021, o documento Protocolos de Conformidade, com o objetivo de apoiar operadores e avaliadores independentes na verificação da implementação dos requerimentos do GISTM (ICMM, 2021). Essa publicação visa a facilitar a adoção do Padrão pelos membros do ICMM, considerando que os signatários se comprometeram a implementá-lo integralmente em todas as instalações com consequências potenciais classificadas como muito altas ou extremas (de acordo com a classificação estabelecida na Tabela 1 do Anexo 2, presente no documento de classificação de consequências baseado na ICOLD, conforme disposto nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021)) no prazo de três anos, e para as demais instalações no prazo de cinco anos.

Os Protocolos de Conformidade estruturam os 77 requerimentos do GISTM em 219 critérios objetivos e bem definidos, o que proporciona maior clareza e uniformidade na avaliação. O uso eficaz desses protocolos fortalece a transparência e evidencia, perante todas as partes interessadas, o compromisso da organização com práticas responsáveis ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de rejeitos (Capanema *et al.*, 2024).

Os Protocolos de Conformidade foram elaborados com o objetivo de garantir o cumprimento rigoroso dos requerimentos estabelecidos pelo Padrão, no entanto, os 77 requerimentos do GISTM (ICMM, 2020) apresentam certos desafios, especialmente em relação à subjetividade de algumas informações. Para facilitar a conformidade, alguns critérios e exemplos incluídos nos Protocolos são acompanhados de notas de esclarecimento, cuja função é oferecer suporte interpretativo sem comprometer a segurança.

Além disso, o Guia de Boas Práticas de Gestão de Rejeitos do ICMM (ICMM, 2025) oferece suporte complementar à interpretação e aplicação dos requerimentos, considerando a diversidade de contextos jurisdicionais e tipos de instalações ao redor do mundo. Este guia está interrelacionado com outro documento, chamado Arcabouço de Governança de Rejeitos: Declaração de Posicionamento (ICMM, 2020), e ambos que dão suporte os Protocolos de Conformidade, conforme apresentada na Figura 3.

Os Protocolos de Conformidade do ICMM oferecem suporte tanto para autoavaliações quanto para validações por terceiros independentes, com o objetivo de acompanhar o progresso na implementação do GISTM. A autoavaliação é definida como a confirmação interna, feita pelo próprio operador, sobre a existência e a integridade de sistemas ou práticas relacionadas à

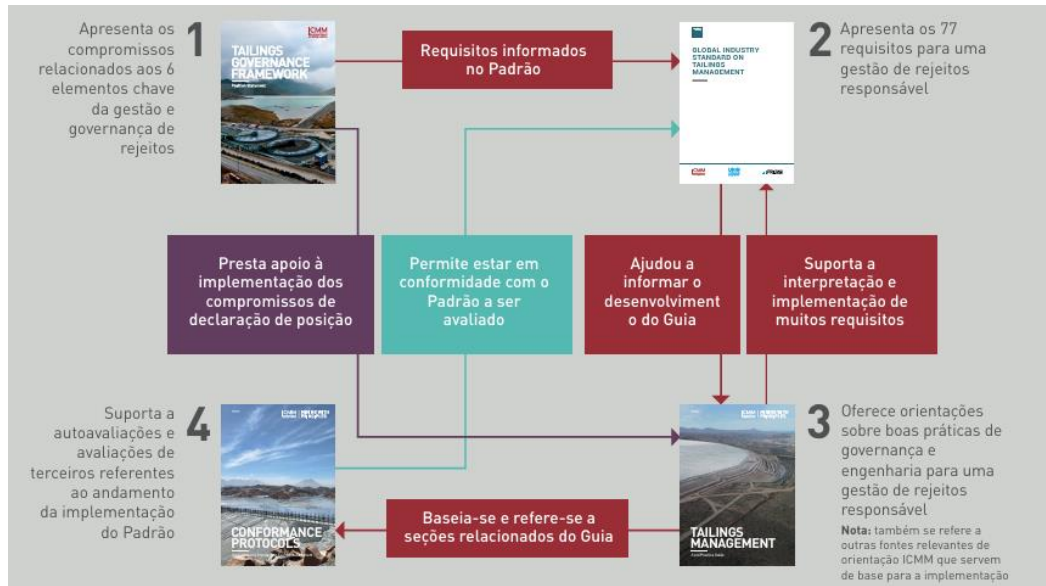
aplicação do Padrão, conforme o contexto específico das estruturas de disposição de rejeitos (Menezes *et al.*, 2024). Nela, os níveis de conformidade com os requerimentos são classificados em quatro categorias.

O nível “atende” indica que os sistemas ou práticas relacionadas aos requerimentos foram implementados e há evidências suficientes que comprovam seu cumprimento. “atende parcialmente” refere-se a situações em que esses sistemas ou práticas foram apenas parcialmente implementados, persistindo lacunas ou fragilidades que podem comprometer a conformidade, além de evidências verificáveis insuficientes para demonstrar o alinhamento com o requerimento. O “não atende” é atribuído quando os sistemas ou práticas necessárias não existem, não estão sendo implementados ou não podem ser evidenciados. Já “não aplicável” é utilizado quando o requerimento específico não se aplica ao contexto do ativo avaliado (ICMM, 2021).

Após realizada a autoavaliação, é necessária a validação por terceiros, que consiste na verificação independente da autenticidade das informações declaradas nas autoavaliações e julgam se são pertinentes as evidências. Essa análise pode ocorrer de forma integrada a outras auditorias de sistemas. Para garantir a confiabilidade do processo, a validação deve ser conduzida por profissionais qualificados, com experiência e conhecimento técnico suficientes para avaliar criteriosamente as evidências apresentadas (Asmat *et al.*, 2024).

Segundo o Procedimento de Garantia e Validação do ICMM (ICMM, 2023), as empresas membros são obrigadas a divulgar se uma instalação está em conformidade com o Padrão. Essa divulgação deve especificar claramente se a conformidade foi determinada por meio de autoavaliação ou auditoria realizada por terceiros, bem como informar a data de conclusão desse processo. As autoavaliações precisam ser assinadas pelo executivo responsável, enquanto as auditorias de terceiros devem ser assinadas pelo auditor chefe (ICMM, 2021).

Figura 3 - Relação entre os principais documentos



Fonte: ICMM (2021)

### 2.2.3. GTMI

Com o propósito de supervisionar a implementação e a conformidade com o GISTM, foi instituído o *Global Tailings Management Institute* (GTMI, 2025), uma organização independente, criada pelo ICMM, PNUMA e PRI. Governado por múltiplas partes interessadas, o GTMI tem como missão fortalecer a segurança das instalações de rejeitos de mineração em escala Global. Sediado na África do Sul, o instituto atuará ao longo de todo o ciclo de vida dessas estruturas, promovendo uma gestão responsável e alinhada aos princípios do GISTM (GTMI, 2025).

A atuação do GTMI se concentrará na administração de uma estrutura de garantia robusta, por meio da qual as instalações de rejeitos serão auditadas e certificadas de forma independente, com base nos critérios do GISTM. Essas avaliações serão conduzidas por terceiros qualificados, assegurando imparcialidade e rigor técnico. O desenvolvimento do instituto foi fundamentado nas contribuições de um painel consultivo internacional, formado por representantes de diversas partes interessadas, refletindo o compromisso com a transparência e a inclusão (Dias, 2025).

Nesse contexto, o GTMI representa um componente essencial da governança global voltada à eliminação de danos às pessoas e ao meio ambiente causados por barragens de rejeitos. A credibilidade do GISTM está diretamente ligada à confiança das partes interessadas no processo de verificação da conformidade das estruturas. Para manter essa confiança, o Padrão

será continuamente aprimorado com base nas lições aprendidas durante sua implementação. Além disso, a divulgação pública dos resultados das auditorias garantirá a prestação de contas e o engajamento constante da sociedade (Brasil Mineral, 2025).

## **2.3. Abordagens para análise de risco**

### **2.3.1. Riscos**

De acordo com a ISO 31000 (ABNT, 2018), risco pode ser definido como o efeito da incerteza nos objetivos. Segundo o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), risco é a probabilidade e severidade de um efeito adverso para a saúde, a propriedade e o meio ambiente. A avaliação do risco considera aspectos como as condições de implantação da estrutura de disposição e a eficácia do sistema de gestão (Minas Gerais, 2002). De forma geral, esse risco é estimado a partir da interação entre três elementos fundamentais: o cenário, a probabilidade de ocorrência e as consequências associadas (Cruz, 2024).

Nesse contexto, torna-se essencial compreender e tratar os riscos com base em uma abordagem estruturada e informada, capaz de identificar eventos potencialmente adversos e antecipar suas repercussões. Ainda assim, quantificar e analisar o risco continua sendo uma das fases mais desafiadoras da gestão, em razão da grande variedade de fatores envolvidos e do elevado grau de incertezas presentes em cada situação analisada (Vianna, 2015).

O Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens, criado pela Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB, 2005), categoriza a análise de risco em três grupos: a análise qualitativa, que descreve as consequências potenciais de forma descritiva, utilizando termos como “elevado”, “grande” ou “médio”, ou por meio de escalas numéricas, como de 1 a 5, a análise semiquantitativa, e a análise quantitativa, que avalia as consequências com valores numéricos, buscando representar adequadamente a magnitude real dos impactos e a probabilidade dos diferentes cenários analisados.

A análise semiquantitativa é caracterizada por uma abordagem combinada entre métodos qualitativos e quantitativos, na qual geralmente são utilizados descritores verbais convertidos em valores numéricos para representar as probabilidades atribuídas (Melo, 2014). Nesse contexto, a denominação Método de Avaliação Semiquantitativa (MASqt) é frequentemente adotada, pois permite identificar e mensurar a gravidade dos riscos por meio de classificações que transformam descrições verbais em valores numéricos, facilitando assim a priorização e o tratamento dos riscos (Da Silva Pinto, 2013).

Além disso, conforme ressalta Melo (2007), o MASqt apresenta vantagens por ser relativamente simples, possibilitando a identificação das prioridades de intervenção a partir dos principais riscos e promovendo a sensibilização dos diversos membros da organização, ao considerar uma variedade de riscos.

### **2.3.2. Sistemas convencionais para análise de risco**

Visto as categorizações, diversas são as ferramentas de análise de risco, como HAZOP (*Hazard and Operability Analysis*), que investiga os perigos e a operacionalidade das estruturas; FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) e FMECA (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*), que estudam os modos de falha, seus efeitos e gravidade; ETA (*Event Tree Analysis*), que utiliza análise por árvore de eventos; FTA (*Fault Tree Analysis*), baseada em árvore de falhas; além da combinação desses dois últimos, denominada “nó borboleta” (*Noeud Papillon*) (CNPGB, 2005).

#### **2.3.2.1. HAZOP**

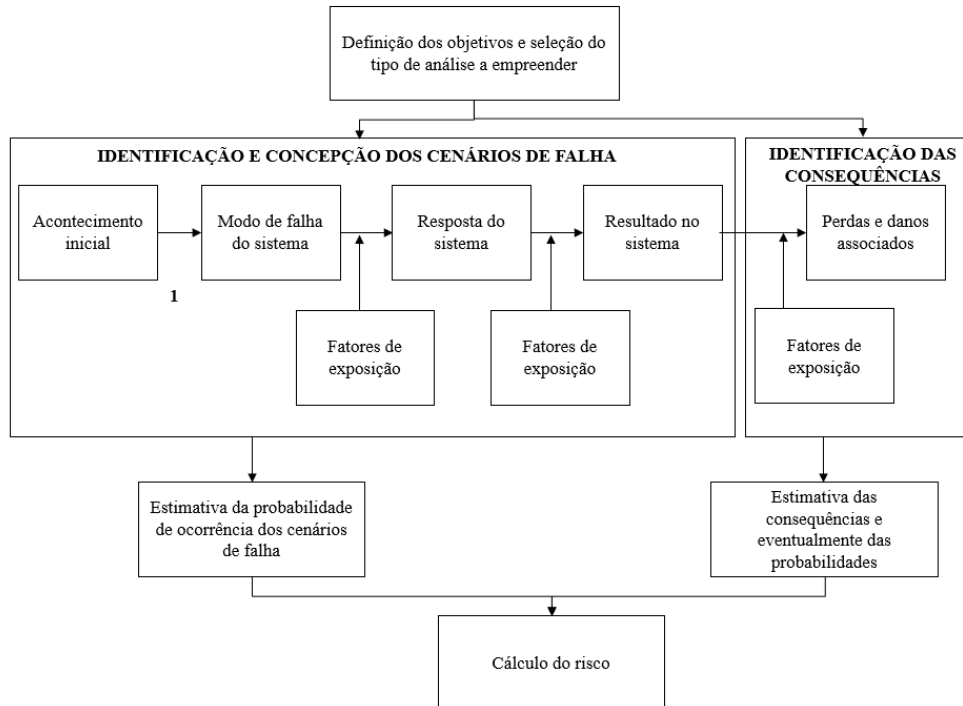
O método HAZOP foi desenvolvido nos anos 1970 pela Sociedade Imperial de Indústrias Químicas e adaptado para diferentes áreas, incluindo a Engenharia de Barragens. Ele analisa sistematicamente os desvios de grandezas que afetam o comportamento de sistemas, identificando suas causas, consequências e propondo ações corretivas. Aplicável nas fases de projeto, construção e operação, o HAZOP utiliza palavras-chave para classificar desvios e pode ser usado em análises qualitativas ou semiquantitativas. Suas vantagens incluem a abordagem estruturada e eficiente, embora apresente limitações na identificação explícita dos modos de falha e na adaptação de termos genéricos a contextos específicos como o das barragens (Dunjó *et al.*, 2010; Venkatasubramanian, 2000). Na Figura 4 é apresentado o esquema para análise deste modelo.

#### **2.3.2.2. FMEA e FMECA**

Na engenharia de estruturas de disposição de rejeitos, o FMEA pode ser aplicado em todas as fases, do projeto à operação, e em diversos subsistemas, sendo útil para compreender modos de falha, formas de detecção e ações preventivas (CNPGB, 2005). Quando adaptado para análises semiquantitativas, o método passa a ser chamado de FMECA, incorporando

escalas de probabilidade e severidade. Suas principais vantagens são a abordagem sistemática e detalhada, embora sua aplicação possa ser limitada pelo tempo e custo necessários devido ao seu caráter exaustivo (Grabill *et al.*, 2024; Hulse *et. al.*, 2024; Nocera, 2021).

Figura 4 – Análise de Risco por Hazop



Fonte: Adaptado de CNPGB (2005)

### 2.3.2.3. ETA

A Análise por Árvore de Eventos (ETA) é um método indutivo desenvolvido nos anos 1970 para o setor nuclear, mas hoje amplamente utilizado em diversas áreas técnicas. Ela parte de um evento iniciador e permite visualizar os possíveis desdobramentos, sendo especialmente útil em sistemas com múltiplos dispositivos de segurança. Esse método também é aplicado em análises pós-acidente e permite estimar a probabilidade das sequências de eventos decorrentes. Por isso, é indicado tanto para análises semiquantitativas quanto quantitativas de risco, contribuindo para a compreensão das falhas e para o planejamento de respostas (Domínguez *et al.*, 2021; Sharafat, 2021)

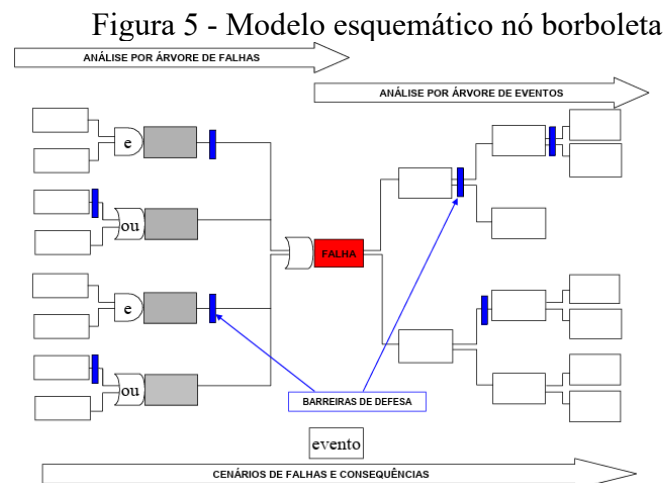
### 2.3.2.4. FTA

A Análise por Árvore de Falhas (FTA) é um dos métodos mais antigos de apoio à avaliação de riscos, desenvolvido nos anos 1960 pela *Bell Telephone* para sistemas de lançamento de mísseis. Trata-se de um método dedutivo que parte de uma falha específica e busca identificar todas as combinações de eventos que podem levá-la a ocorrer. Atualmente, é amplamente utilizado em setores como o nuclear, aeronáutico e químico, além de ser aplicado em análises de riscos pós-acidente (Kang *et al.*, 2025).

De acordo com CNPGB (2005), na Engenharia de Barragens, o FTA pode ser aplicado em todas as fases do empreendimento e em diferentes subsistemas. Por ser um método gráfico e sistemático, que utiliza símbolos lógicos padronizados, permite mapear de forma clara os caminhos que levam a uma falha. Sua principal vantagem está na capacidade de identificar múltiplas combinações de eventos, o que o torna especialmente eficaz na análise de acidentes complexos e de grande escala.

### 2.3.2.5. Nó Borboleta

O método do Nó Borboleta combina as abordagens da árvore de falhas (à esquerda) e da árvore de eventos (à direita) (Figura 5), tendo como elemento central uma falha do sistema. Esse evento central representa a não verificação de estados limites últimos ou de utilização, funcionando como o ponto de transição entre causas e consequências. Bastante utilizado em alguns países europeus, especialmente na Holanda, o método permite analisar tanto os eventos que podem levar à falha quanto os desdobramentos possíveis após sua ocorrência (Cruz, 2024).



Fonte: CNPGB (2005)

### 2.3.3. Índices de Risco

Os índices de risco são métodos amplamente utilizados nas análises de risco para gestão de rejeitos. De forma geral, esses índices têm como objetivo classificar a barragem e seus riscos, baseando-se, na maioria das vezes, em fontes de perigo, vulnerabilidades e consequências. As consequências tradicionalmente consideradas nesse tipo de método referem-se principalmente ao vale a jusante que pode ser potencialmente inundado em caso de cheia, resultante da ruptura da barragem (Baptista, 2009). A aplicação da metodologia está, em especial, nas possíveis consequências de uma ruptura, com foco nas áreas a jusante que seriam potencialmente atingidas por inundações, evidenciando a importância do controle e monitoramento dessas estruturas (Aguar, 2014; Alves *et al.*, 2023).

De acordo com Caldeira (2008), uma das vantagens desses métodos é a sua capacidade de aplicação mesmo na ausência de dados detalhados sobre estruturas de disposição, suas condições operacionais ou a ocupação humana e ambiental do vale a jusante. Por esse motivo, são frequentemente utilizados em análises de grandes conjuntos de barragens, onde é necessário estabelecer prioridades de intervenção. Também podem ser aplicados em avaliações individuais, com propósitos variados, como o planejamento de inspeções e o dimensionamento de sistemas de monitoramento, seguindo diretrizes reconhecidas internacionalmente.

Além das análises operacionais, esses métodos podem ser úteis em estágios iniciais e intermediários de desenvolvimento de projetos. Na fase de planejamento, por exemplo, a análise de índices parciais relacionados às ameaças e consequências pode orientar decisões contratuais e técnicas (Makdisse, 2008).

Vale mencionar que os métodos baseados em índices de risco são bastante variados, e há pouca evidência, na literatura técnica, de trabalhos que tratam de sua padronização. De modo geral, trata-se de abordagens criadas e aplicadas em contextos limitados, geralmente por operadores ou proprietários responsáveis pela gestão de barragens (Pimenta, 2009).

Conforme menciona Baima (2014), o cálculo de um índice de risco consiste na definição do objetivo do índice, na seleção dos descritores mais representativos das características da barragem ou do vale a jusante, na atribuição de pesos a cada descritor segundo um sistema que quantifique sua importância, na normalização dos indicadores para uma escala comum, uma vez que geralmente são expressos em unidades ou escalas distintas, na agregação desses indicadores para obter uma medida única ou um valor simples do impacto, e, por fim, na validação do índice.

O Boletim 41 do Comitê Internacional de Grandes Barragens (CIGB, 1982) apresenta

uma proposta metodológica para avaliação das condições de risco em barragens, com o objetivo de subsidiar a definição e a operação de sistemas de observação, chamado índice global de riscos ( $\alpha_g$ ). A metodologia propõe a atribuição de valores a um conjunto de descritores ( $\alpha_i$ ), organizados em três categorias principais: fatores externos ou ambientais (E), confiabilidade da estrutura (F) e fatores humanos e econômicos relacionados ao rompimento (R). Para o cálculo de  $\alpha_g$ , há uma sequência que deve ser seguida, apresentada pela Figura 6. O índice global de risco é calculado a partir da multiplicação dos três fatores, E, F e R, permitindo ao avaliador estabelecer critérios específicos conforme a necessidade da análise.

Neste contexto, o índice global de riscos pode ser associado a outras ferramentas, como a simulação de Monte Carlo, a qual permite incorporar incertezas e fornecer uma avaliação probabilística mais robusta dos riscos associados às estruturas de disposição de rejeitos. Essa abordagem possibilita a simulação de inúmeros cenários, refletindo variações em condições hidrológicas, integridade estrutural e estratégias operacionais, o que proporciona uma análise mais realista e abrangente (Martin et al., 2018).

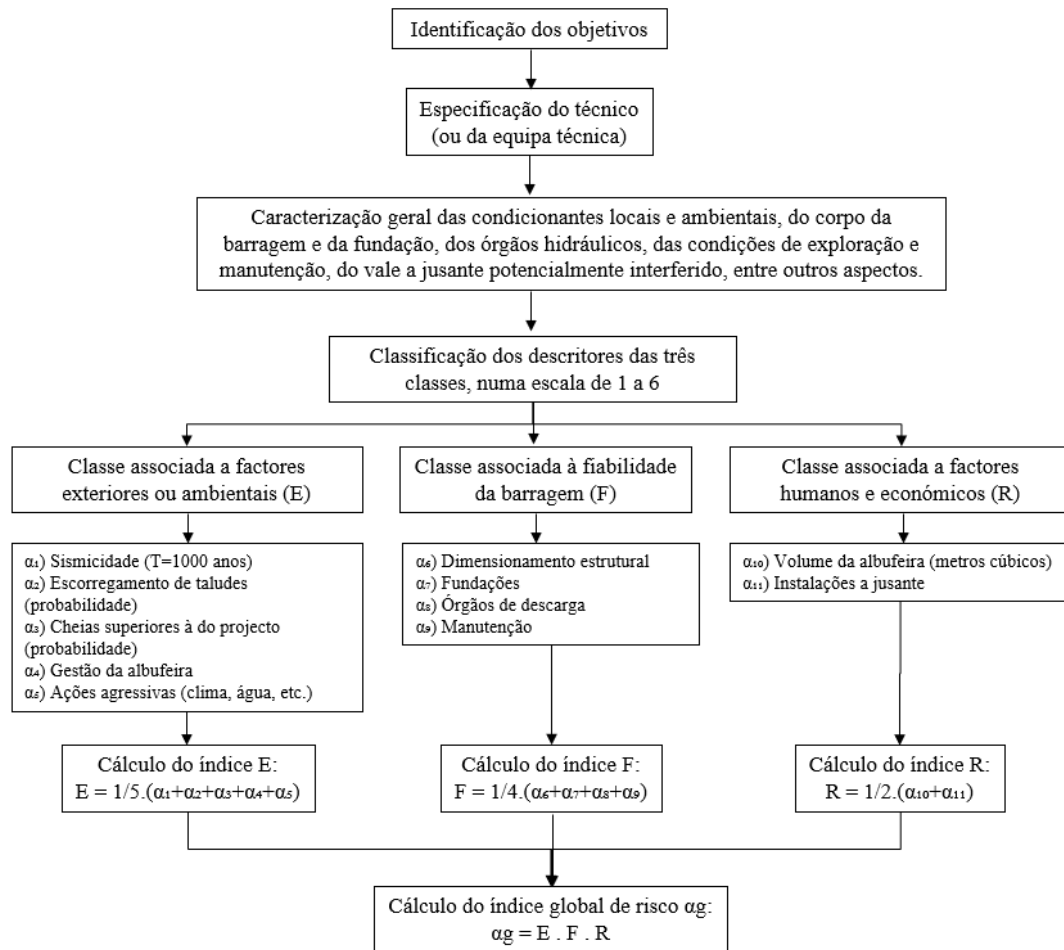
Outra aplicação relevante do índice Global de riscos está relacionada ao estudo da operacionalidade das estruturas ao longo de seu ciclo de vida. Lu *et al.* (2022) propõem um método que evidencia a importância do nível inicial do reservatório na segurança hidrológica de barragens. Diferentemente de abordagens tradicionais, que assumem cenários conservadores com reservatórios cheios no início de eventos extremos, o estudo analisa três diferentes condições iniciais com base em registros históricos. Utilizando simulações de Monte Carlo para gerar 100.000 hidrogramas, a análise é conduzida por meio de um índice global de risco que considera tanto o risco hidrológico da barragem quanto o risco a jusante. Os resultados reforçam a relevância da variabilidade do nível inicial na quantificação de riscos e propõem uma metodologia robusta para tratar as incertezas envolvidas.

No mesmo sentido, Zielinski et al. (2022) apresentam uma aplicação prática da análise de risco em larga escala no contexto do programa DRIP (*Dam Rehabilitation and Improvement Project*), na Índia. Com a meta de reabilitar mais de 5.000 grandes barragens, foi desenvolvida uma ferramenta de triagem baseada no índice global de riscos, porém com abordagem simplificada para permitir sua aplicação em portfólios extensos.

Estes exemplos reforçam o potencial da usabilidade dos índices de risco, no entanto, é importante destacar que tais estudos têm sido amplamente desenvolvidos no âmbito de barragens, enquanto há uma notável escassez de publicações e abordagens específicas voltadas à gestão de riscos em PDRs. Essa lacuna evidencia a necessidade de avanços teóricos e metodológicos que considerem os riscos envolvidos para essas estruturas de disposição de

rejeitos.

Figura 6 – Organograma de aplicação do índice Global de risco



Fonte: adaptado de Pimenta (2009)

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Painéis de segurança de barragens**. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/PaineisSeguranca>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- AGUIAR, Daniel Prenda de Oliveira. **Contribuição ao estudo do Índice de Segurança de Barragens - ISB**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014
- ÁGUIDO, Ana Caroline. **Gerenciamento sustentável de estruturas de armazenamento de rejeito: breve análise do Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos**. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2024, Balneário Camboriú. Anais... Balneário Camboriú: ABMS, 2024. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/68
- ALVES JUNIOR, F. M.; KOBİYAMA, M.; CORSEUIL, C. W. Mapeamento de Índice de Risco de Inundação de Área a Jusante de uma Barragem em Caso de Rompimento. **Mercator** (Fortaleza), v. 22, p. e22004, 2023.
- ANDRADE, F. K. G.; LORDSLEEM, A. C. Benchmarking em empresas de construção civil: identificação das melhores práticas. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 1, 2016.
- ARAÚJO, M. C. A. **De quem são as responsabilidades da barragem da Mina de Pau Branco em Nova Lima/MG**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas – Direito, 2022. Disponível em: <https://portal.fgv.br/artigos/quem-sao-responsabilidades-barragem-mina-pau-branco-nova-limamg>. Acesso em: 25 jul. 2024.
- ASMAT ROMERO, Brenda; ESCOBAR BENITES, Sergio Alfredo. **Impacto de la implementación de las Normas de Sostenibilidad NIIF S1 y S2 en la gestión de riesgos operativos de la Compañía minera ABC**, Lima 2024. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/683316/Escobar\\_BS.pdf?sequence=1](chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/683316/Escobar_BS.pdf?sequence=1). Acesso em 20 mai. 2025.
- AZAMBUJA CARVALHO, J. V. *et al.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 10.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHEIROS GEOTÉ. **Análise do comportamento de rejeitos de mineração submetidos a carregamentos de compressão** CNICOS JOVENS, 10., 2024, Balneário Camboriú: ABMS, 2024.
- BAIMA, Sandra Keila de Oliveira; CAMPOS, José Nilson Bezerra. Classificação de risco de barragens por índices de risco – um estudo de caso. **Geotecnia**, n. 132, p. 151-174, nov. 2014. Disponível em: [file:///C:/Users/ext.carlosaj1/Downloads/10497-Texto%20do%20Artigo-44619-1-10-20211111%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ext.carlosaj1/Downloads/10497-Texto%20do%20Artigo-44619-1-10-20211111%20(1).pdf). Acesso em: 12 jun. 2025.
- BAPTISTA, L. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. Lisboa: LNEC, 2009. (Coleção Teses e Programas de Investigação, TPI 59). Disponível em:

<http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/17187>. Acesso em: 6 jun. 2025

BATISTA, L. P. Estudo de caso-comparativo dos métodos de disposição de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais – Brasil. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. 4, p. 3, 2019.

BERNARDES, M. R.; DIAS, L. F.; GUIMARÃES, L. F. **Construtibilidade: a aplicação em pilhas de estéril e/ou rejeito**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 21., 2024, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABMS, 2024. Disponível em: <https://www.saffengenharia.com.br/wp-content/uploads/2024/04/Cobramseg-2024-Construtibilidade.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

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 dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 set. 2010.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei n.º 3.799, de 3 de outubro de 2024**. Altera o Decreto-Lei n.º 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Minas). Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2459990>. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL MINERAL. **Fundado GTMI para melhorar segurança das instalações**. 23 jan. 2025. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/fundado-gtmi-para-melhorar-seguranca-das-instalacoes>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CALDEIRA, Laura Maria Mello Saraiva. **Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro**. 2008. Tese (Doutorado) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2008.

CAMELO, S. H. H.; ANGERAMI, E. L. S. Riscos psicossociais no trabalho que podem levar ao estresse: uma análise da literatura. **Ciência, Cuidado e Saúde**, v. 7, n. 2, p. 234-240, 2008.

CAPANEMA, D.; NOGUEIRA, H.; FARIA, S.; BORGES, M.; ÁGUIDO, A. C. Gerenciamento sustentável de estruturas de armazenamento de rejeito: breve análise do Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 2024, Balneário Camboriú: ABMS, 2024. Disponível em: <https://editoraomnisscientia.com.br/artigoPDF/24222113764.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2025.

COMISSÃO NACIONAL PORTUGUESA DAS GRANDES BARRAGENS. Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. **1º Relatório de Progresso**. Janeiro 2005. Disponível em: <http://www.xitizap.com/analise-riscos-barragens.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CIGB – COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **Automated observation for the safety control of dams**. Boletim 41, 1982.

COMISSÃO NACIONAL PORTUGUESA DAS GRANDES BARRAGENS. **Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. 1º Relatório de Progresso.** Janeiro 2005. Disponível em: <http://www.xitizap.com/analise-riscos-barragens.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CRUZ, Claudinei Oliveira. **Classificação das barragens de rejeito baseada no risco de eventos indesejáveis utilizando dados do SIGBM.** 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

CURI, Adílson. **Lavra de minas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

DA SILVA PINTO, Filipa Catarina Vasconcelos; CARVALHO, Marto. **Fiabilidade na Avaliação de Risco: estudo comparativo de métodos semi-quantitativos de Avaliação de Risco em contexto ocupacional.** 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

DE SENA CARNEIRO, Junior; DANTAS, Wellson Rosário Santos. Responsabilidade penal no caso de danos ambientais. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 11, n. 3, p. 1300-1326, 2025.

DE SOUZA, Talles Jhonattan Elias. Os impactos ambientais decorrentes do rompimento da barragem em Mariana. **Revista do CNMP**, n. 7, p. 139-145, 2018.

DIAS SCHENK, Ana Carolina. GTMI: novo órgão é instituído para melhorar a gestão mundial de rejeitos de mineração. **Revista Mineração**, 23 jan. 2025. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2025/01/23/gtmi-novo-orgao-e-instituido-para-melhorar-a-gestao-mundial-de-rejeitos-de-mineracao/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

DLADLA, S. D.; RAMSAMY, S. Practical steps to Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) compliance for operational tailings storage facilities in South Africa. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 122, n. 6, p. 283-290, 2022.

DOMÍNGUEZ, Rodrigo; GOMEZ, Carlos; CERESO, Oskar. **Risk Analysis based on ETA, FTA and Bowtie methodologies for the bulk coal discharge process.** In: Advances in Safety Management and Human Performance: Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Safety Management and Human Factors, and Human Error, Reliability, Resilience, and Performance, July 25-29, 2021, USA. Springer International Publishing, 2021. p. 193-199.

DO NASCIMENTO, Angelo Augusto Dornelas; DA SILVA, Raul Vieira Martins; JARDIM, Helder Lages. **Análise da alteração do uso e ocupação da terra na região próxima aos municípios de Brumadinho e Mariana, antes e após o rompimento de barragens de mineração.** Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2025. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/analise-da-alteracao-do-uso-e-ocupacao-da-terra-na-regiao-proxima-aos-municipios?lang=pt-br>. Acesso em 14 jun. 2025.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de**

**resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

DUNJÓ, J. *et al.* Hazard and operability (HAZOP) analysis: a literature review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 173, n. 1-3, p. 19-32, 2010.

ELOI, D.; PAGANIN, M.; BASTOS, D.; MACIEL, W.; FILHO, M.; SILVA, R. **Geotechnical parameters of filtered tailings and waste rock from the Itabira Complex used in stacking projects. In: International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC)**, 7., 2024. Disponível em: <https://isc7.cimne.com/event/contribution/d859bdc6-7789-11ee-b489-000c29ddfc0c>. Acesso em: 14 jun. 2025.

FDTE; AECOM DO BRASIL. **Diretrizes técnicas e socioambientais para projetos de pilhas de rejeitos de mineração**. Belo Horizonte: Ministério Público do Estado de Minas Gerais, mar. 2024. Disponível em: [https://sapl.congonhas.mg.leg.br/media/sapl/public/documentoacessorio/2024/820/relatorio-versao\\_final\\_do\\_requerimento\\_cidadao\\_n8\\_de\\_2024.pdf](https://sapl.congonhas.mg.leg.br/media/sapl/public/documentoacessorio/2024/820/relatorio-versao_final_do_requerimento_cidadao_n8_de_2024.pdf). Acesso em: 11 jun. 2025.

FERREIRA, D. L. T. **Proposta de método para avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril e verificação da eficiência do uso de cal como revestimento de proteção**. 2025. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2025.

FRANÇA, G. P.; SILVA, V. L.; JARDIM, E. **Considerações para o Desenvolvimento de Projetos de Pilha de Rejeito Desaguado**. 2022. Disponível em: <https://geoestavel.com.br/wp-content/uploads/2022/09/Consideracoes-para-o-Desenvolvimento-de-Projetos-de-Pilhas-de-Rejeito-Desaguado.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

FREITAS, C. M. de; SILVA, M. A. da; MENEZES, F. C. de. **O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. Ciência e Cultura**, v. 68, n. 3, p. 25-30, 2016.

GABRIEL-MARTIN, I.; SORDO-WARD, A.; GARROTE, L.; GRANADOS, I. Stochastic assessment of the influence of reservoir operation in hydrological dam safety through risk indexes. **PROCEEDINGS**, v. 7, n. 1, p. 12, nov. 2018. MDPI.

GLOBAL TAILINGS REVIEW. **Global Industry Standard on Tailings Management**. 2020. Disponível em: <https://Globaltailingsreview.org/Global-industry-standard/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

GONÇALVES, W. R.; SANTOS, T. S. e. **Controle tecnológico em pilha de rejeitos de minério de ferro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Campinas, SP, 2020.

GRABILL, N. AI-augmented failure modes, effects, and criticality analysis (AI-FMECA) for industrial applications. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 250, p. 110308, 2024.

HAWLEY, M.; CUNNING, J. **Guidelines for mine waste dump and stockpile design**.

Clayton South: CSIRO Publishing, 2017.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. **Assurance and Validation Procedure Performance Expectations**. 2023. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/validation/procedure>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. **Governança de rejeitos: declaração de posicionamento sobre a gestão e governança de rejeitos**. Londres, 2020. Disponível em: <https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/mining-principles/pt-br/governanca-de-rejeitos.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. **Os Protocolos de Conformidade – Padrão Global da indústria para Gestão de Rejeitos**. 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/tailings/tailings-conformance-protocols>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. **Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos – minuta final**. 2020. Disponível em: [https://Globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/Global-tailings-standard\\_spreads\\_PT.pdf](https://Globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/Global-tailings-standard_spreads_PT.pdf). Acesso em: 22 mar. 2024.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. **Tailings management: good practice guide** – 2nd ed. London: ICMM, 2025. Disponível em: <https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/innovation/2025/tailings-management-good-practice-guide-2nd.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ICOLD. **Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences – Lessons Learnt from Practical Experiences**. Bulletin 121. Paris: ICOLD, 2001.

ICOLD. **Dam Safety Management – Operational Phase of the Dam Life Cycle**. Bulletin 154. Paris: ICOLD, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Guia de boas práticas: gestão de barragens e estruturas de disposição de rejeitos**. 1. ed. Brasília, 2019.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations**. Bulletin 164, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 31000:2018 – Risk management – Guidelines**. 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/65694.html>.

JASKULSKI, F. M. **Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método “One-Part”**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

KANG, J. *et al.* Research on risk evolution, prevention, and control of fire and explosion accidents in hydrogen refueling stations based on the AcciMap-FTA model. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 194, p. 107–118, 2025.

LACAZ, F. A. de C.; PORTO, M. F. de S.; PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista brasileira de saúde ocupacional**, v. 42, p. e9, 2017.

LAMBRANHO, L. **Complexo da pilha de rejeitos da Jaguar Mining que desmoronou em MG funciona com licenciamento renovado automaticamente desde 2012**. *Observatório da Mineração*, 4 mar. 2025. Disponível em: <https://observatoriodamineracao.com.br/complexo-da-pilha-de-rejeitos-da-jaguar-mining-que-desmoronou-em-mg-funciona-com-licenciamento-renovado-automaticamente-desde-2012/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, v. 5, n. 1, p. 1–14, 2016.

LOPES, P. P.; HAJJ, E. da C.; RODOVALHO, T. M. E. **Setor minerário brasileiro e seu impacto ambiental: uma revisão de opções berço-a-berço aplicada a resíduos, estéreis e rejeitos**. 2022. Holos. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Thammiris-Mohamad-El-Hajj/publication/369085745\\_Brazilian\\_mining\\_sector\\_and\\_its\\_environmental\\_impact\\_a\\_review\\_of\\_cradle-to-cradle\\_options\\_applied\\_to\\_residues\\_waste\\_and\\_tailings/links/6411dc5466f8522c38a885ce/Brazilian-mining-sector-and-its-environmental-impact-a-review-of-cradle-to-cradle-options-applied-to-residues-waste-and-tailings.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thammiris-Mohamad-El-Hajj/publication/369085745_Brazilian_mining_sector_and_its_environmental_impact_a_review_of_cradle-to-cradle_options_applied_to_residues_waste_and_tailings/links/6411dc5466f8522c38a885ce/Brazilian-mining-sector-and-its-environmental-impact-a-review-of-cradle-to-cradle-options-applied-to-residues-waste-and-tailings.pdf). Acesso em 10 jun. 2025.

LU, Q.; ZHONG, P.; XU, B.; HUANG, X.; ZHU, F.; WANG, H.; MA, Y. **Análise de risco multiobjetivo para operação de controle de inundações de um sistema complexo de reservatórios sob múltiplas incertezas correlacionadas tempo-espaço**. *Journal of Hydrology*, v. 606, p. 127419, 2022.

MAKDISSE, M. *et al.* Prevalência e fatores de risco associados à doença arterial periférica no projeto Corações do Brasil. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 91, p. 402–414, 2008.

MARTINS, M. A. K. **Uso da dinâmica de sistemas em projetos de mineração: estudo exploratório integrando aspectos técnicos e não técnicos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MELLO, A. V. de. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MELO, R. M. B. **Avaliação de risco**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Faculdade de Motricidade Humana, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269696691>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MESAVILLA, D. T. **Comportamento multiaxial de rejeitos de minério de ferro: influência da cimentação e de tempos de cura prolongados**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. **Deliberação**

**Normativa COPAM nº 62, de 17 de dezembro de 2002. Diário do Executivo de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 18 dez. 2002.

MENDES, A. M. *et al.* O PET e as visitas de campo como instrumento para efetivação do ensino, pesquisa e extensão: o caso de Bento Rodrigues e Brumadinho. **Revista PET Brasil**, v. 1, n. 1, p. 2–14, 2022.

NAKAMURA, E. A. M. V.; NAKAMURA, W. T.; JONES, G. D. C. Necessidade de estrutura de compliance nas instituições financeiras. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 19, n. 5, p. 257–275, 2019.

NOCERA, B. **Applicazione dell’analisi del rischio con FMEA e FMECA nell’esame di Tomografia Globale Corporea PET con 18F-FDG**. SC Medicina Nucleare AO Mauriziano di Torino, 2021.

PATROCÍNIO, F. R. O.; BIZAWU, S. K.; SILVA, I. M. Barragens de rejeitos de mineração: desafios e avanços na perspectiva da sustentabilidade. **Pensar Acadêmico**, v. 22, n. 2, p. 153–172, 2024.

PEREIRA, L. M. M.. **Estudo de propriedades geotécnicas de um rejeito de minério de ferro filtrado compactado para empilhamento a seco**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, 2024.

PEREIRA, S.; RIBEIRO, C. Riscos psicossociais no trabalho. **Gestão e Desenvolvimento**, n. 25, p. 103–120, 2017.

PINHEIRO, A. V.; SILVA, M. F. de S.; SALOMÃO, P. E. Métodos de estabilização de taludes em barragens de abastecimento: estudo de caso no município de Itambacuri–Minas Gerais. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 1, n. 1, 2021.

PIMENTA, L. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

RIZQIA, N. N. *et al.* Risk analysis of work accidents in the building revitalization project “Y” City Semarang by PT. X with fault tree analysis (FTA) method. **Journal of Safety Education**, v. 3, n. 1, p. 18–26, 2025.

RODRIGUES, B. O. **Avaliação do comportamento de escoamentos provenientes de rupturas hipotéticas de pilhas de rejeito por meio de métodos empíricos e hidrodinâmicos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

ROJAS, C. M. O. **O rompimento da barragem de rejeitos de Fundão e a ascensão do capitalismo de desastre no Brasil**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SHARAFAT, A.; LATIF, K.; SEO, J. Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 111, p. 103860, 2021.

SILVESTRINI, Tiago Alexandre Manenti. **Projetos de recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto: possíveis implicações dos “usos futuros” aplicados às áreas visando à segurança e estabilidade dos solos construídos**. 2013.

Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2013.

SOUZA, W. A. dos R. **Análise numérica do comportamento de pilhas de rejeito filtrado e co-disposição durante a construção**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

STELA, L. H.; DUARTE, J. C.; PEREIRA, C. O. Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de barragens: uma revisão. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, v. 1, n. 1, p. 34–45, 2020.

TONIETTO, Â.; SILVA, J. J. M. C. Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no Brasil. **Revista Brasileira de Criminalística**, v. 1, n. 1, p. 31–38, 2011.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de desaguamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; ZHAO, J.; VISWANATHAN, S. Intelligent systems for HAZOP analysis of complex process plants. **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, n. 9–10, p. 2291–2302, 2000.

VIEIRA, Benson Ambrosio. **Análise comparativa preliminar da produtividade dos caminhões fora de estrada Sany SKT90S e SKT110S em uma operação de transporte de rejeito filtrado: um estudo de caso**. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

VIANNA, L. F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

WAYHS, C. A. S. P. **Estudo do efeito da energia de compactação no comportamento mecânico de rejeitos de mineração de cobre – cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ZIELINSKI, P. A.; NARAYAN, P.; DONNELLY, C. R.; HALPIN, E.; QUEBBEMAN, J.; QADDUMI, H. M.; SINGH, C. R.; UEDA, S.; WISHART, M. **The development of a risk screening indexing tool for prioritizing dam safety remedial works**. E3S Web of Conferences, v. 346, p. 01012, maio 2022. EDP Sciences. DOI: 10.1051/e3sconf/202234601012

## SEGUNDA PARTE

### ARTIGO 1

#### GISTM E PILHAS DE REJEITOS: A INFLUÊNCIA DOS RISCOS NO PADRÃO

##### RESUMO

Os eventos envolvendo a ruptura das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e B1, em Brumadinho (2019), evidenciaram a necessidade de revisar as medidas de controle para mitigação do risco de barragens. No Brasil, os órgãos regulamentadores impuseram condições mais restritivas que dificultam a obtenção de licenças para novas estruturas. Esse cenário tem incentivado a mudança da disposição de rejeitos de barragens convencionais por pilhas como a alternativa mais viável e segura. Em 2020, foi publicado o *Global Industry Standard for Tailings Management* (GISTM), cujo principal objetivo é alcançar um impacto zero para as pessoas e o meio ambiente. O GISTM foi desenvolvido com a preocupação de redução dos riscos de falhas de estruturas de disposição de rejeitos com efeitos catastróficos, em especial para barragens. As pilhas destinadas ao armazenamento de rejeitos também estão incluídas nas preocupações do GISTM; entretanto, apresentam particularidades e exigem controles específicos que devem ser avaliados com maior atenção. Para tanto, é imprescindível estudar os requerimentos aplicáveis a essas estruturas no que tange aos controles de riscos. Este estudo avaliou a influência dos riscos estruturais, financeiros, ambientais, psicossociais e legais no GISTM, utilizando-se de análises estatísticas para sustentar as hipóteses. Como estudo de caso, utilizou-se um conjunto de dados de cinco pilhas de rejeitos, empregados na metodologia do *Risk Control Management System*, de Menezes *et al.* (2024). A partir das análises, identificou-se que os requerimentos do GISTM apresentam uma tendência de definir os controles para mitigação de riscos com maior recorrência nos riscos estruturais, ambientais e psicossociais. Essa distribuição está alinhada ao objetivo central do GISTM, pois os controles propostos contribuem diretamente para a redução desses riscos. Adicionalmente, verificou-se que a avaliação da aderência ao GISTM nas estruturas analisadas apresenta uma relação relevante com fatores influenciados pela legislação nacional vigente.

Palavras-chave: GISTM; Protocolos de Conformidade; estruturas de disposição; governança; gerenciamento de riscos.

## ABSTRACT

The events involving the collapse of the Fundão dam in Mariana (2015) and the B1 dam in Brumadinho (2019) highlighted the need to review control measures for dam risk mitigation. In Brazil, regulatory agencies have imposed more restrictive conditions, making it more difficult to obtain permits for new structures. This scenario has encouraged a shift from conventional tailings dams to dry-stacked tailings facilities (DSTFs) as a more viable and safer alternative. In 2020, the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) was published, with the main objective of achieving zero harm to people and the environment. The GISTM was developed with a focus on reducing the risk of catastrophic failures in tailings storage facilities, especially dams. Tailings piles used for storage are also included in the scope of the GISTM; however, they have specific characteristics and require tailored controls that must be evaluated with greater attention. Therefore, it is essential to study the requirements applicable to these structures in terms of risk control. This study evaluated the influence of structural, financial, environmental, psychosocial, and legal risks within the GISTM framework, using statistical analyses to support the hypotheses. As a case study, a dataset from five tailings piles was used, based on the methodology of the Risk Control Management System by Menezes *et al.* (2024). The analyses revealed that GISTM requirements tend to emphasize risk mitigation controls more frequently in relation to structural, environmental, and psychosocial risks. This distribution aligns with the core objective of GISTM, as the proposed controls directly contribute to the reduction of these risks. Additionally, it was found that the assessment of GISTM compliance in the analyzed structures showed a significant relationship with factors influenced by national legislation.

**Keywords:** GISTM; compliance protocols; provision frameworks; governance; risk management.

## 1. INTRODUÇÃO

A falha em estruturas geotécnicas, como barragens ou pilhas de rejeitos (PDRS), pode resultar em impactos significativos para a população, o meio ambiente e as propriedades. Os desastres decorrentes da ruptura da barragem de Fundão, em Mariana (2015), e da barragem B1, em Brumadinho (2019), esta última sem a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), exigida à época pela Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 (Brasil, 2017), do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), e posteriormente pela Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, despertaram a atenção de órgãos reguladores, empresas e da sociedade em geral.

Esses eventos impulsionaram uma série de mudanças voltadas ao aprimoramento dos processos de avaliação da segurança de barragens e ao fortalecimento das medidas de controle para o gerenciamento de riscos no Brasil e no mundo (Rose; Mugi; Saleh, 2023).

Em 26 de dezembro de 2017, foi criada a Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Lei nº 13.575/2017, em substituição ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Desde então, a ANM passou a adotar uma série de restrições e regulamentações voltadas à segurança de barragens, com o objetivo de prevenir novos eventos catastróficos. Entre essas normas, destacam-se a Resolução ANM nº 13/2019, a Resolução ANM nº 32/2020, a Resolução ANM nº 40/2020 e a Resolução ANM nº 95/2022, posteriormente alterada pelas Resoluções ANM nº 130/2023 e nº 175/2024.

Merecem destaque, ainda, as normas técnicas ABNT NBR 13028 e ABNT NBR 13029, ambas revisadas em novembro de 2024 e atualmente em novo processo de atualização. A implementação de regulamentações rigorosas é fundamental para o fortalecimento da segurança das barragens e contribui significativamente para a redução dos riscos associados às estruturas de disposição de rejeitos.

Como iniciativa internacional destaca-se o desenvolvimento do primeiro Padrão Global para o gerenciamento de rejeitos na indústria de mineração, denominado GISTM (Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos), do inglês *Global Industry Standard for Tailings Management* (ICMM, 2020). Este Padrão foi elaborado com a colaboração do PNUMA, PRI e ICMM, conforme descrito nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021). O ICMM, é uma organização Global que reúne empresas de mineração e metais para promover práticas sustentáveis e responsáveis no setor.

O principal objetivo do GISTM é eliminar os riscos associados ao rompimento de estruturas geotécnicas, garantindo que não haja impacto sobre as pessoas e o meio ambiente ao redor. Ele estabelece um conjunto de requerimentos que consolida as boas práticas de referência

Global, para propor medidas na redução do risco de falha catastrófica de estruturas de disposição de rejeitos, e promoção de melhorias no processo de gerenciamento e governança, principalmente no que tange às questões socioambientais (ICMM, 2021).

O GISTM é multidisciplinar e abrange amplamente as preocupações com comunidades afetadas, implementação de uma base de conhecimento integrado, estudos detalhados, padronização de projetos, construção, operação, fechamento, monitoramento das estruturas, gerenciamento e governança, resposta às emergências e recuperação a longo prazo (Wilkinson; Crystal; Goosen, 2025). Ademais, o Padrão busca promover uma ampla divulgação pública para garantir o acesso à informação e transparência dos processos de gerenciamento de rejeitos, principalmente para as empresas signatárias do ICMM.

A conformidade aos requerimentos do GISTM deve ser atingida pela estrutura geotécnica como um todo, e não apenas por unidade, significando que o operador é capaz de comprovar a existência de sistemas e processos eficazes para implementar todos os requerimentos aplicáveis do Padrão, sem contrapor as legislações vigentes (ICMM, 2021). O Padrão é aplicado tanto para estruturas convencionais como barragens, quanto a outros tipos de estruturas não convencionais, sendo que o maior foco tem sido o risco catastrófico de ruptura por barragens.

No entanto, os desafios enfrentados no licenciamento de novas barragens (De Resende; De Miranda Ribeiro; Dornelas, 2023) estimularam a adoção de novas metodologias para a disposição de rejeitos, como o preenchimento de cavas (Venturin, 2022; Diniz, 2023) e o empilhamento de rejeitos (Sacramento, 2024; Collatto, 2024) sendo as pilhas a mais utilizada atualmente (Wagner, 2025; Machado; Silva; Silva, 2025; Macson *et al.*, 2024). Dessa forma, considerando que as PDRS são estruturas geotécnicas amplamente utilizadas, torna-se essencial avaliá-las quanto à conformidade com o GISTM, uma vez que a plena aderência ao Padrão pode contribuir diretamente para o alcance do objetivo de zero danos às pessoas e ao meio ambiente, além de mitigar os diversos riscos associados às estruturas de disposição de rejeitos.

Ao mitigar os riscos, torna-se relevante compreender quais categorias de risco podem ser efetivamente reduzidas e de que forma elas são tratadas no contexto do GISTM. Embora existam estudos que abordem o Padrão de forma geral (Menezes *et al.*, 2024; Hudson-Edwards *et al.*, 2024; Menzies, 2025), ainda são escassas as pesquisas que enfocam especificamente sua aplicação em PDRS. Nesse sentido, o objetivo foca-se em avaliar como os riscos financeiros, psicossociais, estruturais, legais e ambientais são contemplados no GISTM, visando contribuir com a literatura técnica e oferecer subsídios para análises futuras no âmbito da gestão segura no setor mineral.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 GISTM

O Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos (GISTM) representa um marco significativo para o setor mineral, sendo o primeiro de alcance global que estabeleceu novos padrões mundiais para a segurança das barragens de rejeitos (ICMM, 2020). De acordo com o documento “Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos” (ICMM, 2020), o principal objetivo desse Padrão é evitar qualquer tipo de dano às pessoas e ao meio ambiente, adotando uma política de tolerância zero para fatalidades humanas.

Ele estabelece critérios para que os operadores assumam responsabilidades e garantam a segurança das estruturas de disposição de rejeitos em todas as fases do ciclo de vida, incluindo o fechamento e o pós-fechamento. Além disso, o Padrão promove a divulgação de informações relevantes, a prestação de contas e a responsabilidade pública (Cameron, 2025). Sua estruturação é detalhada no Quadro 2.

Em 2021, o ICMM publicou os Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021), que auxiliam os operadores e terceiros independentes na avaliação da implementação dos requerimentos do Padrão. Estes protocolos detalham os 77 requerimentos do GISTM através de 219 critérios claros e concisos, e devem ser realizadas duas avaliações: a primeira é uma autoavaliação realizada pelo empreendedor, e a segunda é a validação de terceiros conduzida por um auditor independente, que se baseará em grande parte, no trabalho de autoavaliação já realizado anteriormente. A autoavaliação dos requerimentos é conduzida em: atende, atende parcialmente, não atende e não aplicável (ICMM, 2021).

No entanto, ainda que os Protocolos de Conformidade discretize o Padrão para simplificar a avaliação, há ainda complexidade e subjetividade de alguns requerimentos. Nessa perspectiva, Menezes *et al.* (2024) desenvolveram um sistema de Gestão de Controle de Riscos (*Risk Control Management System - RCMS*) para avaliar a gestão e a governança das estruturas de disposição de rejeitos. O objetivo do sistema é realizar um diagnóstico, para avaliar o desempenho dos controles implementados na gestão e governança das estruturas, baseado nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021).

Quadro 2 - Divisão dos tópicos, princípios e requerimentos

<b>Tópicos</b>	<b>Princípio</b>	<b>Quantidade de Requerimentos</b>
<b>I: Comunidades Afetadas</b>	1	4
<b>II: Base integrada de conhecimentos</b>	2	4
	3	4
<b>III: Projeto, construção, operação e monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos</b>	4	8
	5	8
	6	6
	7	5
<b>IV: Gestão e governança</b>	8	7
	9	5
	10	7
	11	5
	12	2
<b>V: Resposta às emergências e recuperação de longo prazo</b>	13	4
	14	5
<b>Tópico VI: Divulgação pública e acesso à informação</b>	15	3
<b>6 Tópicos</b>	<b>15 Princípios</b>	<b>77 Requerimentos</b>

Fonte: ICM (2020).

Para comprovar a viabilidade e validação da sua ferramenta, a autora aplicou a metodologia em 8 estruturas de disposição de rejeitos, e após validação, estendeu sua pesquisa para outras 27 estruturas. Dos 77 requerimentos do Padrão, extraiu-se um questionário com 277 perguntas, e de forma simplificada, as respostas no questionário eram classificadas como: sim, não ou não se aplica aos requerimentos (Menezes *et al.*, 2024).

## 2.2 Distribuição de atendimento das pilhas

O trabalho de Menezes *et al.* (2024) abrange todos os tipos de estruturas de disposição de rejeitos, como barragens e PDRS. Com o objetivo de estudar somente PDRS, aplicou-se neste trabalho o questionário RCMS para cinco pilhas com características de projetos distintas, sendo que todas estão em operação. O questionário utilizado neste trabalho foi o mesmo utilizado na pesquisa de Menezes *et al.* (2024). Para fins de análise, as pilhas foram identificadas como P1, P2, P3, P4 e P5, correspondendo a identificação P1 à Pilha 1, e as demais seguindo essa mesma lógica de numeração sequencial. Cada pergunta faz referência a um

requerimento do Padrão, que abrange todos os princípios e tópicos apresentados no Quadro 2.

Por razões de confidencialidade, as pilhas e as empresas envolvidas não foram identificadas nominalmente. As estruturas avaliadas correspondem a PDRS provenientes da atividade minerária. A Pilha P1, situada em Minas Gerais, é resultante da exploração de zinco. As Pilhas P2 e P3 também são oriundas da exploração de zinco, localizadas no Peru. A Pilha P4, localizada na região central de Minas Gerais, está associada à exploração de minério de ferro. Já a Pilha P5 refere-se igualmente à exploração de zinco, situada no estado de Mato Grosso. A seleção dessas estruturas buscou contemplar a diversidade operacional, envolvendo rejeitos de diferentes naturezas, incluindo materiais piritosos, dolomíticos e de minério de ferro.

Como o GISTM foi desenvolvido para abranger todos os tipos de estruturas, foi necessário refinar as perguntas aplicáveis às PDRS, para definir um grupo amostral representativo do objeto de estudo. Das 277 perguntas originais (Menezes *et al.*, 2024), as questões relacionadas aos requerimentos 2.3, 2.4, 4.2, 4.5 e 5.3 foram eliminadas por tratarem exclusivamente de barragens.

Para todas as análises, utilizou-se o Microsoft Excel (Versão 2504 Build 16) para a organização e tabulação das informações, enquanto o RStudio (Versão 2025.05.0-496) foi empregado para as análises estatísticas e criação de gráficos.

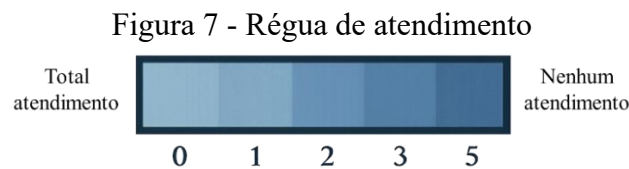
### **2.3 Tratamento dos dados**

O banco de dados da pesquisa teve como resultado as respostas de "sim", "não" ou "não se aplica", de cada uma das perguntas do RCMS (Menezes *et al.*, 2024), para as cinco pilhas estudadas. No entanto, as respostas “não se aplicam” foram eliminadas para evitar que influenciasses tanto nas respostas de atendimento, quanto nas de não atendimento. Com o objetivo de garantir que todas as perguntas tivessem a mesma distribuição de influência, independentemente do número de respostas, foi realizada a normalização dos dados nas análises realizadas no software RStudio.

Segundo Pasikowski (2022), as transformações de normalização são técnicas utilizadas para ajustar os dados de modo que todas as variáveis tenham uma escala comparável, minimizando o risco de distorções nos resultados causadas por diferenças nas ordens de magnitude ou nas unidades de medida. Essa padronização é essencial quando se deseja garantir que nenhuma variável exerça influência desproporcional na análise, especialmente em procedimentos estatísticos ou comparativos.

Visando à uniformização dos dados e à viabilização das análises, adotou-se uma

codificação binária simplificada, em que a resposta “sim” foi associada ao valor 0 e a resposta “não” ao valor 1. Essa codificação tem como base a premissa de que o atendimento aos requerimentos representa menor risco, enquanto o não atendimento implica maior risco. A partir dessa transformação, foi possível calcular o somatório dos valores em cada linha da matriz de avaliação, o que resultou na criação de uma régua de atendimento variando de 0 a 5. Nessa escala, o somatório “0” indica o atendimento total ao item avaliado, enquanto o valor “5” representa o não atendimento completo. Essa forma de mensuração padronizada permite comparar diferentes estruturas ou situações com base em um critério objetivo e quantitativo, conforme ilustrado na Figura 7.



Fonte: Elaboração própria (2025).

## 2.4 Distribuição de atendimento por tópicos

Conforme descrito nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021), o GISTM apresenta seis tópicos principais que são os grandes grupos globais do Padrão. Compreender a distribuição do atendimento por tópico é fundamental para a definição de prioridades na execução do plano de ação final. Embora o objetivo seja alcançar total conformidade com o Padrão, identificar os tópicos com maiores deficiências de conformidade permite direcionar melhor os recursos, uma vez que esses pontos tendem a exigir maior esforço para serem sanados. As implicações éticas de padronização na gestão são complexas, englobando aspectos como representação, dinâmicas de poder e criatividade (Hodgson; Cicmil, 2007), dessa forma, para avaliar as fragilidades no atendimento dos tópicos do Padrão, foram plotados gráficos para analisar a frequência de atendimento.

## 2.5 GISTM como ferramenta de redução de riscos

Através dos requerimentos que propõe um conjunto de boas práticas para o gerenciamento e governança de rejeitos, almeja-se contribuir para redução da probabilidade de ocorrência de um evento indesejado e das suas possíveis consequências (Coffey *et al.*, 2021). Analisar riscos é fornecer uma compreensão objetiva da probabilidade e do impacto de cada

tipo de risco nos processos (Vaduta *et al.*, 2016).

Kaur *et al.* (2024) reforça que é fundamental analisar os riscos associados as estruturas de disposição rejeitos, pois os danos relacionados a uma possível falha podem ser irreversíveis.

Quando se trata de barragens, a ANM nº 95 diz que “o empreendedor deve implementar o Processo de Gestão de Riscos para Barragens de Mineração (PGRBM) como parte integrante da gestão e da tomada de decisão, integrado nas operações e processos relacionados às barragens de mineração” (ANM, 2022).

Segundo Cruz (2024), a apreciação de risco ultrapassa os limites das análises puramente técnicas da engenharia de barragens, avançando para uma dimensão mais subjetiva, pautada em julgamentos de valor e influenciada por interesses políticos, sociais, econômicos e legais. No entanto, ainda não há legislações específicas que abordem o risco associado ao rompimento de PDRs, o que torna um fator motivador adicional para o desenvolvimento deste trabalho.

Para os riscos relacionados ao rompimento das pilhas, pode-se denominá-los como riscos estruturais (Fraga Filho; Aleixo, 2024). No entanto, há ainda uma variedade de riscos que devem ser mapeados, relacionados aos aspectos financeiros, ambientais, reputacionais, legais e psicossociais (Pimenta, 2009; Santana *et al.* 2025). O risco ambiental se manifesta na contaminação de ecossistemas e na perda de biodiversidade, com desastres como os de Mariana e Brumadinho evidenciando o impacto severo da liberação de rejeitos tóxicos (Rose; Mugi; Saleh, 2023)

No campo reputacional, estes desastres podem diminuir a confiança de acionistas, fornecedores, *stakeholders*, e de toda a sociedade, prejudicando a credibilidade corporativa e o valor de mercado. Paralelamente, no âmbito financeiro, a ruptura de uma PDRS acarreta para as empresas elevados custos com multas e despesas relacionadas à reparação da sociedade e do meio ambiente. Em 7 de dezembro de 2024, ocorreu a ruptura da parede norte da pilha seca Satinoco, na mina Turmalina, que acarretou para a empresa uma multa de R\$ 320 milhões (Brasil Mineral, 2025). Tudo isso resulta na perda de confiança por parte dos investidores, o que dificulta o acesso ao crédito e compromete a sustentabilidade econômica das empresas (De Souza Macedo *et al.*, 2022).

Os riscos psicossociais também são significativos. Trabalhadores e comunidades vizinhas enfrentam estresse e ansiedade devido à constante ameaça de acidentes, afetando a saúde mental, o bem-estar social e a produtividade. Ademais, os riscos legais e estruturais reforçam a necessidade de conformidade rigorosa com normas e auditorias técnicas, já que falhas na manutenção e monitoramento das estruturas de disposição de rejeitos podem resultar em sanções severas e prejuízos irreparáveis. Assim, a adoção de estratégias preventivas e

transparentes torna-se imprescindível para mitigar impactos e garantir a sustentabilidade da atividade mineradora (Calegari *et al.*, 2016; Rodrigues; Pereira; Fernandes, 2022).

A partir do interesse de identificar estes riscos em cada requerimento, realizou-se a classificação de cada pergunta do RCMS com base nos riscos associados, categorizados como estruturais, psicossociais, reputacionais, legais, financeiros e ambientais. Na análise realizada pelos autores, esses riscos podem ser identificados de forma concomitante em mais de uma pergunta e a sua representatividade pode ser diferente em cada requerimento. Desta forma, para ilustrar esta condição, foi preparado um gráfico de barras empilhadas e *heatmap* que mostra a distribuição de frequência desses riscos em cada requerimento.

Utilizou-se ainda do gráfico de radar para analisar essa distribuição no GISTM. A análise dos impactos dos riscos por meio do gráfico de radar são ferramentas importantes na visualização de dados, especialmente para representar dados multidimensionais de maneira compreensível. Segundo *Design of Improved 3D Radar Charts for Multidimensional Data Visualization* (2022), os gráficos de radar apresentam dados em um formato simples, permitindo comparações rápidas com pouca complexidade.

Outro ponto importante, além da frequência de ocorrência dos riscos estruturais, reputacionais, psicossociais, legais, ambientais e financeiros no Padrão Global, é observar o impacto desses riscos dentro do GISTM, pois um sistema holístico de gerenciamento de riscos, garante que as considerações de risco sejam incorporadas às decisões estratégicas (Horobko, 2024).

Quando os riscos são bem classificados por seus impactos, há a disseminação de uma forte cultura desses riscos, conforme menciona Balaji, Shreshta e Sujatha (2024). Ainda segundo os autores, a avaliação e o monitoramento contínuos de riscos contribuem para o sucesso organizacional sustentado em ambientes dinâmicos.

Para a análise final, quantificou-se o atendimento por tipo de riscos, a fim de identificar as fragilidades do Padrão em relação aos riscos e eliminar a possibilidade de ocorrência de um evento indesejado. Para interpretação dos dados, foi utilizado gráfico *boxplot*. Este tipo de gráfico exibe a mediana, os quartis e os valores discrepantes potenciais, fornecendo um resumo claro da tendência central e da variabilidade dos dados (Neto *et al.*, 2017). Ele ilustra com eficácia a forma da distribuição de dados, que geralmente são menos aparentes em outros tipos de gráficos, como histogramas (Streiner, 2017), além de facilitar a comparação de distribuições em vários grupos, permitindo a identificação das diferenças nas medianas e na variabilidade (Posman *et al.*, 2014).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Atendimento dos requerimentos do GISTM

Com o objetivo de quantificar a porcentagem global de atendimento aos requerimentos, calculou-se a porcentagem dos itens atendidos, não atendidos e não aplicáveis para cada pilha (Quadro 3). A P4 obteve o maior nível de atendimento ao Padrão, com 62,84% de aderência, enquanto a P1 teve o menor índice de atendimento (21,83%). Em relação às respostas de "não se aplica", P2 e P3 apresentaram menores porcentagens.

Quadro 3 - Porcentagem de Atendimento das Pilhas.

Pilha	0 (Atende)	1 (Não atende)	Não se aplica
P1	21,83 %	68,20%	9,97%
P2	39,08%	57,09%	3,83%
P3	35,22%	61,04%	3,74%
P4	62,84%	24,90%	12,26%
P5	47,89%	42,15%	9,96%

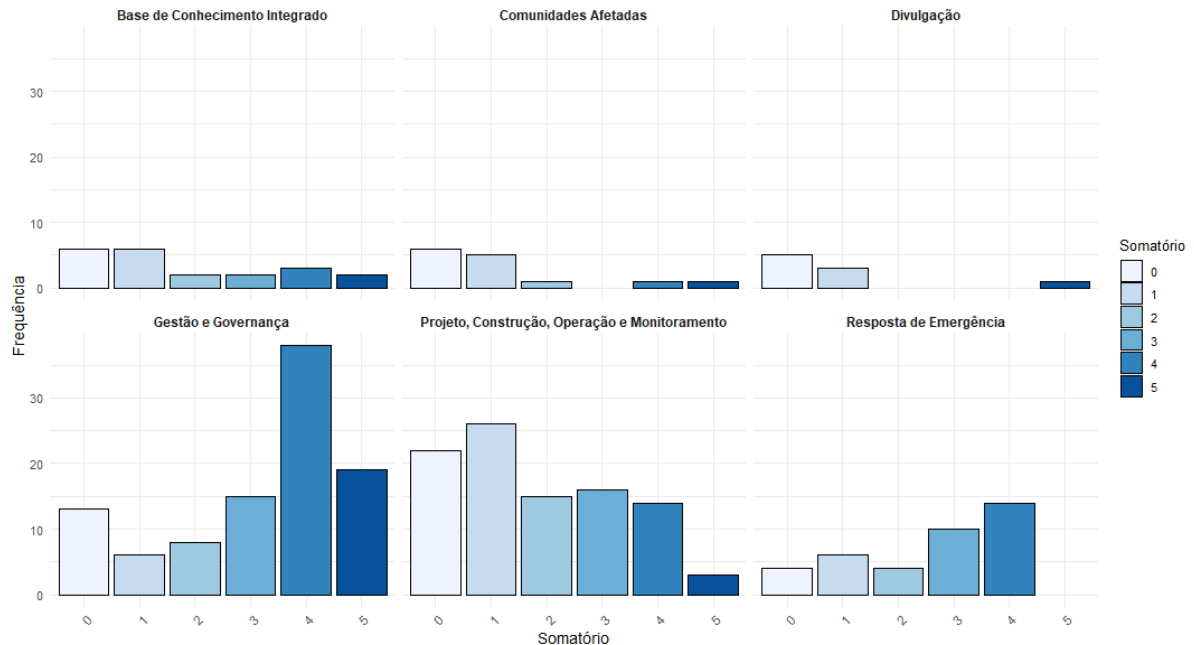
Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 3.2 Atendimento por tópicos do GISTM

Em relação à avaliação de atendimento por tópicos do GISTM, a distribuição de frequência varia de 0 a 5, conforme ilustrado na Figura 8, recordando que foram retirados os dados de não se aplicam. Esse valor representa o somatório das respostas para cada pilha. Por exemplo, um somatório igual a 5 indica que todas as cinco pilhas receberam a resposta 'não atende'. Assim, uma barra com valor 0 representa atendimento total (ou conformidade) ao tópico, enquanto uma barra com valor 5 indica nenhuma conformidade. A frequência, por sua vez, corresponde ao número de vezes que determinado somatório ocorre em um tópico.

Para o tópico base de conhecimento integrado, observa-se uma distribuição equilibrada de atendimento, com maior tendência de conformidade do que não conformidade. No tópico comunidades afetadas, divulgação pública e projeto, construção, operação e monitoramento, há a mesma tendência, indicando maior atendimento ao Padrão Global.

Figura 8 - Frequência dos valores de somatório por tópico



Fonte: Elaboração própria (2025).

Os tópicos de gestão e governança, bem como o de resposta a emergências, apresentam os menores níveis de atendimento entre as pilhas analisadas. No caso específico de resposta a emergências, é relevante considerar que P2 e P3 estão localizadas no Peru. No Brasil, a cultura relacionada à gestão de emergências em barragens está mais consolidada se comparada com o Peru, impulsionada por exigências legais rigorosas.

Um exemplo é a Resolução ANM nº 95, de 2022, que estabelece o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), com diretrizes específicas para a atuação em emergências, além de outros mecanismos de controle bem definidos (Cruz, 2024). O Peru, por sua vez, tem avançado na gestão da disposição de rejeitos e estéril, especialmente no que se refere às ações emergenciais, como demonstra o Decreto Supremo nº 034-2023-EM (Peru, 2023).

Em relação a gestão e governança, Almeida, Anjos e Sousa Teodósio (2024) apontam que a responsabilidade social corporativa deve ser compreendida para além da simples geração de bens e serviços úteis à sociedade, da criação de empregos, do pagamento de salários, da distribuição de lucros, do cumprimento da legislação vigente e do recolhimento de impostos. Embora essas ações tradicionais agreguem valor e sejam frequentemente medidas por indicadores econômicos, o conceito de valor compartilhado amplia esse entendimento ao incluir, de forma integrada, aspectos sociais, ambientais e culturais.

Nesse contexto, a governança assume um papel central, pois é por meio dela que se

assegura a incorporação efetiva das dimensões sociais, ambientais e de segurança à estratégia empresarial, além disso, a governança apresenta particularidades conforme o país onde estão localizadas as estruturas, o que pode influenciar significativamente sua eficácia (Sérgio *et al.* 2025). A adoção de modelos ideais de governança e gestão pode ser determinante na prevenção de falhas em estruturas geotécnicas, como apontam Silveira *et al.* (2019).

Após os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), observou-se um movimento de reestruturação interna nas empresas responsáveis, com a designação de profissionais na alta gestão, visando mitigar fragilidades relacionadas à segurança e reduzir os riscos de sanções, como multas e paralisações operacionais (Cardoso, 2025). Nesse contexto, torna-se imprescindível uma atenção especial ao atendimento dos requerimentos associados à gestão e à governança.

### 3.3 Distribuição de riscos

Para cada requerimento, foi realizada a classificação de cada pergunta do RCMS com base nos riscos associados, categorizados como riscos estruturais, psicossociais, reputacionais, legais, financeiros e operacionais. A distribuição de requerimentos e perguntas por tipo de risco é demonstrada no Quadro 4.

Para visualizar a proporção de cada tipo de risco (estrutural, psicossocial, reputacional, legal, financeiro e operacional) em relação aos requerimentos analisados, plotou-se um gráfico de barras empilhadas (Figura 9). Cada barra representa um requerimento, e as diferentes cores correspondem aos tipos de risco, facilitando a comparação entre essas variáveis.

De forma geral, observa-se que os riscos estruturais (62%), ambientais (49%), reputacionais (47%) e legais (45%) foram os mais frequentes no Padrão. Os riscos psicossociais aparecem com 39% e os riscos financeiros com 15%. Para exemplificar a distribuição, é ilustrado na Figura 10 a frequência de cada risco, onde é demonstrada a predominância dos riscos estruturais em todo o GISTM.

Quando plotados os dados no *boxplot* (Figura 11), o risco legal apresenta maior mediana de aderência, ou seja, maior conformidade com os critérios avaliados. O risco financeiro apresentou mediana mais baixa e maior dispersão com maior variabilidade na aderência. Já os riscos psicossociais e reputacionais tiveram distribuição ampla alta e baixa aderência nos casos.

O objetivo da análise foi verificar se existiam diferenças significativas entre os grupos de risco e em relação ao atendimento dos requerimentos analisados. Para isso, foi utilizado o teste ANOVA (Análise de Variância), que compara as médias de diferentes grupos para

identificar possíveis diferenças. O valor de  $p$  obtido foi de 0,357, o que é superior ao nível de significância comum de 0,05, indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre os grupos de risco. No entanto, os riscos identificados devem ser cuidadosamente considerados e tratados para a eliminação de quaisquer eventos indesejados. Esse resultado está em conformidade com o objetivo principal do GISTM, que visa alcançar um impacto zero para as pessoas e o meio ambiente (ICMM, 2020), o que exige que todos os riscos sejam devidamente identificados.

De acordo com os Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021), há fortes interconexões, dependências e pontos de sobreposição entre a maioria dos requerimentos, os quais são aspectos importantes a serem considerados no processo de autoavaliação e validação por terceiros. Nesse sentido, a distribuição de perguntas por tipos de riscos demonstrou heterogeneidade quanto à distribuição, estando em conformidade com o documento inicial (ICMM, 2021), além de que a implementação de um sistema abrangente de classificação de risco pode ajudar a categorizar pilhas e priorizar os esforços de mitigação (Cruz, 2024).

Como mostrado na Figura 9, os requerimentos 5.7, 5.8, 6.5, 8.4, 13.1 e 13.3 apresentam maior aptidão a riscos envolvidos. Esses requerimentos referem-se aos tópicos de projeto, construção, operação e monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos, gestão e governança, resposta às emergências e recuperação de longo prazo. São itens importantes a se considerar, uma vez que a estrutura de análises de riscos relacionadas aos riscos de projetos auxilia na avaliação de longo prazo durante e após o fechamento (Thomé; Ribeiro, 2019).

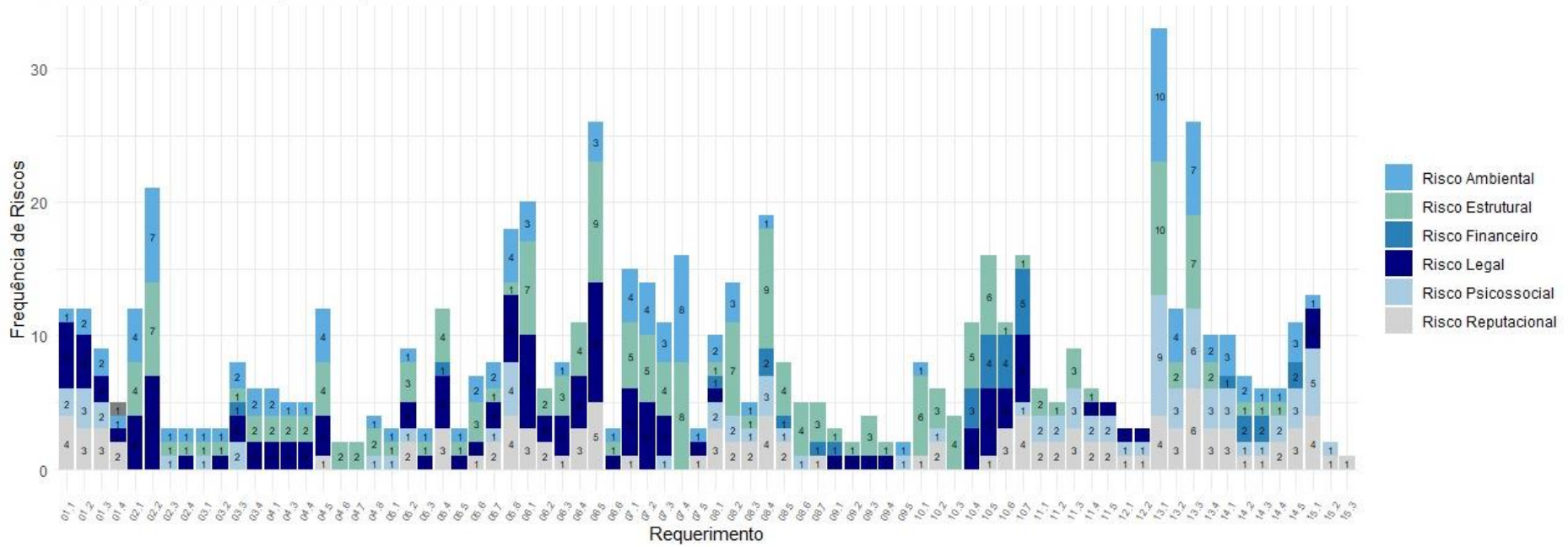
Embora o foco geralmente esteja nos riscos imediatos de falhas das estruturas, que são os riscos estruturais, pode-se constatar pelas análises, que outros riscos são de extrema importância para o bom gerenciamento dos rejeitos (Cacciuttolo *et al.*, 2023). A frequência de riscos varia significativamente entre os requerimentos, visto que alguns requerimentos possuem um acúmulo expressivo de riscos, acima de 20 ou 30 ocorrências. Além do risco estrutural, o risco ambiental aparece como fator crítico para a conformidade com os requerimentos, e deve ser um item preocupante para se considerar, conforme descreve Marques *et al.* (2024).

Quadro 4 - Classificação dos requerimentos conforme o tipo de risco associado.

Riscos	Tipo de Risco	Requerimento do Padrão	Perguntas	Número de Questões
I	<b>Risco Financeiro</b>	3.3, 5.4, 8.1, 8.4, 8.5, 8.7, 9.1, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 14.2, 14.3, 14.5, 15.1	33, 71, 135, 150, 151, 158, 167, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 259, 260, 261, 262, 263, 267, 269	31
II	<b>Risco Psicossocial</b>	1.1, 1.2, 1.3, 2.3, 3.2, 3.3, 3.4, 5.1, 5.2, 5.8, 7.3, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 9.5, 10.2, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 12.1, 12.2, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 15.1, 15.2	5,6,7,8, 11, 13, 14, 27, 31, 33, 34, 60, 61, 62, 78, 79, 80, 81, 82, 120, 135, 137, 138, 144, 145, 147, 153, 155, 159, 160, 178, 190, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 238, 239, 240, 241, 242, 244, 245, 246, 247, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 262, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275	82
III	<b>Risco Reputacional</b>	1.1, 1.3, 1.4; 2.1, 5.2, 5.4, 5.7, 5.8, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.2, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.7, 10.1, 10.2, 10.6, 10.7, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 12.1, 12.2, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 15.1, 15.3	2,3,4,5, 11, 12, 13, 14, 15, 63, 64, 69, 70, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 91, 92, 96, 97, 98, 100, 102, 105, 106, 108, 114, 132, 133, 134, 136, 139, 140, 145, 146, 148, 149, 152, 154, 156, 157, 166, 180, 188, 189, 208, 209, 210, 211, 214, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 238, 239, 240, 241, 244, 245, 246, 247, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 262, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 276, 277	105
IV	<b>Risco Legal</b>	1.1, 1.2, 1.3; 1.4; 2.1; 2.2, 2.3; 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 8.1, 9.2, 9.4, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 11.4, 12.2, 13.1, 15.1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 30,32, 33, 34, 35,36, 37, 38, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 132, 133, 169, 170, 175, 176, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 226, 228, 230, 231, 271, 272, 273	122
V	<b>Risco Estrutural</b>	2.1; 2.2; 2.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 9.1, 9.3, 9.5, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.7, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4	16, 17, 18, 19, 20, 21,22,23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 83, 84,85,86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 171, 172, 173, 174, 177, 181, 183, 184, 185, 186, 187, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 212, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 227, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 243, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 261, 263, 265	186
VI	<b>Risco Ambiental</b>	1.2, 1.3, 2.2; 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 5.1, 5.2, 5.4, 5.6, 5.7, 5.8, 6.1, 6.3, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 8.1, 8.2, 8.4, 10.1, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.5, 15.1	6,10, 11, 12, 15, 21, 22,23,24,25,26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 45, 47, 48, 49, 53, 54, 60, 61, 62, 68, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 87, 88, 89, 93, 101, 103, 104, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 117, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 141, 142, 143, 146, 148, 179, 182, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 240, 241, 242, 243,244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 266, 267, 268, 269, 273	109

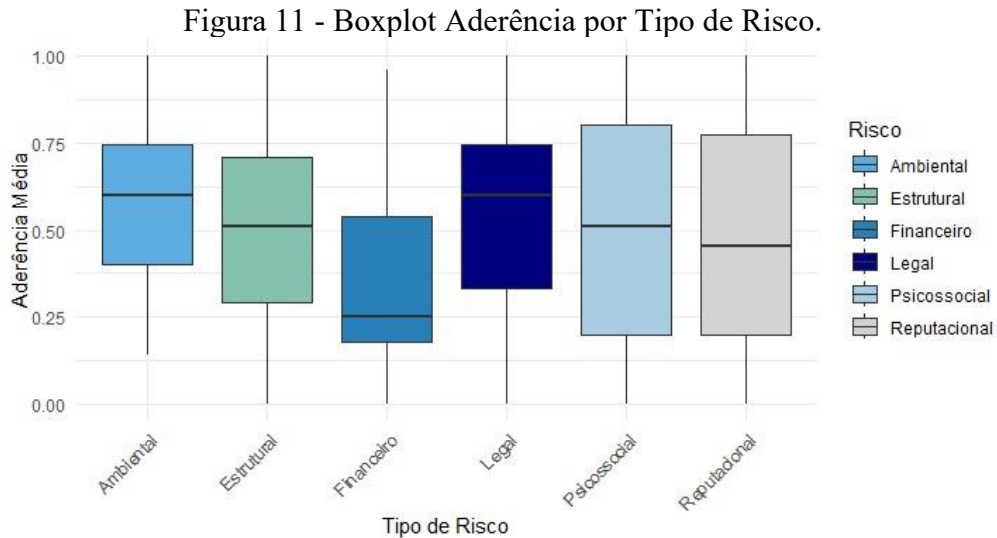
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 9 - Distribuição de Riscos por Requerimento



Fonte: Elaboração própria (2025).





Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4. CONCLUSÕES

Diante da relevância das falhas em estruturas de disposição de rejeitos e dos potenciais impactos catastróficos associados, este estudo reforça a importância de abordagens integradas para a gestão de riscos no setor mineral. A partir da análise da aplicação do GISTM em pilhas de rejeitos, observou-se que o Padrão consolida práticas fundamentais para a mitigação de riscos, promovendo avanços significativos em governança, segurança e transparência. Ao incorporar ferramentas estatísticas para identificar a representatividade e a contribuição dos diferentes tipos de risco no Padrão, o trabalho ofereceu uma abordagem metodológica inovadora, que pode subsidiar futuras avaliações de conformidade e apoiar o processo de certificação.

A análise de conformidade com os tópicos, princípios e requerimentos do GISTM revelou um Padrão segmentado, evidenciando baixa aderência geral de atendimento. Entre os tópicos avaliados, os de gerenciamento e governança foram os que apresentaram os menores níveis de atendimento, indicando a necessidade de maiores esforços para sua implementação efetiva nas pilhas de disposição de rejeitos (PDRs).

Em relação aos riscos, os riscos estruturais e ambientais foram os mais frequentes no Padrão (62% e 49%, respectivamente), seguidos pelos reputacionais (47%) e legais (45%). O teste ANOVA, feito após a análise de aderência em relação aos riscos, indicou que não há diferença estatisticamente significativa entre os tipos de risco ( $p > 0,05$ ), sendo todos relevantes quanto à distribuição no Padrão.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a adoção de estratégias

integradas de gestão pode ser vantajosa para reduzir vulnerabilidades e aprimorar a conformidade com o GISTM. Isso implica utilizar o Padrão como uma ferramenta para identificar riscos, gerenciar e sanar lacunas, além de assegurar o alinhamento com seus requerimentos. O atendimento ao GISTM contribui diretamente para a redução da probabilidade e/ou do impacto dos riscos em PDRS. Embora o Padrão tenha um foco com as preocupações aplicáveis ao risco de falha de barragens, sua abordagem pode ser estendida a outros tipos de estruturas de disposição de rejeitos demonstrando efetividade.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. J. de; ANJOS, P. D. S. dos; SOUSA TEODÓSIO, A. dos S. de. Lições críticas de governança de um desastre de rompimento de barragem de mineração em Brumadinho, Brasil. **CODS – Colóquio Organizações, Desenvolvimento e Sustentabilidade**, Universidade da Amazônia – UNAMA, v. 15, 2024.
- BALAJI, Saradha; SHRESHTA, Lolakpuri; SUJATHA, K. A Study on Risk Management in Corporate Business. **Involvement International Journal of Business**, v. 1, n. 3, p. 197-209, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.62569/ijb.v1i3.26>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- BRASIL MINERAL. **Jaguar Mining é multada em R\$ 320 milhões por acidente com pilha de rejeitos**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/jaguar-mining-e-multada-em-r-320-milhoes-por-acidente-com-pilha-de-rejeitos#:~:text=OURO-,Jaguar%20Mining%20%C3%A9%20multada%20em%20R%24%20320%20milh%C3%B5es,acidente%20com%20pilha%20de%20rejeitos>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Estabelece diretrizes para a elaboração do Plano de Segurança de Barragens de Mineração. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 18 maio 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/portaria-dnpm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017>. Acesso em: 18 mai. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 13.575 de 26 de dezembro de 2017**. Cria a Agência Nacional de Mineração (Anm); Extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (Dnpm); Altera as Leis nºs 11.046, de 27 de Dezembro De 2004, E 10.826, De 22 De Dezembro De 2003; E Revoga A Lei Nº 8.876, De 2 De Maio de 1994, e Dispositivos do Decreto-Lei nº 227, de 28 de Fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em: [https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=13575&ano=2017&ato=8bdQTUq5EeZpWT8d5#:~:text=CR%C3%80A%20AG%C3%80NCIA%20NACIONAL%20DE,FEVEREIRO%20DE%201967%20\(C%C3%93DIGO%20DE](https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=13575&ano=2017&ato=8bdQTUq5EeZpWT8d5#:~:text=CR%C3%80A%20AG%C3%80NCIA%20NACIONAL%20DE,FEVEREIRO%20DE%201967%20(C%C3%93DIGO%20DE). Acesso em: 10 mai. 2025.
- BRASIL. **Resolução ANM Nº 95, de 07 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília: Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2025.
- CACCIUTTOLO, Carlos *et al.* Low-cost sensors technologies for monitoring sustainability and safety issues in mining activities: advances, gaps, and future directions in the digitalization for smart mining. **Sensors**, v. 23, n. 15, p. 6846, 2023.
- CALEGARI, Izabela Paranaíba *et al.* Efeitos da reputação corporativa no custo de capital próprio em empresas brasileiras listadas. **Revista Universo Contábil**, v. 12, n. 1, p. 178-198, 2016.
- CAMERON, M. Avoiding another Brumadinho tailings disaster. **Australia's Paydirt**, v. 1, n. 335, p. 59-61, 2025.

CARDOSO, J. P. M. **Centros de monitoramento geotécnico em barragens de rejeito : revisão das abordagens manuais e automatizadas**. 2025. 48 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

COFFEY, J. P. Alcançando a intenção do projeto, reduzindo riscos e economizando custos em instalações de armazenamento de rejeitos. In: FOURIE, Andy; REID, David (eds.) **Paste 2021: Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2021. p. 3-16. Disponível em: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_REPO/2115\\_01](https://doi.org/10.36487/ACG_REPO/2115_01). Acesso em: 12 jan. 2025.

COLLATTO, Décio. **Influência da variação de umidade de compactação nas propriedades mecânicas de rejeito de minério de ferro estabilizado com aglomerante pozolânico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: [https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:ZVFokNZLBVEJ:scholar.google.com/&hl=pt-BR&as\\_sdt=0,5&scioq=COLLATTO,+D%C3%A9cio.+Influ%C3%Aancia+da+varia%C3%A7%C3%A3o+de+umidade+de+compacta%C3%A7%C3%A3o+nas+propriedades+mec%C3%A2nicas+de+rejeito+de+min%C3%A9rio+de+ferro+estabilizado+com+aglomerante+pozol%C3%A2nico.+2024](https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:ZVFokNZLBVEJ:scholar.google.com/&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&scioq=COLLATTO,+D%C3%A9cio.+Influ%C3%Aancia+da+varia%C3%A7%C3%A3o+de+umidade+de+compacta%C3%A7%C3%A3o+nas+propriedades+mec%C3%A2nicas+de+rejeito+de+min%C3%A9rio+de+ferro+estabilizado+com+aglomerante+pozol%C3%A2nico.+2024). Acesso em: 15 mai. 2025.

CRUZ, C. O. **Classificação das barragens de rejeito baseada no risco de eventos indesejáveis utilizando dados do SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração da ANM**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

DE ANDRADE, Felipe Scarpelli. Análise de Riscos e a Atividade de Inteligência. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, v. 8, n. 2, p. 90-116, 2017.

DE RESENDE, Fernanda Dal Sasso; DE MIRANDA RIBEIRO, Flávio; DORNELAS, Iamê Peixoto. QUATRO ANOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM BRUMADINHO: reflexões sobre o legado e as lições aprendidas sobre o modelo de licenciamento. **REVISTA ELETRÔNICA LEOPOLDIANUM**, v. 49, n. 138, p. 18-18, 2023.

DINIZ, Thiago Fonseca. **Análise de algumas características geotécnicas de rejeitos dispostos no Quadrilátero Ferrífero visando alternativas de reuso**. 2023. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

FDTE; AECOM DO BRASIL. Diretrizes técnicas e socioambientais para projetos de pilhas de rejeitos de mineração. Belo Horizonte: Ministério Público do Estado de Minas Gerais, mar. 2024. Disponível em: [https://sapl.congonhas.mg.leg.br/media/sapl/public/documentoacessorio/2024/820/relatorio-versao\\_final\\_do\\_requerimento\\_cidadao\\_n8\\_de\\_2024.pdf](https://sapl.congonhas.mg.leg.br/media/sapl/public/documentoacessorio/2024/820/relatorio-versao_final_do_requerimento_cidadao_n8_de_2024.pdf). Acesso em: 11 jun. 2025.

NERI, A.C. *et al.* **Diretrizes Técnicas e Socioambientais para Projetos de Pilhas de Disposição de Rejeitos de Mineração**. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia, 2024.

FRAGA FILHO, Carlos Alberto Dutra; ALEIXO, Rui. Major recent failures in Brazilian mine waste containment facilities, current cases of maximum emergency level and imminent risk of rupture, and a brief sustainability analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 45, p. 56399-56427, 2024.

HODGSON, D.; CICMIL, S. A política de padrões na gestão moderna: Tornando “o projeto” uma realidade. **Journal of Management Studies**, v. 3, p. 431–450, 1º de maio de 2007.

Disponível em:

[https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/joms\\_680.pdf?abstractid=976214&mirid=4](https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/joms_680.pdf?abstractid=976214&mirid=4).

Acesso em: 08 abr. 2025.

HOROBKO, R. Integration of risk management systems to ensure enterprise security and competitive advantages. **Aktual'ni problemi innovacijnoi ekonomiki**, 2024, n. 5, p. 20–26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36887/2524-0455-2024-5-4>. Acesso em: 05 abr. 2025.

HUDSON-EDWARDS, Karen A. *et al.* Tailings storage facilities, failures and disaster risk. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 5, n. 9, p. 612-630, 2024.

ICMM. **Os Protocolos de Conformidade Global: Padrão Global da indústria para Gestão de Rejeitos**, 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/tailings/tailings-conformance-protocols>. Acesso em: 25 jul. 2024.

ICMM. **PADRÃO GLOBAL DA INDÚSTRIA PARA GESTÃO DE REJEITOS – Minuta Final**, 2020. Disponível em: [https://Globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/Global-tailings-standard\\_spreads\\_PT.pdf](https://Globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/Global-tailings-standard_spreads_PT.pdf). Acesso em: 10 mar. 2025.

MACHADO, Adriel Constantino; SILVA, Elenice Maria Schons; SILVA, André Carlos. Estabilização do processo de britagem de carvão mineral de um depósito de Santa Catarina, Brasil. **REVISTA DELOS**, v. 18, n. 65, p. e4326-e4326, 2025.

MACSON, J. C *et al.* Utilização de Novas Tecnologias no Monitoramento de Pilha de Rejeito: Monitoramento Térmico com Uso de Drone, **Cobramseg**, 2024.

MARQUES, Francisco Roldineli Varela *et al.* Governança social, ambiental e corporativa: influência sobre a imagem organizacional. **Journal of Business and Management**, v. 26, p. 19-23, 2024.

MENEZES, D. A. *et al.* **A data-driven approach linking the credible failure modes for TSFs risk assessment**, Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2024.

MENZIES, Tristan Jónsson. Ground Models for Tailings Management. **Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications**, v. 30, n. 1, 2025.

NETO, José Valladares *et al.* Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**, v. 26, n. 76, 2017.

PASIKOWSKI, Sławomir. Normalization transformations of data in the procedure of statistical methods used in education research. **Lubelski Rocznik Pedagogiczny**, v. 41, n. 4,

p. 91-101, 2022.

PERU. Decreto Supremo nº 034-2023-EM. Aprova o regulamento para gestão de segurança de barragens de rejeitos de mineração. **Ministerio de Energía y Minas**, Lima, 2023.

Disponível em: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5634713/4990975-ds-n-034-2023-em.PDF?v=1704385619>. Acesso em: 16 maio 2025.

PIMENTA, Lurdes. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 58-120.

RODRIGUES, M. E.; PEREIRA, L. F.; FERNANDES, F. G. Uso do método HEC-RAS para análise de ruptura de barragem em cenários de emergência: estudo de caso. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 3, 2022.

ROSE, Rodrigo L.; MUGI, Sohan R.; SALEH, Joseph Homer. Accident investigation and lessons not learned: AcciMap analysis of successive tailings dam collapses in Brazil. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 236, p. 109308, 2023.

SACRAMENTO, Tiago dos Santos. **Codisposição e disposição compartilhada de estéreis e rejeitos da mineração**: uma análise crítica sobre a metodologia. 2024. 72 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

SANTANA, Hernani Ciro *et al.* Percepção de risco e sua influência na vida dos moradores diante da possibilidade de colapso de uma barragem de rejeitos de mineração. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 41, n. 4, p. e00075023, 2025.

SANTOS, Eucymara França Nunes *et al.* Contribuição de técnicas multivariadas a índices de seca na compreensão das otto-regiões da bacia do São Francisco. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e7210313118-e7210313118, 2021.

SÉRGIO, Fernando Rodrigues *et al.* Capacitação de profissionais envolvidos em segurança de barragens, segundo o novo marco legal. **ARACÊ**, v. 7, n. 1, p. 1690-1708, 2025.

SILVEIRA, Fernando A. O. *et al.* Evitar o rompimento de barragens de rejeitos requer governança, parceria e responsabilidade. **Biodiversidade e Conservação**, v. 28, 1933-1934, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S10531-019-01752-5>. Acesso em 04 mai. 2025.

THE GLOBAL TAILINGS MANAGEMENT INSTITUTE (GTMI). **The GTMI – A resource hub for tailings management**, 2025. Disponível em: <https://thegtmi.org>. Acesso em: 18 mai. 2025.

THOMÉ, Romeu; RIBEIRO, Luiz Gustavo Gonçalves. A descaracterização de barragens de rejeito e o plano de fechamento de mina como instrumentos de mitigação de riscos na mineração. **Veredas do Direito, Belo Horizonte**, v. 16, n. 35, p. 63-85, 2019.

VENTURIN, Amadeu Magnoni. **Análise de percolação em uma pilha de rejeito filtrado**. 2022, 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em:

[https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV\\_9a4b350f30bf45e3fa6f7a8f2edc0bd7](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_9a4b350f30bf45e3fa6f7a8f2edc0bd7). Acesso: em 16

mai. 2025.

WAGNER, Alexia Cindy. **Influência da granulometria no comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro.** 2025, 252 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2025.

WILKINSON, Katie; CRYSTAL, Colleen; GOOSEN, Peter. Review of alternative dewatering technologies for application to South African platinum tailings. *In: Paste 2025: Proceedings of the 27th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings.* Australian Centre for Geomechanics, 2025. p. 33-48.

### **ggplot2**

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.* Springer-Verlag New York. Disponível em: <https://ggplot2.tidyverse.org>

### **dplyr**

Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation.* R package version 1.1.4. Disponível em: <https://dplyr.tidyverse.org>

### **tidyr**

Wickham, H., & Girlich, M. (2023). *tidyr: Tidy Messy Data.* R package version 1.3.0. Disponível em: <https://tidyr.tidyverse.org>

### **readxl**

Wickham, H., & Bryan, J. (2023). *readxl: Read Excel Files.* R package version 1.4.3. Disponível em: <https://readxl.tidyverse.org>

### **reshape2**

Wickham, H. (2007). *Reshaping Data with the reshape Package.* Journal of Statistical Software, 21(12), 1–20. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=reshape2>

### **tidyverse**

Wickham, H., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Grolemund, G., *et al.* (2023). *tidyverse: Easily Install and Load the Tidyverse.* R package version 2.0.0. Disponível em: <https://www.tidyverse.org>

### **fmsb**

Nakazawa, M. (2023). *fmsb: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data.* R package version 0.7.5. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=fmsb>

### **ggradar**

Ricard, P. (2021). *ggradar: Create Radar Charts Using 'ggplot2'.* R package version 0.2. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggradar>

### **RColorBrewer**

Neuwirth, E. (2022). *RColorBrewer: ColorBrewer Palettes.* R package version 1.1-3. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>

### **FactoMineR**

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). *FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis.* Journal of Statistical Software, 25(1), 1-18. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR>

### **factoextra**

Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses.* R package version 1.0.7. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

## ANEXO 1 – SCRIPTS UTILIZADOS RSTUDIO

### **Pacotes utilizados**

```
library(tidyverse)
library(FactoMineR)
```

```

library(factoextra)
library(ggplot2)
library(pastecs)
library(dplyr)
library(readxl)
library(tidyr)
library(RColorBrewer)

```

### I Script para plot de frequencia em barra

```

arquivo3 <- "dados3.xlsx"
dados3 <- read_excel(arquivo2, sheet = 1, col_names = TRUE)
dados_zero_somatorio <- dados3[dados3$Somatório == 0, ]
contagem_zero_somatorio <- nrow(dados_zero_somatorio)
requerimentos_zero_somatorio <- dados_zero_somatorio$Requerimento
cat("Número de vezes em que o Somatório é igual a zero: ", contagem_zero_somatorio, "\n")
cat("Requerimentos com Somatório igual a zero: \n")
print(requerimentos_zero_somatorio)
distribuicao_por_topico_dplyr <- dados3 %>%
  group_by(Tópico, Somatório) %>%
  summarise(Contagem = n()) %>%
  spread(key = Somatório, value = Contagem, fill = 0)
print(distribuicao_por_topico_dplyr)
distribuicao_por_topico <- table(dados3$Tópico, dados3$Somatório)
print(distribuicao_por_topico)
distribuicao_df <- as.data.frame(distribuicao_por_topico)
colnames(distribuicao_df) <- c("Tópico", "Somatório", "Contagem")
ggplot(distribuicao_df, aes(x = Tópico, y = Contagem, fill = as.factor(Somatório))) +
  geom_bar(stat = "identity", position = "dodge") + # 'dodge' para barras lado a lado
  labs(title = "Distribuição do Somatório por Tópico",
       x = "Tópico",
       y = "Contagem",
       fill = "Somatório") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))
dados_geg <- dados_clean %>%
  filter(Tópico == "Gestão e Governança")
ggplot(dados_geg, aes(x = Requerimento, fill = as.factor(Somatório))) +
  geom_bar(position = "dodge", color = "black", width = 0.8) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Frequência do Somatório por Requerimento",
    x = "Requerimento",
    y = "Frequência",
    fill = "Somatório"
  ) +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    strip.text = element_text(size = 10, face = "bold") )
ggplot(dados_clean, aes(x = factor(Somatório), fill = factor(Somatório))) +
  geom_bar(stat = "count", color = "black") +
  facet_wrap(~ Tópico, scales = "fixed") +
  theme_minimal() +
  scale_fill_brewer(palette = "Set3") +
  labs(title = "Frequência dos Valores de Somatório por Tópico",
       x = "Somatório",
       y = "Frequência",
       fill = "Somatório"
  ) +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),

```

```

strip.text = element_text(size = 10, face = "bold"),
axis.title.x = element_text(size = 12),
axis.title.y = element_text(size = 12)
)
ggplot(dados_clean, aes(x = factor(Somatório), fill = factor(Somatório))) +
  geom_bar(stat = "count", color = "black") +
  facet_wrap(~ Tópico, scales = "fixed") +
  theme_minimal() +
  scale_fill_brewer(palette = "Blues") + # Paleta de tons de azul
  labs(
    title = "Frequência dos Valores de Somatório por Tópico",
    x = "Somatório",
    y = "Frequência",
    fill = "Somatório"
  ) +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    strip.text = element_text(size = 10, face = "bold"),
    axis.title.x = element_text(size = 12),
    axis.title.y = element_text(size = 12)
  )
ggplot(dados_clean, aes(x = factor(Somatório), fill = factor(Somatório))) +
  geom_bar(stat = "count", color = "black") +
  facet_wrap(~ Tópico, scales = "fixed") + # Escala fixa para todos os tópicos
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Frequência dos Valores de Somatório por Tópico",
    x = "Somatório",
    y = "Frequência",
    fill = "Somatório"
  ) +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1), # Ajuste do texto do eixo x
    strip.text = element_text(size = 10, face = "bold"),
    axis.title.x = element_text(size = 12),
    axis.title.y = element_text(size = 12)
  )
)

```

## II Script para contagem

```

arquivo <- "dados1.xlsx"
dados <- read_excel(arquivo, sheet = 1, col_names = TRUE)
contagem_zero <- sum(as.numeric(dados$PI001) == 0, na.rm = TRUE)
contagem_um <- sum(as.numeric(dados$PI001) == 1, na.rm = TRUE)
contagem_dois <- sum(as.numeric(dados$PI001) == 2, na.rm = TRUE)

```

## III Script para análise de componentes principais (PCA)

```

dados <- read_excel("DADOSPCA.xlsx")
dados_pca <- dados %>%
  select(-Tópico) %>%
  mutate(across(everything(), as.numeric))
dados_pca <- na.omit(dados)
res.pca <- PCA(dados_pca[,4:8], scale.unit = TRUE, graph = FALSE)
paleta_azul <- brewer.pal(n = 9, name = "Blues")
fviz_eig(res.pca,
  addlabels = TRUE,
  ylim = c(0, 100),
  barfill = paleta_azul[5],
  barcolor = paleta_azul[9])
fviz_pca_var(res.pca,
  col.var = "cos2",
  gradient.cols = paleta_azul[c(3, 6, 9)])
fviz_pca_ind(res.pca, col.ind = "cos2", gradient.cols = paleta_azul[c(3, 6, 9)])

```

```

print(res.pca$var$contrib)
fviz_pca_var(res.pca, col.var = "contrib")
IV Script de regressão logística a partir do PCA
library(pROC)
#2. Como utilizar a PCA em outras análises?
pca_scores <- res.pca$ind$coord # Obtém os escores das componentes
pca_ind <- as.data.frame(res.pca$ind$coord)
pca_ind$Requerimento <- dados_pca$Requerimento
pca_ind$Requerimento <- as.factor(pca_ind$Requerimento)
modelo_logistico <- glm(Requerimento ~ Dim.1 + Dim.2, data = pca_ind, family = binomial)
summary(modelo_logistico)
pseudoR2 <- 1 - modelo_logistico$deviance / modelo_logistico$null.deviance
pseudoR2
anova(modelo_logistico, test = "Chisq")
pca_ind$prob_pred <- predict(modelo_logistico, type = "response")
roc_curve <- roc(pca_ind$Requerimento, pca_ind$prob_pred)
plot(roc_curve, col = "blue", main = "Curva ROC")
auc(roc_curve)
V Script para aderência
dados <- read_excel("DADOSPCA.xlsx")
dados[dados == ""] <- NA
dados <- na.omit(dados)
for (col in c("PI001", "PI002", "PI003", "PI004", "PI005")) {
  dados[[col]] <- as.factor(dados[[col]])}
dados <- dados %>%
  rowwise() %>%
  mutate(aderencia = sum(c(PI001, PI002, PI003, PI004, PI005) == 0) / 5) %>%
  ungroup()
head(dados)
summary(dados$aderencia)
table(dados$aderencia)
mean(dados$aderencia)
cores_risco <- c("Legal" = "#000080",
  "Reputacional" = "#D3D3D3",
  "Psicossocial" = "#a9cce3",
  "Ambiental" = "#5dade2",
  "Estrutural" = "#85c1ae",
  "Financeiro" = "#2980b9")
ggplot(dados, aes(x = aderencia, fill = after_stat(count))) +
  geom_histogram(binwidth = 0.1, color = "black", alpha = 0.7) +
  scale_fill_distiller(palette = "Blues", direction = 1) +
  labs(title = "Distribuição da Aderência",
  x = "Taxa de Aderência",
  y = "Frequência") +
  theme_minimal()
aderencia_por_principio <- dados %>%
  group_by(Principio) %>%
  summarise(aderencia_media = mean(aderencia))
print(aderencia_por_principio)
ggplot(aderencia_por_principio, aes(x = factor(Principio), y = aderencia_media, fill = aderencia_media)) +
  geom_bar(stat = "identity", color = "black") +
  scale_fill_distiller(palette = "Blues", direction = 1) +
  labs(title = "Aderência por Principio",
  x = "Principio",
  y = "Média de Aderência") +
  theme_minimal() +
  coord_flip()
dados$aderencia_cat <- cut(dados$aderencia, breaks = c(0, 0.5, 1), labels = c("Baixa", "Alta"))
tabela <- table(dados$Principio, dados$aderencia_cat)
chisq.test(tabela)

```

```

aderencia_por_requerimento <- dados %>%
  group_by(Requerimento) %>%
  summarise(aderencia_media = mean(aderencia))
print(n=63, aderencia_por_requerimento)
ggplot(aderencia_por_requerimento, aes(x = reorder(Requerimento, aderencia_media), y = aderencia_media,
  fill = aderencia_media)) +
  geom_bar(stat = "identity", color = "black") +
  scale_fill_distiller(palette = "Blues", direction = 1) +
  labs(title = "Aderência por Requerimento",
    x = "Requerimento",
    y = "Média de Aderência",
    fill = "Aderência") +
  theme_minimal() +
  coord_flip()
relatorio <- list(
  "Média de Aderência" = mean(dados$aderencia),
  "Mediana da Aderência" = median(dados$aderencia),
  "Desvio-Padrão da Aderência" = sd(dados$aderencia),
  "Princípio com Maior Aderência" =
aderencia_por_principio[which.max(aderencia_por_principio$aderencia_media), ],
  "Princípio com Menor Aderência" =
aderencia_por_principio[which.min(aderencia_por_principio$aderencia_media), ]
)
print(relatorio)
aderencia_por_requerimento <- data.frame(
  Requerimento = c("01.1", "01.2", "01.3", "01.4", "02.1", "02.2", "02.3", "03.1", "03.2", "03.4", "04.1", "04.4",
"04.5", "04.6", "04.8", "05.1", "05.4", "05.5", "05.6", "06.1", "06.2", "06.3", "06.4", "06.5", "06.6", "07.1",
"07.2", "07.3", "07.4", "07.5",
"08.1", "08.2", "08.3", "08.4", "08.5", "08.6", "08.7", "09.1", "09.2", "09.3", "09.4", "09.5", "10.1",
"10.2", "10.3", "10.4", "10.6", "10.7", "11.1", "11.2", "11.3", "11.4", "11.5", "12.1", "12.2", "13.1",
"13.2", "13.3", "13.4", "14.5", "15.1", "15.2", "15.3"),
  aderencia_media = c(0.65, 1, 0.733, 0.6, 0.333, 0.743, 0.6, 0.4, 0.2, 0.8,
0.8, 0.8, 0.72, 0.4, 0.4, 0.6, 0.6, 0.4, 0.467, 0.52,
0.7, 0.467, 0.7, 0.25, 0.2, 0.76, 0.68, 0.75, 0.675, 0.6,
0.16, 0.143, 0.2, 0.4, 0.25, 0.55, 0.2, 0.2, 0.2, 0.4,
0.1, 1, 0.425, 0, 0.25, 0.15, 0, 0.48, 1, 0.7,
0.8, 0.9, 0.2, 0, 0.2, 0.511, 0.2, 0.36, 0.8, 0.6,
0.96, 0.4, 0.4)
)
Financeiro <- data.frame(
  Requerimento = c("03.3", "05.4", "08.1", "08.4", "08.5", "08.7", "09.1", "10.4", "10.5", "10.6",
"10.7", "14.2", "14.3", "14.5", "15.1"))
Psicossocial <- data.frame(
  Requerimento = c("1.1", "1.2", "1.3", "2.3", "3.2", "3.3", "3.4", "5.1", "5.2", "5.8", "7.3",
"8.1", "8.2", "8.3", "8.4", "8.5", "8.6", "9.5", "10.2", "11.1", "11.2", "11.3",
"11.4", "11.5", "12.1", "12.2", "13.1", "13.2", "13.3", "13.4", "14.1", "14.2",
"14.3", "14.4", "14.5", "15.1", "15.2"))
Reputacional <- data.frame(
  Requerimento = c("1.1", "1.3", "1.4", "2.1", "5.2", "5.4", "5.7", "5.8", "6.1", "6.2", "6.3", "6.4",
"6.5", "6.6", "7.2", "8.1", "8.2", "8.3", "8.4", "8.5", "8.7", "10.1", "10.2", "10.6", "10.7",
"11.1", "11.2", "11.3", "11.4", "11.5", "12.1", "12.2", "13.1", "13.2", "13.3", "13.4", "14.1",
"14.2", "14.3", "14.4", "14.5", "15.1", "15.3"))
Legal <- data.frame(
  Requerimento = c("01.1", "01.2", "01.3", "01.4", "02.1", "02.2", "02.3", "03.4", "04.1", "04.2", "04.3", "04.4",
"04.5", "05.2", "05.4",
"05.5", "05.6", "05.7", "05.8", "06.1", "06.2", "06.3", "06.4", "06.5", "06.6", "07.1", "07.2", "07.3",
"08.1", "09.2",
"09.4", "10.4", "10.5", "10.6", "10.7", "11.4", "12.2", "13.1", "15.1"))
Estrutural <- data.frame(
  Requerimento = c("02.1", "02.2", "02.3", "03.4", "04.1", "04.2", "04.3", "04.4", "04.5", "04.6", "04.7", "04.8",

```

```

"05.1", "05.2", "05.4",
  "05.5", "05.6", "05.7", "06.1", "06.2", "06.3", "06.4", "06.5", "06.6", "07.1", "07.2", "07.3", "07.4",
"07.5", "08.2",
  "08.3", "08.4", "08.5", "08.6", "08.7", "09.1", "09.3", "09.5", "10.1", "10.2", "10.3", "10.4", "10.5",
"10.7", "11.1",
  "11.2", "11.3", "11.4", "11.5", "13.1", "13.2", "13.3", "13.4"))
Ambiental<- data.frame(
  Requerimento = c("01.2", "01.3", "02.2", "02.3", "03.1", "03.2", "03.3", "03.4", "04.1", "04.2", "04.4", "04.5",
"04.6", "05.1", "05.2",
  "05.4", "05.6", "05.7", "05.8", "06.1", "06.3", "06.4", "06.5", "07.1", "07.2", "07.3", "07.4", "07.5",
"08.1", "08.2",
  "08.4", "10.1", "13.1", "13.2", "13.3", "13.4", "14.1", "14.2", "14.3", "14.5", "15.1"))
riscos <- data.frame(
  Requerimento = c(
    Financeiro$Requerimento, Psicossocial$Requerimento, Reputacional$Requerimento,
    Legal$Requerimento, Estrutural$Requerimento, Ambiental$Requerimento
  ),
  Risco = c(
    rep("Financeiro", length(Financeiro$Requerimento)),
    rep("Psicossocial", length(Psicossocial$Requerimento)),
    rep("Reputacional", length(Reputacional$Requerimento)),
    rep("Legal", length(Legal$Requerimento)),
    rep("Estrutural", length(Estrutural$Requerimento)),
    rep("Ambiental", length(Ambiental$Requerimento))
  )
)
head(riscos)
dados_completos <- merge(aderencia_por_requerimento, riscos, by = "Requerimento", all.x = TRUE)
head(dados_completos)
media_por_risco <- aggregate(aderencia_media ~ Risco, data = dados_completos, mean, na.rm = TRUE)
print(media_por_risco)
ggplot(dados_completos, aes(x = Risco, y = aderencia_media, fill = Risco)) +
  geom_boxplot() +
  scale_fill_manual(values = cores_risco) + # Aplicar as cores personalizadas
  theme_minimal() +
  labs(title = "Aderência por Tipo de Risco",
    x = "Tipo de Risco",
    y = "Aderência Média") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))
anova_result <- aov(aderencia_media ~ Risco, data = dados_completos)
summary(anova_result)
VI Script para tabela de contingência
tabela_contingencia_dplyr <- dados %>%
  group_by(resultado, PI005) %>%
  summarise(contagem = n())
tabela_contingencia_dplyr
VII Script para ANOVA
dados_3_semnumero <- dados3[,-3]
dados3_clean <- na.omit(dados3)
dados3_clean$Tópico <- as.factor(dados3_clean$Tópico) # Tópico deve ser fator
dados3_clean$Somatório <- as.numeric(dados3_clean$Somatório) # Somatório deve ser numérico
anova_result <- aov(Somatório ~ Tópico, data = dados3_clean)
summary(anova_result)

tukey_result <- TukeyHSD(anova_result)
print(tukey_result)
VIII Script para riscos
Analise_Riscos = Analise_Riscos
dados <- read.csv("Analise_Riscos.csv")
dados <- dados %>%

```

```

filter(!is.na(Requerimento) & !is.na(Riscos) & Riscos != "")
dados_separados <- dados %>%
  separate_rows(Riscos, sep = ",") %>%
  mutate(Riscos = trimws(Riscos))
dados_resumidos <- dados_separados %>%
  group_by(Requerimento, Riscos) %>%
  summarise(Frequencia = n(), .groups = 'drop')
dados_separados <- dados_separados %>%
  mutate(Riscos = case_when(
    Riscos == "A" ~ "Risco Ambiental",
    Riscos == "P" ~ "Risco Psicossocial",
    Riscos == "R" ~ "Risco Reputacional",
    Riscos == "F" ~ "Risco Financeiro",
    Riscos == "E" ~ "Risco Estrutural",
    Riscos == "L" ~ "Risco Legal",
    TRUE ~ Riscos
  ))
grafico <- ggplot(dados_resumidos, aes(x = Requerimento, y = Frequencia, fill = Riscos)) +
  geom_bar(stat = "identity") +
  geom_text(aes(label = Frequencia), position = position_stack(vjust = 0.5), size = 2) +
  labs(title = "Distribuição de Riscos por Requerimento",
       x = "Requerimento",
       y = "Frequência de Riscos") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1, size = 6),
        legend.title = element_blank()) +
  scale_fill_manual(values = c("Risco Legal" = "#000080",
                              "Risco Reputacional" = "#D3D3D3",
                              "Risco Psicossocial" = "#A9CCE3",
                              "Risco Ambiental" = "#5DADE2",
                              "Risco Estrutural" = "#85C1AE",
                              "Risco Financeiro" = "#2980B9"))

print(grafico)
geom_text(data = dados_globais,
          aes(x = Inf, y = Frequencia_total, label = paste0(round(Porcentagem_Global, 1), "%"), fill = Riscos),
          position = position_stack(vjust = 0.5),
          size = 3, hjust = 1.1, color = "black", fontface = "bold")

print(grafico)
ggplot(dados_resumidos, aes(x = Requerimento, y = Riscos, fill = Frequencia)) +
  geom_tile() +
  scale_fill_gradient(low = "white", high = "blue") +
  labs(title = "Heatmap de Frequências de Riscos por Requerimento",
       x = "Requerimento",
       y = "Tipo de Risco") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1))+
  theme(axis.text.x = element_text(size = 5))
dados_resumo <- dados %>%
  group_by(Requerimento, Riscos) %>%
  summarise(contagem = n()) %>%
  spread(key = Riscos, value = contagem, fill = 0)
head(dados_resumo)
dados_resumo$Risco_Reputacional <- dados_resumo$`Risco Reputacional`

anova_result1 <- aov(Risco_Reputacional ~ Requerimento, data = dados_resumo)
summary(anova_result)
dados_resumo$Risco_Psicossocial <- dados_resumo$`Risco Psicossocial`
anova_result2 <- aov(Risco_Psicossocial ~ Requerimento, data = dados_resumo)
summary(anova_result)
dados_resumo$Risco_Ambiental <- dados_resumo$`Risco Ambiental`

```

```
anova_result3 <- aov(Risco_Ambiental ~ Requerimento, data = dados_resumo)
summary(anova_result)
dados_resumo$Risco_Estrutural <- dados_resumo$`Risco Estrutural`
anova_result4 <- aov(Risco_Estrutural ~ Requerimento, data = dados_resumo)
summary(anova_result)
dados_resumo$Risco_Financeiro <- dados_resumo$`Risco Financeiro`
anova_result5 <- aov(Risco_Financeiro ~ Requerimento, data = dados_resumo)
summary(anova_result)
dados_resumo$Risco_Legal <- dados_resumo$`Risco Legal`
anova_result5 <- aov(Risco_Legal ~ Requerimento, data = dados_resumo)
summary(anova_result)
```

## **TERCEIRA PARTE**

### **ARTIGO 2**

#### **PROPOSIÇÃO DE ÍNDICE GLOBAL DE RISCO PARA PILHAS DE REJEITOS COM FUNDAMENTAÇÃO NO PADRÃO GLOBAL DA INDÚSTRIA PARA GESTÃO DE REJEITOS**

##### **RESUMO**

A intensificação das exigências regulatórias e os recorrentes desastres envolvendo barragens de rejeitos evidenciaram a necessidade de aprimorar a gestão de risco de estruturas de disposição de rejeitos, e principalmente as estruturas que utilizam de modelos construtivos e ou operativos alternativos, como as pilhas de disposição de rejeitos (PDRs). Neste contexto, o presente estudo propõe uma metodologia de análise de riscos baseada no Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos (GISTM), com foco na construção de um Índice Global de Riscos ( $\alpha_g$ ) que integra dimensões estruturais, ambientais, legais, reputacionais, financeiras e psicossociais. A metodologia adota uma abordagem semiquantitativa, permitindo classificar as estruturas em zonas de risco e orientar ações de mitigação. O modelo foi aplicado a cinco PDRs situadas no Brasil e no Peru, cujos resultados revelaram diferentes níveis de conformidade com o GISTM e destacaram o índice  $\alpha_g$  como ferramenta robusta para priorização de esforços e tomada de decisão. A proposta contribui para o avanço da governança de riscos em estruturas de rejeitos, oferecendo um modelo replicável, transparente e alinhado às boas práticas internacionais de segurança e sustentabilidade.

Palavras-chave: Padrão Global; índice de análise de risco; pilhas de rejeitos; gestão de riscos; mineração.

## ABSTRACT

The intensification of regulatory requirements and recurring disasters involving tailings dams have highlighted the need to improve the management of alternative structures, such as dry disposal piles (DDPs). In this context, the present study proposes an innovative risk analysis methodology based on the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), focusing on the development of a Global Risk Index ( $\alpha_g$ ) that integrates structural, environmental, legal, reputational, financial, and psychosocial dimensions. The methodology adopts a semi-quantitative approach, enabling the classification of structures into risk zones and guiding mitigation actions. The model was applied to five DDPs located in Brazil and Peru, with results revealing varying levels of compliance with the GISTM and highlighting the  $\alpha_g$  index as a robust tool for prioritizing efforts and supporting decision-making. This proposal contributes to advancing risk governance in tailings structures by offering a replicable, transparent model aligned with the best international practices for safety and sustainability.

Keywords: Global Standard; risk analysis index; tailings stacks; risk management; mining.

## 1. INTRODUÇÃO

A disposição de rejeitos constitui uma fase essencial na cadeia produtiva da mineração, especialmente diante da crescente demanda mundial por minerais estratégicos e da complexidade operacional dos empreendimentos extrativos. Os desastres recentes relacionados ao rompimento de barragens evidenciaram não apenas fragilidades técnicas, mas também deficiências regulatórias e de governança na gestão desses rejeitos (Sérgio et al., 2025).

Em 2024, o Brasil registrava 917 estruturas destinadas à disposição de rejeitos, conforme aponta os painéis do Sistema de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2025). Dentre essas, 471 encontram-se enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Quando se trata de outras estruturas de disposição, o Brasil possui 730 pilhas de rejeitos (PDRs) e estéril (CREA, 2025).

Observa-se, um crescimento contínuo no número de PDRs, comumente chamadas de *dry stacking* (Rissoli et al., 2024). Essa tendência decorre, em grande parte, das dificuldades impostas para a implantação de novos projetos de barragens convencionais, no que tange as questões que envolvem o licenciamento, à recuperação da área e ao fechamento destas estruturas, além do objetivo de redução dos riscos operacionais e dos passivos de longo prazo que implicam as barragens de rejeitos convencionais (Burden et al., 2023).

Esse cenário intrinsecamente limita à expansão da indústria extrativa, especialmente diante da previsão de que a demanda por minerais críticos triplicará até 2040, podendo contribuir com aproximadamente R\$ 243 bilhões ao PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro (Brasil Mineral, 2025). Em escala global, observa-se a adoção de políticas semelhantes voltadas ao fortalecimento da cadeia mineral. Nos Estados Unidos, por exemplo, foi assinado um decreto presidencial com o intuito de ampliar a produção de minerais essenciais, evidenciando uma tendência mundial de aumento das atividades minerárias (Renshaw et al., 2025).

Segundo Silva (2023), há uma desconexão entre a intensificação da produção mineral, as estruturas de disposição de rejeitos e os mecanismos de controle de riscos, que muitas vezes são ineficazes na prevenção de impactos socioambientais. Isso reforça a necessidade de uma abordagem de riscos mais integrada, que combine segurança, sustentabilidade e governança.

A avaliação de riscos é amplamente aplicada, porém a abordagem utilizada em estruturas de disposição de rejeitos difere daquela adotada em outras áreas (Cruz, 2024). Para realizar essa avaliação, diversas ferramentas são empregadas (Lacasse et al, 2023), e além dos métodos tradicionais de análise preliminar de riscos, existem abordagens precursoras que serviram de base conceitual e metodológica para o desenvolvimento de técnicas mais modernas.

Dentre essas abordagens, destaca-se o método do índice de risco, que considera de forma integrada as duas componentes do risco: a preventiva e a mitigadora (Espósito, 2013; Baima; Campos, 2021).

De acordo com Pimenta (2009), é necessário transformar as abordagens tradicionais, que são focadas na segurança e centradas nas obras, para métodos orientados ao gerenciamento de riscos. Segundo Siqueira *et al.* (2023), as recentes exigências regulatórias, como as emitidas pela ANM e por órgãos estaduais, no que se refere à análise de risco, têm origem em abordagens tradicionais baseadas em índices quantitativos, as quais evoluíram para modelos mais integrados e abrangentes. Isso se deve principalmente, pelo rompimento da barragem de rejeitos na mina Córrego do Feijão, da Vale, ocorrido em Brumadinho em 25 de janeiro de 2019 (Lemos *et al.*, 2025). Esse desastre, de grande impacto humano e ambiental, demandou respostas rápidas e eficazes para fortalecer a segurança das estruturas de disposição de rejeitos em nível global (ICMM, 2021).

Como resposta a esse evento, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM) e os Princípios para o Investimento Responsável (PRI) desenvolveram um Padrão internacional para a gestão mais segura das instalações de armazenamento de rejeitos (ICMM, 2020). Esse Padrão é chamado de GISTM (*Global Industry Standard on Tailings Management*) traduzida para o português como Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos.

O GISTM é estruturado em 6 tópicos, 15 princípios e 77 requerimentos, tendo como objetivo final a eliminação de danos às pessoas e ao meio ambiente, com foco na prevenção de eventos catastróficos (ICMM, 2020). Por ser aplicável a todos os tipos de estruturas de disposição de rejeitos e considerando o crescimento no número de PDRs, torna-se essencial analisar a aplicação do GISTM a essas estruturas específicas (CREA, 2025).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de uma nova ferramenta de análise de riscos baseada no Índice Global de Riscos (CIGB, 1982), alinhada aos requerimentos do GISTM e aplicada às PDRs. A proposta contempla dimensões financeiras, psicossociais, reputacionais, legais, estruturais e ambientais, incorporando variáveis por vezes negligenciadas em abordagens convencionais (ERM, 2021; Schafer *et al.*, 2021).

A proposta visa desenvolver uma abordagem dinâmica e de fácil aplicação, utilizando a metodologia de avaliação sugerida pelos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021), e dessa forma, categorizar zonas de risco por meio da análise dos valores do índice de risco e dos fatores associados. Como estudo de caso, a metodologia foi aplicada em cinco PDRs, possibilitando a

classificação das respectivas zonas de risco. Com base nos resultados obtidos, foi possível indicar os controles adequados para a mitigação dos riscos identificados e para o atendimento aos requerimentos do GISTM.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Classificação de riscos

De acordo com a *International Organization for Standardization – ISO 31000* (ABNT, 2018), o gerenciamento de riscos consiste em uma atividade coordenada para dirigir e controlar uma organização em relação aos riscos que enfrenta. Nesse sentido, identificar os riscos associados às estruturas de disposição de rejeitos é fundamental para garantir a segurança das comunidades e dos trabalhadores. Além disso, torna-se essencial a implementação de controles eficazes, com o objetivo de reduzir a probabilidade de eventos adversos que possam gerar impactos financeiros, reputacionais, legais, estruturais e ambientais.

Após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, ocorrido em 2015, o ICMM realizou uma consulta às suas 23 empresas associadas com o intuito de identificar caminhos mais eficazes para reduzir o risco de eventos catastróficos relacionados a barragens de rejeitos. Como resultado, reconheceu-se a necessidade de fortalecer os mecanismos de governança, de modo a assegurar a aplicação mais consistente e eficaz de suas diretrizes técnicas e administrativas (ICMM, 2016).

A estrutura proposta visou a fortalecer seis pilares essenciais para a gestão e a governança de instalações de rejeitos, e dentre os seis elementos, o princípio 4 destaca a importância da implementação de sistemas robustos de gestão de riscos, fundamentados em evidências científicas confiáveis e alinhados com as percepções das partes interessadas. Além disso, enfatiza-se a aplicação de controles rigorosos para impedir a introdução de riscos considerados incertos, inaceitáveis ou não controláveis (ICMM, 2016). Essa estrutura foi robustecida posteriormente após a ruptura das barragens B1, BIV e BIVA de Brumadinho, através da criação do Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos (ICMM, 2020).

O atendimento aos requerimentos do GISTM atua como um mecanismo de controle voltado à mitigação dos riscos associados. Para a elaboração do plano de ação e conformidade com o Padrão, é necessário que o empreendedor realize uma autoavaliação, complementada por uma avaliação de terceira parte (ICMM, 2021), e, posteriormente, este plano de ação deve ser aprovado pelo membro de maior hierarquia de cada organização, trazendo assim, adequação ao Padrão. Esse processo permite identificar o nível de esforço requerido das empresas para reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos adversos, de acordo com a natureza dos riscos envolvidos.

Neste contexto, o primeiro passo desta pesquisa se deu pela identificação dos tipos de

riscos abordados pelo GISTM. Em seguida, os requerimentos foram organizados de acordo com sua relação com cada tipo de risco, reconhecendo-se que alguns deles podem estar vinculados a mais de uma categoria simultaneamente. Os riscos foram classificados em seis grupos: financeiro (RFI), psicossocial (RPS), reputacional (RRE), legal (RLE), estrutural (RES) e ambiental (RAM). A distribuição dos requerimentos conforme cada categorias é apresentada no Quadro 5. Essa categorização dos riscos e a correspondente distribuição dos requerimentos, proporcionam uma base estruturada para a análise subsequente, permitindo uma avaliação mais precisa dos impactos potenciais decorrentes da não conformidade com o GISTM.

Quadro 5 - Requerimentos distribuídos por cada tipo de risco no GISTM

Riscos	Tipo de Risco	Requerimento do Padrão
I	<b>RFI</b>	3.3, 5.4, 8.1, 8.4, 8.5, 8.7, 9.1, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 14.2, 14.3, 14.5, 15.1
II	<b>RPS</b>	1.1, 1.2, 1.3, 2.3, 3.2, 3.3, 3.4, 5.1, 5.2, 5.8, 7.3, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 9.5, 10.2, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 12.1, 12.2, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 15.1, 15.2
III	<b>RRE</b>	1.1, 1.3, 1.4, 2.1, 5.2, 5.4, 5.7, 5.8, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.2, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.7, 10.1, 10.2, 10.6, 10.7, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 12.1, 12.2, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 15.1, 15.3
IV	<b>RLE</b>	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 2.1, 2.2, 2.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 8.1, 9.2, 9.4, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 11.4, 12.2, 13.1, 15.1
V	<b>RES</b>	2.1, 2.2, 2.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 9.1, 9.3, 9.5, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.7, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4
VI	<b>RAM</b>	1.2, 1.3, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 5.1, 5.2, 5.4, 5.6, 5.7, 5.8, 6.1, 6.3, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 8.1, 8.2, 8.4, 10.1, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.5, 15.1

Fonte: Elaboração própria (2025).

## 2.2. Índice Global de Riscos: Categorização dos fatores

Com o objetivo de definir a abordagem da análise e proporcionar a redução dos riscos associados (RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM), foi aplicada a metodologia do Índice Global de Riscos, representado por  $\alpha$ . Essa metodologia foi proposta pelo Boletim 41 do Comitê Internacional de Grandes Barragens (CIGB, 1982) e permite identificar os riscos mais prevalentes nas estruturas de disposição de rejeitos e orientar a priorização de ações voltadas à mitigação desses riscos.

A metodologia proposta no presente trabalho aprimorou o modelo do CIGB (CIGB, 1982), definindo um valor limite quantitativo para representar a não conformidade total ( $\alpha$  máximo), correspondente a 100% de não atendimento aos requerimentos do GISTM. Critérios objetivos foram estabelecidos para garantir um valor representativo que subsidiasse a

classificação dos diferentes tipos de risco. Em seguida, elaborou-se um quadro modelo para avaliação desses limites, que classifica o índice  $\alpha_g$  conforme avaliações propostas nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021).

No Índice Global de Riscos (CIGB, 1982), a avaliação das condições de risco é realizada de forma simplificada, por meio da atribuição de valores  $\alpha_i$  (Quadro 6), que representam a classificação da criticidade de cada descritor analisado. Esses descritores correspondem às subdivisões dos fatores de risco, também apresentados no Quadro 6. Os fatores são organizados em três categorias: fatores externos ou ambientais (E), confiabilidade da estrutura (F) e fatores humanos e econômicos relacionados à possibilidade de ruptura (R), cujos valores são calculados pelas equações 1, 2 e 3, respectivamente. Nessas equações, o índice “i” varia de 1 a 5 para os cinco aspectos do fator E, de 6 a 9 para os quatro aspectos do fator F, e de 10 a 11 para os dois aspectos do fator R, conforme detalhado no Quadro 6.

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 \alpha_i \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} \alpha_i \quad (3)$$

Com os valores de E, F e R é possível calcular o valor de  $\alpha_g$ , descrito pela equação 4.

$$\alpha_g = E \cdot F \cdot R \quad (4)$$

As Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB) (SRB, 1993) adotam essa proposta de cálculo das condições de risco como base para a definição do sistema de observação e sua aplicação, e definem três classes de barragens: A, B e C. A classe “A” são barragens que apresentam pelo menos um “ $\alpha_i$ ” com classificação igual a 6. A classe “B” dita sobre barragens com “ $\alpha_g$ ” superior a 20 e índice parcial R maior ou igual a 3. Já a classe “C” são as demais barragens que não se enquadram nas classes “A” ou “B”.

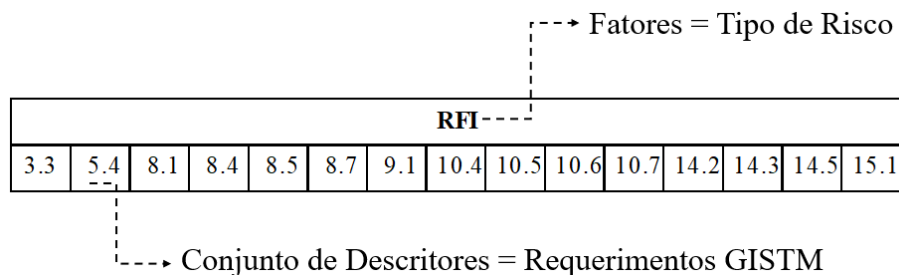
Com base nesses índices, outros estudos foram realizados estabelecendo critérios a partir do valor do índice de risco calculado. Entre eles, destacam-se o índice de Laffite (Laffite,

1996), desenvolvido para classificar grandes barragens na Suíça, com o propósito de definir prioridades de intervenção relacionadas à reabilitação, monitoramento e aos sistemas de aviso e alerta das populações a jusante, considerando os riscos envolvidos, e o *Risk Based Profiling System*, proposto pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR, 2001), que visa à avaliação de riscos por meio de múltiplos critérios para priorização e gestão de barragens nos Estados Unidos da América (EUA), estando conceitualmente alinhado ao índice Global de risco.

É importante ressaltar que as análises realizadas por meio do índice Global de riscos apresentam similaridades com metodologias atualmente empregadas, conforme demonstrado por Baima *et al.* (2014), que correlacionaram esse índice à Resolução CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) nº 143/2012. Segundo os autores, o índice Global de risco possui semelhanças com metodologias vigentes, inclusive aquelas previstas em legislações que contemplam análises de riscos.

Nessa perspectiva, com o objetivo de elaborar o quadro modelo de classificação proposto neste trabalho, os conjuntos de descritores foram associados aos requerimentos do GISTM, conforme cada tipo de risco analisado (Quadro 5), sendo os fatores definidos pelos riscos considerados: RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM. Vale destacar que alguns requerimentos aparecem em mais de um fator, uma vez que apresentam elementos comuns que atuam como mecanismos de controle para a prevenção de eventos indesejados. A distribuição desses requerimentos por fator é exemplificada na Figura 12. Isso se procedeu para os demais fatores, conforme distribuídos pelo Quadro 5.

Figura 12 – Exemplificação da distribuição dos fatores



Fonte: Elaboração própria (2025).

Quadro 6 - Discriminação dos descritores e das regras gerais de classificação para cálculo do índice Global de risco

<b><math>\alpha</math></b>	Classe associada a fatores externos ou ambientais (E)					Classe associada à obra, fiabilidade (F)				Classe associada a fatores humanos e econômicos (R)	
	Sismicidade (período de retorno de 1.000 anos)	Escorregamento de taludes (probabilidade)	Cheias superiores à de projeto (probabilidade)	Gestão do reservatório	Ações agressivas (Clima, água, etc.)	Dimensionamento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Manutenção	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Instalações a jusante
<b>1</b>	Mínima ou nula ( $\alpha \leq 0,05$ g)	Mínima ou nula	Muito baixa (barragens de betão)	Plurianual ou anual sazonal	Mínimas	———	Muito boas	Fiáveis	Muito boa	< 10 <sup>5</sup>	Zona não habitada sem valor económico
<b>2</b>	Baixa ( $0,05 \text{ g} < \alpha \leq 0,1$ g)	Baixa	Muito baixa (barragens de enrocamento)	Semanal	Fracas	———	Boas	———	Boa	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	Áreas isoladas
<b>3</b>	Média ( $0,1 \text{ g} < \alpha \leq 0,2$ g)	Média	Baixa	Diária	Médias	———	Aceitável	Aceitáveis	Satisfatória	10 <sup>6</sup> –10 <sup>7</sup>	Pequenos aglomerados populacionais, agricultura, indústria
<b>4</b>	Forte ( $0,2 \text{ g} < \alpha \leq 0,4$ g)	Forte	Média	Bombeamento	Fortes	———	———	———	———	10 <sup>7</sup> –10 <sup>8</sup>	Agglomerados residenciais e industriais
<b>5</b>	Muito forte ( $\alpha > 0,4$ g)	Grande	Elevada	Bombeamento	Muito fortes	———	Medíocres	———	———	> 10 <sup>9</sup>	Grandes aglomerados populacionais, industriais, instalações nucleares
<b>6</b> Intervenções técnicas indispensáveis	———	Grande	Elevada	Inadequado	———	Inadequado	Medíocres a más	Insuficientes não operacionais	Insatisfatórias	———	———

Fonte: Adaptado de ICOLD (1982).

Os fatores de riscos: RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM apresentam uma quantidade de 15, 37, 43, 39, 53 e 41 requerimentos, respectivamente. Com base nessa distribuição, foram desenvolvidas equações específicas para cada fator (equações 5, 6, 7, 8, 9 e 10), seguindo a lógica das equações 1, 2 e 3. As fórmulas trazem a média aritmética dos “ $\alpha$ ” atribuídas para cada fator de risco.

$$RFI = \frac{1}{15} \sum_{I=1}^{15} \alpha_i \quad (5)$$

$$RPS = \frac{1}{37} \sum_{I=16}^{53} \alpha_i \quad (6)$$

$$RRE = \frac{1}{43} \sum_{I=54}^{96} \alpha_i \quad (7)$$

$$RLE = \frac{1}{39} \sum_{I=97}^{135} \alpha_i \quad (8)$$

$$RES = \frac{1}{53} \sum_{I=136}^{188} \alpha_i \quad (9)$$

$$RAM = \frac{1}{41} \sum_{I=189}^{229} \alpha_i \quad (10)$$

### 2.3. Quadro modelo de pontuação

A análise de riscos apresentada neste estudo foi desenvolvida com base nas estruturas analíticas construídas a partir de literaturas especializadas em gestão de riscos, como HAZOP (Cristea; Constantinescu, 2017), FMEA e FMECA (Gill; Pielecha; Szwajca, 2024), ETA (Riccardi *et. al*, 2025) e FTA (Davies; Dogan, 2025), garantindo coerência metodológica e aderência aos princípios internacionalmente reconhecidos de avaliação de risco. A avaliação dos impactos associados a cada fator de risco foi realizada com base nas tabelas de classificação do Anexo 2 do GISTM (ICMM, 2020), as quais descrevem os potenciais impactos em caso de ruptura e estabelecem critérios mínimos de projeto para a proteção de pessoas e do meio ambiente. Com base nesse referencial, foram definidos, neste estudo, cinco níveis de impacto ( $\alpha_i$ ): Mínimo, Baixo, Médio, Alto e Extremo (Quadro 7).

O índice  $\alpha_i$  representa a gravidade das consequências associadas à não conformidade com um determinado requerimento do GISTM, considerando a sua relação com o tipo de risco

analisado, ou seja, avalia-se qual seria o impacto para um risco específico, caso o requerimento em questão seja de não atendido. Por exemplo, ao analisar o risco financeiro, verifica-se qual o impacto que a não implementação do requerimento 3.3 pode causar nesse domínio, considerando possíveis perdas econômicas, aumento de custos operacionais, multas e outros. Essa lógica é aplicada sistematicamente a todos os requerimentos e tipos de risco, permitindo uma avaliação estruturada e comparável entre diferentes cenários de conformidade.

Quadro 7 – Valores atribuídos a  $\alpha_i$  baseado nas tabelas de classificação do Anexo2 do GISTM

Valores de $\alpha_i$	Tipo de impacto
1	Mínimo impacto
2	Baixo impacto
3	Médio impacto
4	Alto impacto
5	Extremo Impacto

Fonte: Elaboração própria (2025).

O principal produto da metodologia desenvolvida foi a elaboração de um quadro modelo com níveis de impacto previamente definidos para cada tipo de risco. Nesse quadro, os valores de  $\alpha_i$  estão dispostos na vertical e representam os impactos por tipo de risco. Na horizontal, encontram-se os requerimentos do GISTM, organizados de acordo com cada fator de risco analisado: RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM.

Para representar a pior situação possível da análise, buscou-se identificar o valor máximo de  $\alpha_g$ , considerando um cenário hipotético em que todos os requerimentos apresentassem não conformidade, e para isso, cada requerimento foi analisado individualmente dentro de cada fator de risco, sendo atribuído um valor específico de  $\alpha_i$ . As células correspondentes a esses valores foram destacadas em azul, indicando visualmente a pontuação do impacto para cada item. Dessa forma, todos os requerimentos foram classificados conforme os níveis de impacto.

Com base nessa estrutura, construiu-se um quadro geral modelo de pontuação, apresentado na Figura 10, que consolida os níveis de impacto associados aos fatores de risco. Este quadro permite que, durante a autoavaliação ou a avaliação por terceira parte, o avaliador registre diretamente a pontuação na célula colorida correspondente ao requerimento analisado. Informações complementares sobre a classificação dos impactos para cada requerimento estão disponíveis no Apêndice.

Figura 13 – Quadro modelo de pontuação para análise de risco.

RFI	
α	3.3 5.4 8.1 8.4 8.5 8.7 9.1 10.4 10.5 10.6 10.7 14.2 14.3 14.5 15.1
1	
2	
3	
4	
5	

RPS	
α	2.3 3.2 3.3 3.4 5.1 5.2 5.8 7.3 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 9.5 10.2 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 12.1 12.2 13.1 13.2 13.3 13.4 14.1 14.2 14.3 14.4 14.5 15.1 15.2
1	
2	
3	
4	
5	

RRE	
α	2.1 5.2 5.4 5.7 5.8 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 7.2 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.7 10.1 10.2 10.6 10.7 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 12.1 12.2 13.1 13.2 13.3 13.4 14.1
1	
2	
3	
4	
5	

RLE	
α	1.4 2.1 2.2 2.3 3.4 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 5.2 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 7.1 7.2 7.3 8.1 9.2 9.4 10.4 10.5 10.6 10.7 11.4 12.2 13.1 15.1
1	
2	
3	
4	
5	

RES	
α	2.1 2.2 2.3 3.4 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 5.1 5.2 5.4 5.5 5.6 5.7 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 8.7 9.1 9.3 9.5 10.1 10.2 10.3 10.4 10.5 10.7 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 13.1 13.2 13.3 13.4
1	
2	
3	
4	
5	

RAM	
α	1.2 1.3 2.2 2.3 3.1 3.2 3.3 3.4 4.1 4.2 4.4 4.5 4.6 5.1 5.2 5.4 5.6 5.7 5.8 6.1 6.3 6.4 6.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 8.1 8.2 8.4 10.1 13.1 13.2 13.3 13.4 14.1 14.2 14.3 14.5 15.1
1	
2	
3	
4	
5	

Fonte: Elaboração própria (2025).

## 2.4. Definição de limites para análises

Com base nos parâmetros analisados, é possível estabelecer limites de avaliação voltados à análise de riscos. Essa análise pode ser conduzida por meio de abordagens qualitativas ou quantitativas, ambas sujeitas a limitações específicas. As abordagens qualitativas recorrem a descrições ou a escalas ordenadas numericamente para expressar a magnitude das consequências potenciais e suas respectivas probabilidades, sendo mais suscetíveis à subjetividade. Por outro lado, as análises quantitativas fundamentam-se em valores numéricos atribuídos tanto às consequências quanto às probabilidades, partindo de que, esses valores representam de forma válida a magnitude real dos impactos e a probabilidade dos cenários analisados (Melo, 2014; Pinto, 2013).

Já a análise de risco semiquantitativa integra aspectos das abordagens qualitativa e quantitativa, proporcionando um método mais estruturado e sistemático. De acordo com a ISO 31000 (ABNT, 2018), a análise semiquantitativa pode ser utilizada para derivar um índice de risco indicando um nível de risco (por exemplo: alto, médio, baixo) ou uma descrição com dados práticos sobre os prováveis efeitos.

Dessa forma, através do quadro de pontuação por tipo de impacto (Figura 13), a análise utilizada neste trabalho é do tipo semiquantitativa, e para o quadro resultado deste estudo denomina-se MASqt (Matriz de Avaliação Semiquantitativa de Risco), que é comum para este tipo de análise (Carvalho, 2011).

Neste sentido, estabeleceu-se um limite máximo para o parâmetro  $\alpha_g$ , que possibilita a avaliação das fragilidades tanto de forma Global quanto para cada tipo de risco ou fator individual. Adotou-se uma abordagem conservadora, considerando o cenário de não atendimento integral a todos os requerimentos avaliados do GISTM (100% de não atendimento), refletindo-se assim em todos os fatores (RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM). Dessa forma, o limite máximo de “ $\alpha_g$ ” representa uma condição de fragilidade crítica, possibilitando a identificação dos pontos mais vulneráveis do sistema e a priorização das ações de mitigação conforme a especificidade de cada risco.

Conforme ilustrado no quadro modelo (Figura 13), as células coloridas indicam os valores de  $\alpha_i$  atribuídos a cada requerimento. Inicialmente, cada fator de risco foi analisado individualmente, realizando-se o somatório dos descritores associados a esse fator (ou seja, a soma dos valores das células coloridas). Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 8.

Conforme definido nas equações 5, 6, 7, 8, 9 e 10, é necessário determinar os valores dos fatores de risco para o cálculo de  $\alpha_g$ . Nesse sentido, o Quadro 9 apresenta os valores obtidos

para cada fator.

Quadro 8 – Somatório da pontuação por tipo de fator de risco

<b>RFI</b>	<b>RPS</b>	<b>RRE</b>	<b>RLE</b>	<b>RES</b>	<b>RAM</b>
55	126	153	142	205	157

Fonte: Elaboração própria (2025)

Quadro 9 – Valores calculados para os fatores de risco

<b>RFI</b>	<b>RPS</b>	<b>RRE</b>	<b>RLE</b>	<b>RES</b>	<b>RAM</b>
3,7	3,4	3,6	3,6	3,9	3,8

Fonte: Elaboração própria (2025)

Com os valores dos fatores de risco, é possível calcular o índice Global de risco ( $\alpha_g$ ). Diferentemente da fórmula original proposta para  $\alpha_g$  (CIGB, 1982), dado pela equação 4, que se baseia no produto dos fatores de risco, a metodologia adotada neste estudo utiliza o somatório dos riscos (equações 11 e 12). Essa abordagem foi escolhida para que não ocorresse a anulação do índice em casos de total conformidade dos fatores analisados, que teria algum dos fatores zerados.

$$\alpha_g = RFI + RPS + RRE + RLE + RES + RAM \quad (11)$$

$$\alpha_g = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \alpha_i + \frac{1}{37} \sum_{i=16}^{53} \alpha_i + \frac{1}{43} \sum_{i=54}^{96} \alpha_i + \frac{1}{39} \sum_{i=97}^{135} \alpha_i + \frac{1}{53} \sum_{i=136}^{188} \alpha_i + \frac{1}{41} \sum_{i=189}^{229} \alpha_i \quad (12)$$

Assim, a partir da aplicação da equação 11, foi calculado o valor do índice Global de riscos referente à metodologia proposta, resultando em um somatório de  $\alpha_g = 22$ . Nesse contexto, considera-se que, em uma autoavaliação ou em um processo de validação por terceiros, caso a PDR avaliada apresente ausência total de atendimento aos requerimentos analisados, os valores limites dos fatores de risco serão aqueles descritos no Quadro 9, e de forma Global, sendo atribuída à PDR a pontuação de  $\alpha_g = 22$ .

## 2.5. Apreciação e categorização de zonas de risco

De acordo com Zuffo (2010), a apreciação de risco envolve a definição de políticas relativas aos níveis aceitáveis de risco, alinhadas à legislação vigente e aos manuais de segurança aplicáveis à avaliação de riscos. Nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021), ressalta-se que tal documento fornece respaldo para as avaliações conduzidas segundo o GISTM. Com base nesse respaldo, a metodologia aqui proposta atribui níveis de atendimento que permitem a apreciação dos riscos e a comparação dos valores de  $\alpha g$  e dos fatores de risco obtidos, no contexto do gerenciamento da PDR.

Para a interpretação desses parâmetros, este trabalho adota três zonas de comparação baseadas nos valores de  $\alpha$ : zona crítica, zona de atenção e zona confiável. Metodologias análogas, como matrizes de risco e o princípio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), também utilizam classificações similares (Sousa, Tsionis, 2025; Zhu, Pascoe, 2023). O ALARP estabelece uma região intolerável, onde o risco é inaceitável, exceto em situações de necessidade vital. Uma região ALARP é onde o risco pode ser aceito se o custo para o reduzir for muito maior que o benefício. Já a região aceitável é onde o risco é tão baixo que praticamente não precisa ser considerado (HSE, 2001; ABNT, 2018; Melo, 2014; Honorato *et al.*, 2025).

Os limites adotados foram definidos com base nos critérios normativos estabelecidos pelos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021). A tabela de categorização das zonas de risco realiza uma análise detalhada das características intrínsecas e contextuais dos fatores avaliados, incorporando parâmetros técnicos de gestão específicos para cada caso. Essa ferramenta possibilita a identificação precisa das áreas que demandam maior atenção e priorização por parte do empreendedor, orientando a alocação eficaz dos esforços para o cumprimento das medidas previstas no plano de ação.

A categorização de risco para o Índice Global de Riscos é apresentada no Quadro 10, permitindo a comparação da PDR analisada com os dados calibrados por esta metodologia. Por sua vez, a categorização dos riscos para cada tipo de fato (RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM) é apresentada pelo Quadro 11. Para esses fatores, a avaliação deve ser feita de forma isolada, com base nos resultados dos fatores de risco apresentados pelo Quadro 9.

Quadro 10 - Apreciação e categorização de zonas de risco para  $\alpha g$ .

Zona	Características Gerais	Parâmetros de Gestão	Esforços para Atendimento e Monitoramento	Foco dos Planos de Ação
<b>Zona Crítica (<math>\alpha g \geq 90\%</math> do valor máximo (<math>\geq 20</math> pontos))</b>	Risco elevado podendo indicar instabilidades estruturais que podem levar à impactos ambientais e legais severos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Não conformidade com <math>&gt;90\%</math> dos requerimentos críticos do GISTM;</li> <li>▪ Indicadores de instabilidades na estrutura, por não cumprir requisitos mínimos de projeto;</li> <li>▪ Falhas recorrentes em auditorias e inspeções;</li> <li>▪ Alta probabilidade de impacto financeiro, social e reputacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revisão urgente do projeto e operação;</li> <li>▪ Posíveis intervenções na estrutura para adequações;</li> <li>▪ Aumento da frequência e detalhamento dos monitoramentos (instrumentação, inspeção, etc.);</li> <li>▪ Formação de equipe multidisciplinar para gestão de crise.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Correção e mitigação rápida dos pontos críticos;</li> <li>▪ Cumprimento rigoroso do plano emergencial;</li> <li>▪ Reavaliação de licenciamento e condicionantes;</li> <li>▪ Ações para redução imediata dos riscos identificados.</li> </ul>
<b>Zona de Atenção (<math>\alpha g</math> entre 40% e 90% do máximo (8,8 a <math>&lt;20</math> pontos))</b>	Risco moderado com deficiências significativas em aspectos de gestão e operação.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conformidade parcial (40-89%) com os requisitos do GISTM;</li> <li>▪ Monitoramento com inconsistências ou falhas pontuais;</li> <li>▪ Presença de desvios em indicadores-chave de desempenho (KPIs);</li> <li>▪ Riscos financeiros e reputacionais moderados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fortalecimento das práticas de gestão e operação com implementação de planos de melhoria contínua;</li> <li>▪ Revisão dos procedimentos e treinamentos;</li> <li>▪ Ampliação do escopo e frequência do monitoramento;</li> <li>▪ Engajamento com stakeholders para mitigar riscos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prevenção de escalonamento do risco;</li> <li>▪ Implementação gradual de melhorias;</li> <li>▪ Capacitação e conscientização das equipes;</li> <li>▪ Planejamento para mitigação e adaptação.</li> </ul>
<b>Zona Confiável (<math>\alpha g \leq 40\%</math> do máximo (<math>&lt; 8,8</math> pontos))</b>	Estrutura em condições satisfatórias, risco baixo e boa gestão.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alta conformidade (<math>&gt;60\%</math>) com os requisitos do GISTM;</li> <li>▪ Monitoramento regular e consistente;</li> <li>▪ Indicadores dentro dos parâmetros seguros;</li> <li>▪ Histórico positivo de auditorias e inspeções.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manutenção das boas práticas de gestão e operação;</li> <li>▪ Monitoramento periódico conforme plano aprovado;</li> <li>▪ Revisão e atualização dos planos conforme necessário;</li> <li>▪ Capacitação contínua e auditorias internas regulares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manutenção da segurança operacional;</li> <li>▪ Otimização das operações para ganhos de eficiência;</li> <li>▪ Melhoria contínua e adaptação a novos requisitos.</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria (2025).

Quadro 11 - Apreciação e categorização de zonas de risco para fatores.

Zona	Faixa de Fator de Risco (%)	Descrição Geral	Interpretação do Nível de Aptidão ao Risco	Diretrizes e Ações Recomendadas
<b>Zona Crítica</b>	Fator $\geq$ 90% do valor máximo	O índice de risco está muito elevado, indicando alta exposição e baixa capacidade de controle.	Baixa aptidão ao risco. Riscos severos e urgentes em múltiplas dimensões.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revisão imediata e urgente de todos os requerimentos aplicáveis, conforme GISTM;</li> <li>▪ Plano de ação emergencial - Intervenções corretivas e preventivas intensas;</li> <li>▪ Engajamento multidisciplinar para mitigação;</li> <li>▪ Comunicação e reporte às autoridades e <i>stakeholders</i>.</li> </ul>
<b>Zona de Atenção</b>	Fator entre 40% e 89% do valor máximo	Nível moderado de risco, com deficiências identificadas que requerem melhorias significativas.	Média aptidão ao risco. Controles e gestão ainda insuficientes ou inconsistentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implementação obrigatória de melhorias e reforço dos controles;</li> <li>▪ Monitoramento ampliado e mais rigoroso;</li> <li>▪ Capacitação e revisão de processos;</li> <li>▪ Planos de ação com prazo médio para cumprimento;</li> <li>▪ Avaliação periódica dos progressos.</li> </ul>
<b>Zona Confiável</b>	Fator $\leq$ 40% do valor máximo	Baixo nível de risco, com boa conformidade e gestão dos riscos.	Alta aptidão ao risco. Estrutura e gestão consideradas adequadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manutenção das boas práticas de gestão e controles;</li> <li>▪ Monitoramento contínuo, porém com periodicidade Padrão;</li> <li>▪ Revisão periódica para garantir sustentabilidade;</li> <li>▪ Aperfeiçoamento contínuo, buscando excelência operacional.</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria (2025).

## 2.6. Procedimentos para avaliação

### 2.6.1. Regras de atendimento aos requerimentos

De acordo com o GISTM (ICMM, 2020), é necessário realizar uma avaliação de conformidade dos requerimentos, iniciando-se com a autoavaliação conduzida pelo empreendedor, seguida por uma avaliação de terceira parte realizada por empresa externa. Essa segunda etapa tem como objetivo validar a autoavaliação e viabilizar a elaboração de um plano de ação, que deve ser formalmente aprovado pelo profissional de maior hierarquia na companhia. Essa avaliação permite que o avaliador registre se para determinado requerimento, o item analisado seja classificado em: atende, atende parcialmente, não atende, e não aplicável.

Nessa perspectiva, a avaliação realizada pelo avaliador é utilizada como dado de entrada para o quadro de pontuação apresentado na Figura 13. No entanto, para esta metodologia, torna-se uma regra converter essas classificações (atende, atende parcialmente, não atende, não aplicável) em pontuações específicas:

- **Atende:** indica conformidade total com o requerimento analisado. Nessa condição, entende-se que os controles estão adequadamente implementados, não havendo exposição significativa ao risco relacionado ao item. Portanto, o requerimento não gera pontuação no quadro de classificação de impacto;
- **Atende parcialmente:** apesar de indicar algum grau de conformidade, essa condição evidencia lacunas ou fragilidades na implementação do requerimento, o que implica em risco residual relevante. Assim, para efeitos da metodologia, essa condição é considerada como "não atende" e, portanto, deve ser pontuada no quadro de classificação de impacto;
- **Não atende:** denota ausência ou inadequação total na implementação do requerimento. Essa situação representa vulnerabilidade direta ao risco avaliado e, por isso, deve ser pontuada no quadro de classificação de impacto;
- **Não se aplica:** utilizada quando o requerimento analisado não é pertinente ao contexto específico do item avaliado. Nesses casos, entende-se que o risco relacionado não é aplicável, e a resposta é tratada metodologicamente como "atende", ou seja, não gera pontuação no quadro de classificação de impacto.

Em resumo, apenas os requerimentos classificados como "não atende" ou "atende

parcialmente" na avaliação dada pelo empreendedor ou por terceira parte, devem ser pontuados, já que o quadro de pontuações só registra não atendimento.

### 2.6.2. Pontuação do quadro modelo

Após a conversão de atendimento, deve-se registrar, nas células do quadro de pontuação (Figura 13), os valores numéricos correspondentes ao nível de impacto indicado pela codificação em azul. Em um exemplo fictício (Figura 3), ao realizar uma autoavaliação, identificou-se o não atendimento aos Requerimentos 3.3, 8.4 e 9.1. Assim, devem ser atribuídas as pontuações 4, 4 e 5, respectivamente, nas células correspondentes a esses itens, de acordo com o impacto indicado. Caso o requerimento esteja em conformidade, nenhuma pontuação deve ser registrada. Esse procedimento deve ser repetido para todos os fatores de risco analisados (RFI, RPS, RRE, RLE, RES e RAM).

Figura 14 – Preenchimento dos valores de  $\alpha_i$

	RFI														
$\alpha_i$	3.3	5.4	8.1	8.4	8.5	8.7	9.1	10.4	10.5	10.6	10.7	14.2	14.3	14.5	15.1
1															
2															
3															
4	4			4											
5							5								

Preencher o valor correspondente  $\alpha_i$  em caso de não atendimento

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após o registro, deve-se realizar o somatório dos descritores de cada fator e calcular os respectivos valores dos fatores de risco, conforme as Equações 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Em seguida, procede-se ao cálculo de  $\alpha_g$ , conforme a Equação 11. Com os valores de  $\alpha_g$  e dos fatores já calculados, realiza-se a classificação de acordo com os critérios apresentados nos Quadro 10 e Quadro 11.

### 2.7. Controles de mitigação

A redução dos riscos está diretamente relacionada ao atendimento dos requerimentos do

GISTM, uma vez que o cumprimento efetivo das diretrizes contribui para a diminuição dos valores de  $\alpha g$ . Isso ocorre porque a conformidade com os requerimentos reduz as pontuações atribuídas no quadro de pontuação por tipo de impacto (Figura 13), indicando maior aptidão ao risco.

Conforme estabelecido nos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021), recomenda-se a realização periódica de autoavaliações, especialmente diante de mudanças operacionais ou estruturais, visando a atualização contínua do perfil de risco da estrutura analisada. Neste sentido, cada avaliação terá um resultado de  $\alpha g$  distinto, que pode levar a uma categorização de zona de risco diferente.

Nesta metodologia, os controles utilizados para elevar a aptidão ao risco estão diretamente relacionados ao cumprimento dos requerimentos do GISTM, os quais representam medidas preventivas e mitigadoras essenciais para garantir a conformidade com os princípios de segurança, governança e responsabilidade ambiental na gestão de estruturas de disposição de rejeitos.

## 2.8. Estudo de caso

Como estudo de caso, a metodologia proposta foi aplicada em cinco PDRs com diferentes características de projeto, todas atualmente em operação. O banco de dados utilizado teve como base a metodologia RCMS (*Risk Control Management System*), conforme apresentada por Menezes *et al.* (2024), a qual foi adaptada conforme as regras de atendimento aos requerimentos, formato de avaliação adotado neste trabalho. Para fins de análise, as PDRs foram identificadas de forma sequencial como P1, P2, P3, P4 e P5, correspondendo, respectivamente, às Pilhas 1 a 5.

A avaliação contemplou cinco pilhas, correspondendo à totalidade das estruturas que foi possível incluir no estudo. A limitação no número de participantes decorre das dificuldades encontradas em engajar as empresas responsáveis, refletindo os desafios práticos de acesso a dados e à participação voluntária nesse tipo de investigação. Apesar do número restrito, as pilhas selecionadas possuem representatividade operacional, abrangendo rejeitos de diferentes naturezas, entre eles materiais piritosos, dolomíticos e de minério de ferro e também parâmetros geométricos distintos.

Por motivos de confidencialidade, não foram identificados nominalmente os empreendimentos e as pilhas analisadas. As estruturas avaliadas correspondem a PDRS associadas à atividade minerária. A Pilha P1, localizada em Minas Gerais, é resultante da

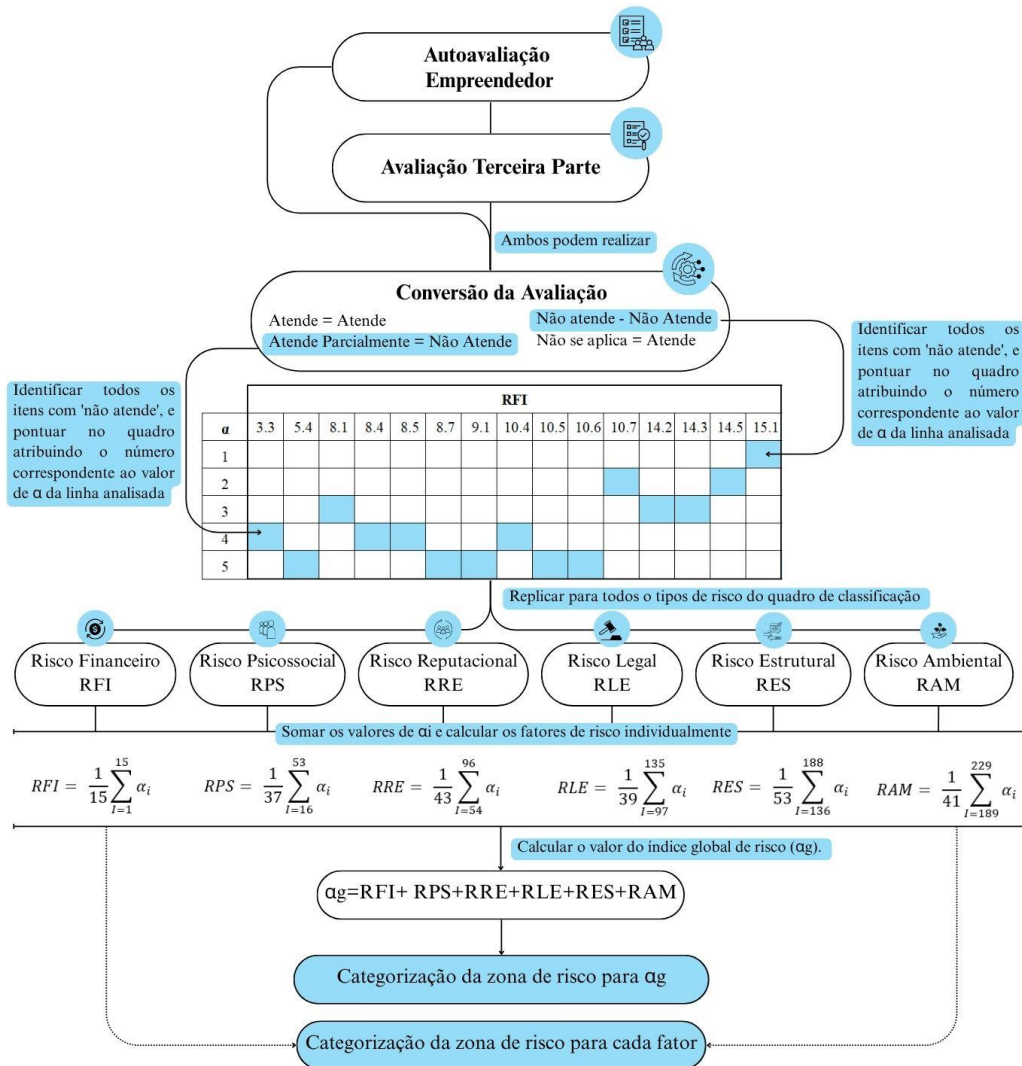
exploração de zinco. As Pilhas P2 e P3, também de exploração de zinco, situam-se no Peru. A Pilha P4, situada na região central de Minas Gerais, está vinculada à exploração de minério de ferro. Já a Pilha P5, localizada no estado de Mato Grosso, também é proveniente da exploração de zinco.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Fluxograma para análise de risco do GISTM

Com o objetivo de estabelecer um mecanismo interativo de avaliação, a Figura 15 ilustra os procedimentos adotados na análise de risco proposta. Dessa forma, torna-se possível visualizar de maneira clara e sistemática o fluxo analítico até a etapa de categorização final do risco.

Figura 15 – Fluxo interativo para análise de risco do GISTM



Fonte: Elaboração própria (2025).

### 3.2. Cálculo de $\alpha_i$ para as PDRs

Para a análise das PDRs, a autoavaliação foi inicialmente convertida nos parâmetros exigidos para a aplicação. Em seguida, foram registrados todos os itens classificados como 'não atende' no quadro modelo (Figura 13), atribuindo valores conforme a coloração do item analisado, isso para cada fator de risco. Esse procedimento foi aplicado às pilhas P1, P2, P3, P4 e P5, resultando inicialmente no somatório  $\alpha_i$  de cada fator de risco. Esses valores são apresentados no .

Quadro 12.

Quadro 12 - Somatório de requerimentos ( $\sum \alpha_i$ ) para as PDRs

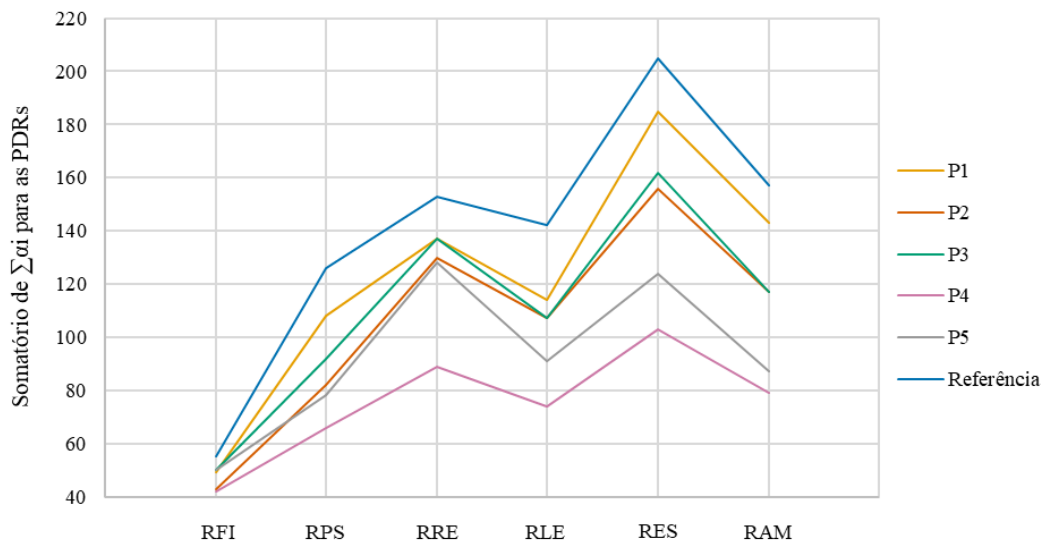
<b>Pilha</b>	<b>RFI</b>	<b>RPS</b>	<b>RRE</b>	<b>RLE</b>	<b>RES</b>	<b>RAM</b>
P1	49	108	137	114	185	143
P2	43	82	130	107	156	117
P3	50	92	137	107	162	117
P4	42	66	89	74	103	79
P5	50	78	128	91	124	87
<b>Referência</b>	<b>55</b>	<b>126</b>	<b>153</b>	<b>142</b>	<b>205</b>	<b>157</b>

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os dados foram representados graficamente para facilitar a compreensão da distribuição, com base no quadro de pontuação por tipo de impacto, conforme ilustrado na Figura 16.

A análise dos valores do somatório de  $\alpha_i$  nos requerimentos dos tipos de riscos, demonstram variações relevantes entre as pilhas avaliadas, quando comparadas com os valores de referência. A Pilha 1 apresenta desempenho relativamente equilibrado, com riscos estrutural e ambiental próximos dos limites de referência, o que sugere necessidade de atenção, especialmente pelo caráter crítico desses domínios. Já as Pilhas 2 e 3 indicam controle mais consistente dos riscos, com valores abaixo da referência em todas as categorias, especialmente nos aspectos psicossociais, legais e ambientais, refletindo um cenário mais favorável quanto à conformidade com os requerimentos avaliados.

Figura 16 - Distribuição do somatório de  $\alpha_i$  para cada fator de risco



Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme destacado por Wilson (2021), países que adotam abordagens rigorosas, com expertise multidisciplinar e controle independente, tendem a apresentar práticas de gestão de rejeitos mais consistentes e seguras. No Brasil, apesar da existência de uma legislação robusta (Cruz, 2024), ainda se observa variabilidade na conformidade das estruturas, possivelmente decorrente de diferenças regionais, institucionais e culturais que impactam a uniformização das práticas de segurança e gestão de rejeitos.

Por outro lado, as Pilhas 4 e 5 apresentam os menores níveis de  $\alpha_i$  em quase todos os tipos de risco. Em particular, a Pilha 4 possui valores extremamente baixos para os riscos estrutural e ambiental, com uma redução de até 50% em relação à referência, o que pode indicar uma excelente performance. A Pilha 5, embora com desempenho intermediário, também apresenta reduções críticas nos mesmos domínios.

### 3.3. Cálculo de fatores para as PDRs

A partir dos valores de  $\alpha_i$  obtidos, foram calculados os fatores correspondentes a cada tipo de risco, para analisar individualmente e posteriormente calcular o índice global de risco. Os valores calculados são apresentados no Quadro 13. Com os valores obtidos dos fatores de risco, plotou-se um gráfico para melhor exemplificação, que é apresentado pela Figura 17.

Quadro 13 – Fatores calculados para as PDRs

<b>Pilha</b>	<b>RFI</b>	<b>RPS</b>	<b>RRE</b>	<b>RLE</b>	<b>RES</b>	<b>RAM</b>
<b>P1</b>	3,3	2,9	3,2	2,9	3,5	3,5
<b>P2</b>	2,9	2,2	3	2,7	2,9	2,9
<b>P3</b>	3,3	2,5	3,2	2,7	3,1	2,9
<b>P4</b>	2,8	1,8	2,1	1,9	1,9	1,9
<b>P5</b>	3,3	2,1	3	2,3	2,3	2,1
<b>Referência</b>	<b>3,7</b>	<b>3,4</b>	<b>3,6</b>	<b>3,6</b>	<b>3,9</b>	<b>3,8</b>

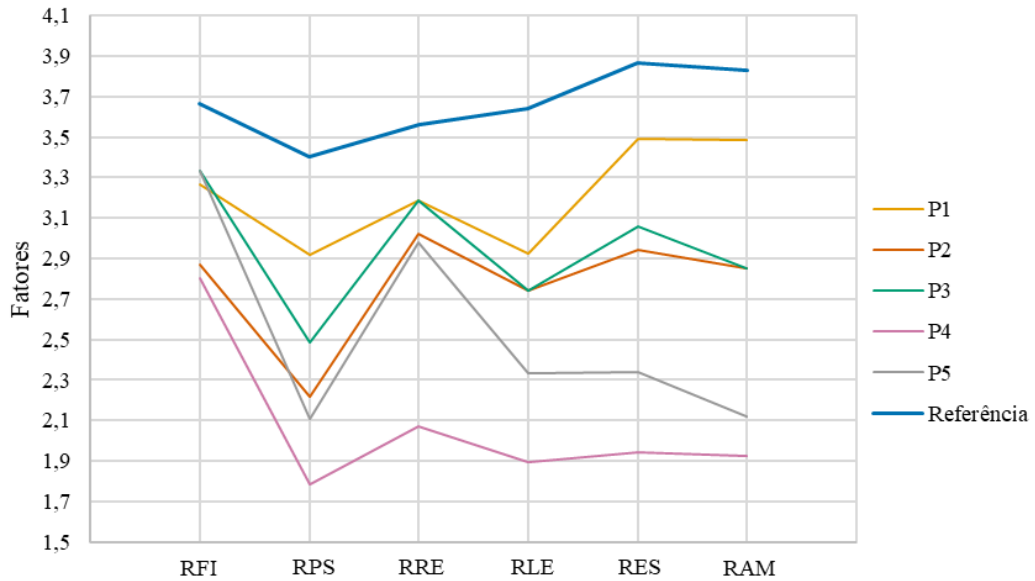
Fonte: Elaboração própria (2025).

Os valores normalizados dos diferentes tipos de risco para as pilhas indicam variações importantes em relação aos limites de referência, que representam a pior situação possível para cada fator. Observa-se que a Pilha 4 destaca-se por apresentar os menores valores em quase todas as categorias de risco, com destaque para risco psicossocial (RPS = 1,8), estrutural (RES = 1,9) e ambiental (RAM = 1,9), indicando um desempenho muito superior na mitigação desses riscos quando comparado à referência (3,4; 3,9 e 3,8, respectivamente).

Em contrapartida, a Pilha 1 mantém valores mais elevados e próximos da referência, especialmente nos riscos estrutural (3,5) e ambiental (3,5), sugerindo que esses domínios ainda requerem atenção especial para evitar o agravamento da situação.

As Pilhas 2 e 3 apresentam resultados intermediários, com valores consistentemente inferiores à referência, indicando um controle razoável dos riscos, especialmente nos aspectos psicossociais e legais, onde P2 e P3 possuem valores de RPS (2,2 e 2,5) e RLE (2,7 para ambas) significativamente menores que a referência. No entanto, elas ainda ficam abaixo da Pilha 4, principalmente no quesito estrutural, onde P2 e P3 apresentam valores de 2,9 e 3,1, respectivamente, indicando uma margem de melhoria para alcançar níveis mais seguros.

Figura 17 – Distribuição dos resultados dos fatores de risco



Fonte: Elaboração própria (2025).

### 3.4. Cálculo do índice de risco ( $\alpha g$ ) para as PDRs

Concluídas as etapas estabelecidas pela metodologia, foram calculados os valores do índice de risco para as pilhas P1, P2, P3, P4 e P5, conforme apresentado no Quadro 14.

Quadro 14 – Valores encontrados de  $\alpha g$ .

PDRs	P1	P2	P3	P4	P5
$\alpha g$	19	17	18	12	15
Desempenho (%)	86,4	77,3	81,8	54,5	68,2

Fonte: Elaboração própria (2025)

Considerando que o valor de referência ( $\alpha g = 22$ ) corresponde ao pior cenário admissível, observa-se que todas as pilhas estão abaixo desse limite, o que indica, em geral, um desempenho satisfatório na gestão dos riscos. A Pilha 4 destaca-se positivamente com o menor valor de  $\alpha g$  (12), com desempenho de 54,5% comparado com o valor de referência, refletindo seus excelentes resultados nos domínios estruturais, ambientais, legais e psicossociais, conforme já evidenciado nos fatores normalizados.

A Pilha 5, com  $\alpha g$  igual a 15 (68,2%), também apresenta um desempenho expressivo, embora levemente inferior ao da Pilha 4. Essa pilha reúne bons indicadores em diversas

categorias, consolidando-se como um dos melhores desempenhos do conjunto avaliado. As Pilhas P2 ( $\alpha_g = 17$ ) e P3 ( $\alpha_g = 18$ ) situam-se em uma faixa intermediária, com valores que, embora inferiores ao limite de referência, ainda apontam para a presença de riscos moderados que requerem atenção pontual, especialmente nos domínios estruturais e financeiros. A Pilha 1, com  $\alpha_g = 19$ , é a mais próxima do valor de referência, representando 86,4% do valor de referência, reforçando a percepção de maior vulnerabilidade geral, principalmente nos riscos estrutural e ambiental.

A Resolução ANM nº 95 (ANM, 2022) estabelece uma classificação para as estruturas, denominada CRI (Categoria de Risco). Estruturas com CRI acima de 80 são consideradas de alto risco; aquelas com CRI entre 40 e 80 são classificadas como risco médio; e as com CRI igual ou inferior a 40 são consideradas de baixo risco. De acordo com os dados divulgados nos painéis de segurança da ANM (2025), o Brasil conta com 915 estruturas cadastradas entre barragens e pilhas, sendo que 57,4% possuem CRI baixo, 33,6% risco médio e 9% risco alto.

Se comparadas às pilhas analisadas pela metodologia adotada, e considerando os mesmos limites utilizados pelo CRI da ANM (ANM, 2022), as pilhas P2, P4 e P5 seriam classificadas como CRI médio (entre 40 e 80%), enquanto as pilhas P1 e P3 se enquadrariam na categoria CRI alto (acima de 90%). Apesar de se tratar de abordagens distintas, é fundamental ressaltar a necessidade de intensificar os esforços para a redução desses percentuais de risco.

### 3.5. Categorização das zonas de risco ( $\alpha_g$ ) para as PDRs

Com base na análise dos valores de  $\alpha_g$  atribuídos às PDRs, observa-se que todas se enquadram na zona de atenção, conforme os critérios estabelecidos na matriz de classificação de risco apresentado pelo Quadro 10. As zonas de risco encontradas são detalhadas no Quadro 15.

Quadro 15 – Zonas de risco por PDRs

PDRs	P1	P2	P3	P4	P5
$\alpha_g$	19	17	18	12	15
Desempenho (%)	86,4	77,3	81,8	54,5	68,2
Zona de Risco	Atenção	Atenção	Atenção	Atenção	Atenção

Fonte: Elaboração própria (2025).

A zona de atenção abrange estruturas com valores de  $\alpha_g$  entre 8,8 e 20 pontos, o que

indica pelo Quadro 10 a presença de riscos moderados associados a deficiências significativas nos aspectos de gestão e operação. Neste contexto, as PDRs analisadas apresentaram valores de  $\alpha g$  variando entre 12 e 19 pontos, o que demonstra a necessidade de intervenções corretivas e preventivas para evitar a evolução de um cenário crítico.

As estruturas classificadas nesta zona requerem o fortalecimento das práticas de gestão, a implementação de planos de melhoria contínua, e a ampliação do escopo de monitoramento, além do engajamento com partes interessadas para mitigar os riscos identificado. De acordo com Oboni (2020), a adoção de práticas eficazes de gerenciamento de riscos pode contribuir para a redução significativa, e até a eliminação, de falhas em estruturas de disposição, por meio da tomada de decisões fundamentadas em uma avaliação técnica dos riscos envolvidos.

Neste contexto, de acordo com Quadro 10, é recomendado que sejam revistos os procedimentos operacionais, promovidas capacitações para as equipes envolvidas e elaborado um planejamento estratégico voltado à mitigação e adaptação, visando manter as estruturas dentro de padrões aceitáveis de segurança, conforme recomenda o Guia de Boas Práticas para Gestão de Rejeitos (ICMM, 2021).

Podem ainda ser integrados outras diretrizes de gestão de risco, conforme recomenda Reis e Oliveira (2022). Os autores destacam que a integração do GISTM aos sistemas baseados nas normas ISO, oferece uma estrutura robusta para enfrentar desafios operacionais e de governança. Essa abordagem integrada favorece a padronização dos processos críticos, fortalece a cultura de segurança organizacional e facilita a adaptação às mudanças regulatórias e ambientais. Assim, vai além da simples conformidade, promovendo uma gestão proativa que contribui para a resiliência das estruturas e a minimização efetiva dos riscos ao longo de todo seu ciclo de vida.

### **3.6. Categorização das zonas de risco para os fatores de risco**

Para esta análise, as PDRs foram avaliadas e classificadas de acordo com cada fator de risco. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 17. Em relação à termos percentuais, P1 apresenta os maiores índices relativos, com destaque para os fatores RES (89,7%) e RAM (92,1%), sendo este último classificado na zona crítica, o que demanda possíveis intervenções corretivas.

Quadro 16 - Categorização das zonas de risco das PDRs para os fatores de risco

Pilha	RFI	Zona	RPS	Zona	RRE	Zona	RLE	Zona	RES	Zona	RAM	Zona
P1	89,20%	Atenção	85,30%	Atenção	88,90%	Atenção	80,60%	Atenção	89,70%	Atenção	92,10%	Crítica
P2	78,40%	Atenção	64,70%	Atenção	83,30%	Atenção	75,00%	Atenção	74,40%	Atenção	76,30%	Atenção
P3	89,20%	Atenção	73,50%	Atenção	88,90%	Atenção	75,00%	Atenção	79,50%	Atenção	76,30%	Atenção
P4	75,70%	Atenção	52,90%	Atenção	58,30%	Atenção	52,80%	Atenção	48,70%	Atenção	50,00%	Atenção
P5	89,20%	Atenção	61,80%	Atenção	83,30%	Atenção	63,90%	Atenção	59,00%	Atenção	55,30%	Atenção

Fonte: Elaboração própria (2025).

As pilhas P2, P3, P4 e P5 também apresentam todos os seus indicadores dentro da zona de atenção, sem que nenhum fator tenha se destacado como crítico ou confiável. A PDR P4 apresenta os menores índices gerais, com seus fatores variando entre 46,2% e 50%, ainda assim classificados como risco moderado. Já a Pilha P5 apresenta um desempenho semelhante ao da P2 e P3, com os fatores RFI, RRE e RES se aproximando de 85%, ou seja, no limite superior da zona de atenção, o que evidencia necessidade de atenção e esforços para atendimento aos requerimentos que dizem sobre esses itens.

Diante disso, conforme apresentado no Quadro 11, a classificação “atenção” indica uma aptidão média aos riscos, refletindo a presença de controles e práticas de gestão ainda insuficientes ou inconsistentes. Com base nas diretrizes e ações recomendadas por esta metodologia, destaca-se a necessidade de promover uma governança eficaz na gestão de rejeitos como medida prioritária. Essa classificação, evidencia ainda consonância com as recomendações do *Tailings Governance Framework: Position Statement* (ICMM, 2016), que destaca a necessidade de revisão da governança de rejeitos para barragens. Nesse sentido, destaca-se a relevância de estender essa abordagem às PDRs.

Apesar da ausência de legislações específicas que direcionem essa análise de risco para as PDRs (CREA, 2025), é essencial a adoção de controles mais rigorosos para o gerenciamento dessas estruturas. Conforme destaca Silva (2023), os empreendedores ainda não têm implementado políticas de gestão de riscos compatíveis com as exigências dessa atividade, tampouco alinhadas à governança necessária, considerando os históricos de falhas registradas nessas estruturas.

A importância da governança se evidencia não apenas na prevenção de falhas, mas também na capacidade de resposta e reconstrução diante de eventos críticos. O estudo de Almeida *et al.* (2024), que modela a governança da reconstrução após o rompimento da barragem em Brumadinho, demonstra que a efetividade das ações pós-desastre está diretamente

associada ao alinhamento entre os diferentes atores e à confiança construída ao longo do tempo.

Segundo Kalia e Gill (2023), empresas que adotam mecanismos de governança robustos tendem a apresentar menor exposição a riscos corporativos. Ressalta-se que essa transformação deve ser impulsionada pelos níveis mais altos da hierarquia organizacional, de modo a viabilizar uma governança estruturada, capaz de lidar de forma mais eficaz com os riscos envolvidos (Chovan *et al.*, 2021; Gagnon, 2019).

Neste contexto, o GISTM reconhece a governança como um dos pilares centrais para garantir a segurança das estruturas de disposição de rejeitos (ICMM, 2021), incluindo as PDRs. O GISTM estabelece, entre seus princípios, a necessidade de uma governança corporativa robusta, com definição clara de responsabilidades, envolvimento do mais alto nível da organização, como o conselho de administração, e mecanismos transparentes de prestação de contas. Assim, a adoção do GISTM representa um avanço importante ao integrar governança, gestão de riscos e responsabilidade social.

#### 4. CONCLUSÕES

A gestão de pilhas de rejeitos representa um desafio crítico na mineração contemporânea, especialmente diante da crescente adoção de práticas mais sustentáveis e seguras, como a disposição a seco em pilhas de disposição de rejeitos (PDRs). Neste contexto, a adoção de boas práticas pautadas em padrões internacionais, como o GISTM, torna-se essencial para garantir o controle eficaz dos riscos associados às estruturas.

Tendo em vista a necessidade de novas ferramentas para gestão de PDRs o presente trabalho contribuiu com uma proposta metodológica para avaliação de PDRs fundamentada no conceito de índice de risco e nos princípios do Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos (GISTM), possibilitando uma análise estruturada e integrada dos riscos financeiros, psicossociais, reputacionais, legais, estruturais e ambientais. A criação do índice  $\alpha_g$ , e dos fatores de risco, associados à categorização em zonas de risco, oferece aos empreendedores uma ferramenta prática para diagnóstico, planejamento de ações corretivas e priorização de esforços rumo à conformidade e à redução de riscos.

Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia nas cinco pilhas analisadas demonstram a efetividade do modelo proposto, evidenciando variações importantes no desempenho das estruturas frente aos critérios avaliados. Os achados indicam a necessidade de implementar ações que atendam aos requisitos do GISTM, tanto nas estruturas localizadas no Brasil quanto naquelas situadas no Peru. Pilhas como a P4 e a P5 destacaram-se como referências em boas práticas, ao passo que a P1 apresentou maior necessidade de atenção, sobretudo no fator ambiental.

Sendo assim, os resultados encontrados confirmam a utilidade do índice  $\alpha_g$  como suporte à tomada de decisão, promovendo maior racionalidade, transparência e eficácia na gestão de riscos. Reforça-se, ainda, a importância de implementar planos de ação contínuos, com foco na mitigação, capacitação das equipes e revisão sistemática dos processos, como caminho para consolidar uma governança mais robusta e alinhada aos princípios do GISTM, principalmente para atingir seu objetivo final.

Nesse sentido, a proposta metodológica pode ser compreendida como um ciclo dinâmico de governança de riscos, no qual o atendimento aos requerimentos do GISTM reduz diretamente a exposição aos riscos analisados, e se destaca por preencher lacunas na literatura e na prática da gestão de riscos em estruturas de rejeitos. Essa relação de interdependência gera um processo contínuo de retroalimentação: quanto maior a conformidade, menor o risco, e quanto menor o risco, maior a capacidade da estrutura de se manter estável e segura. Assim, a

ferramenta desenvolvida favorece não apenas o diagnóstico e a priorização de esforços, mas também promove a melhoria contínua na gestão de PDRs, fortalecendo a governança e contribuindo com a construção de uma cultura de segurança robusta das organizações.

Por fim, o presente estudo se destaca por preencher uma ausência de referências bibliográficas que podem suportar as análises e gestão de riscos em estruturas de disposição de rejeitos, principalmente para empilhamentos de rejeitos.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (AMN). **Painéis de segurança de barragens**. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/PaineisSeguranca>. Acesso em: 27 mai. 2025.
- ALMEIDA, A., de Melo, C. M., Souza dos Anjos, P. D., & de Sousa Teodosio, A. D. S. (2024). Modelling the governance of reconstruction after a mining disaster in Brumadinho, Brazil. **Cosmopolitan Civil Societies: An Interdisciplinary Journal**, 16(1), 1-22.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 31000: gestão de riscos – diretrizes**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dintegcgcin.saude.gov.br/attachments/download/23/2018%20-%20Diretrizes%20-%20Gest%C3%A3o%20de%20Riscos\\_ABNT%20NBR%20ISO%2031000.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dintegcgcin.saude.gov.br/attachments/download/23/2018%20-%20Diretrizes%20-%20Gest%C3%A3o%20de%20Riscos_ABNT%20NBR%20ISO%2031000.pdf). Acesso em 02 fev. 2025.
- BAIMA, Sandra; CAMPOS, José Nilson Bezerra. Classificação de risco de barragens por índices de risco – um estudo de caso. **Geotecnia**, n. 132, p. 151–174, 2014. Disponível em: [https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/545\\_151](https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/545_151). Acesso em: 7 jun. 2025.
- BRASIL MINERAL. **Recursos devem triplicar até 2040 e agregar R\$ 243 bi ao PIB brasileiro**. 2025. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/recursos-devem-triplicar-ate-2040-e-agregar-r-243-bi-ao-pib-brasileiro>. Acesso em: 27 mai. 2025.
- BRASIL. **Resolução ANM N° 95, de 07 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. 07 fev. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm). Acesso em: 18 jun. 2025.
- BURDEN, Ralph; WILSON, G. Ward. Mistura de resíduos rochosos e rejeitos para melhorar o desempenho da “pilha seca”: projeto e avaliação de misturas. **Minerals**, v. 13, n. 2, p. 295, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min13020295>. Acesso em: 27 mai. 2025.
- CARVALHO, Filipa; MELO, Rui Bettencourt. Avaliação de riscos: comparação entre vários métodos de avaliação de risco de natureza semiquantitativa. **Territorium**, n. 18, p. 43-54, 2011.
- CHOVAN, K. M., JULIEN, M. R., INGABIRE, É. P., MASENGO, E., LÉPINE, T., JAMES, M., & Lavoie, P. (2021). Risk assessment for tailings management. **CIM Journal**, 12(1), 9-24.
- CIGB – COMITÉ INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **Automated observation for the safety control of dams**. Boletim, 41, Paris: CIGB, 1982.
- CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DE MINAS GERAIS – CREA-MG. **Nota técnica Padrão Glocal e pilhas de estéril**. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.crea-mg.org.br/sites/default/files/publicacao/2025-06/notatecnica\\_cpma\\_resumido.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.crea-mg.org.br/sites/default/files/publicacao/2025-06/notatecnica_cpma_resumido.pdf) Acesso em: 9 jun. 2025.

CRISTEA, Gabriel; CONSTANTINESCU, Dan Mihai. A comparative critical study between FMEA and FTA risk analysis methods. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. p. 012046.

CARVALHO, Filipa Catarina Vasconcelos da Silva Pinto Marto. **Fiabilidade na avaliação de risco**: estudo comparativo de métodos semi-quantitativos de avaliação de risco em contexto ocupacional. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Lisboa, Portugal.

DAVIES, Nigel; DOGAN, Huseyin; KI-ARIES, Duncan. Application of Systems-of-Systems Theory to Electromagnetic Warfare Intentional Electromagnetic Interference Risk Assessment. **Systems**, v. 13, n. 4, p. 244, 2025.

DE MELO, Alexandre Vaz. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento**: estudo de caso de barragens da CEMIG GT. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

DOS REIS, Gustavo Ramos Dantés; DE OLIVEIRA, José Carlos. Integrating the Safety Management of Tailings Facilities to the ISO Model and to the Global Industry Standard on Tailings Management. *In: Mining Technology*. IntechOpen, 2022.

ERM. **Navigating the ESG of Tailings Management**. ERM Insights, 2021. Disponível em: <https://www.erm.com/insights/navigating-the-esg-of-tailings-management/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

ESPÓSITO, Terezinha; PALMIER, Luiz R. Application of risk analysis methods on tailings dams. **Soils and Rocks**, v. 36, n. 1, p. 97-117, 2013.

GAGNON, A. G. Key considerations when developing a risk management framework for tailings facilities. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINING GEOMECHANICAL RISK*, 1., 2019, Perth. Proceedings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 291–298.

GILL, Adrian; PIELECHA, Ireneusz; SZWAJCA, Filip. A new method of Failure Mode and Severity Effects Analysis for hydrogen-fueled combustion systems. **Energies**, v. 17, n. 19, 2024.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). **Reducing risks, protecting people**: HSE's decision-making process. Londres: HSE Books, 2001.

HONORATO, P. A. D. R. *et al.* A contribuição do modelo FPEIR/TOPSIS no diagnóstico ambiental da segurança hídrica de áreas atingidas pela barragem B1, Brumadinho, MG. **Sociedade & Natureza**, v. 37, e74110, 2025.

ICMM. **Os Protocolos de Conformidade - Padrão Global da indústria para Gestão de Rejeitos**. 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/tailings/tailings-conformance-protocols>. Acesso em: 25 jul. 2024.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). Tailings management: good practice guide. 1st ed. London: ICMM, 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/environment/tailings/tailings-good-practice-guide>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. Tailings Governance Framework: Position Statement. dez. 2016. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/position-statements/tailings-governance>. Acesso em: 22 jun. 2025.

KALIA, Ankita; GILL, Suveera. Corporate governance and risk management: a systematic review and synthesis for future research. *Journal of advances in management research*, v. 20, n. 3, p. 409-461, 2023.

LACASSE, Suzanne; LIU, Z. Q.; PICIULLO, Luca. **An integrated risk assessment and management framework for mine tailings storage facilities**. In: NEXT GENERATION TAILINGS CONFERENCE, 2023, Johannesburg. Proceedings. Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2023. Disponível em: [https://www.saimm.co.za/Conferences/files/tailings-2023/22%20590\\_Lacasse.pdf](https://www.saimm.co.za/Conferences/files/tailings-2023/22%20590_Lacasse.pdf). Acesso em: 16 jun. 2025.

LAFITTE, R. Classes of risk for dams. **International Journal on Hydropower and Dams**, v. 3, n. 6, 1996.

MARTIN, G. Ivan *et al.* Stochastic assessment of the influence of reservoir operation in hydrological dam safety through risk indexes. In: **Proceedings**. MDPI, 2018. p. 12. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3900/7/1/12>. Acesso em: 7 jun. 2025.

LEMOS, R., BEIRÃO, B., OLIVEIRA, M. P., CAMPOS, M. D. C. S., & de Carvalho, R. P. B. (2025). **DUPLO ATINGIMENTO:: o rompimento da barragem de Feijão em 2019 e os impactos das cheias em 2022 na bacia do rio Paraopeba-Minas Gerais, Brasil**. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF*, 15(1), 61-85.

MENEZES, D. A. *et al.* **A data-driven approach linking the credible failure modes for TSFs risk assessment**, Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2024.

OBONI, F.; OBONI, C. Tailings dam management for the twenty-first century. Berlin; Heidelberg: Springer International Publishing, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-19447-5>. Acesso em: 19 jun. 2025.

PERU. Decreto Supremo nº 034-2023-EM. Lima, 2023. Aprova o regulamento para gestão de segurança de barragens de rejeitos de mineração. **Ministerio de Energía y Minas**. Disponível em: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5634713/4990975-ds-n-034-2023-em.PDF?v=1704385619>. Acesso em: 16 mai. 2025.

RENSHAW, Jarrett; MASON, Jeff. Trump assina decreto para aumentar produção de minerais essenciais nos EUA. **CNN Brasil**, 20 mar. 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/trump-assina-decreto-para-aumentar-producao-de-minerais-essenciais-nos-eua/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

RICCARDI, L. *et al.* Structural causal modeling and STPA for the risk analysis of a rail system powered by H<sub>2</sub> fuel. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 256, 110758, 2025.

RISSOLI, A. L. C., PEREIRA, G. S., MENDES, A. J. C., SCHEUERMANN FILHO, H. C., CARVALHO, J. V. D. A., WAGNER, A. C., CONSOLI, N. C. (2024). **Dry stacking of filtered iron ore tailings: comparing on-field performance of two drying**

**methods.** *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(4), 2937-2948.

PIMENTA, M. L. B. **Abordagens de riscos em barragens de aterro.** 2009. Lisboa: LNEC, 2009.

SCHAFER, H. L.; BEIER, N. A.; MACCIOTTA, R. **A Failure Modes and Effects Analysis Framework for Assessing Geotechnical Risks of Tailings Dam Closure.** *Minerals*, Basel, v. 11, n. 11, p. 1234, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min11111234>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SÉRGIO, Fernando Rodrigues et al. Capacitação de profissionais envolvidos em segurança de barragens, segundo o novo marco legal. *Aracê*, v. 7, n. 1, p. 1690-1708, 2025.

SOUSA, Maria Luísa; TSIONIS, Georgios. **National seismic risk assessment: an overview and practical guide.** *Natural Hazards* (Springer Nature), 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07008-y>. Acesso em: 17 jun. 2025.

SILVA, Jacqueline Maria Calvacante da. **Barragens de rejeitos de mineração: governança dos riscos para prevenção de danos socioambientais.** São Paulo: Editora Dialética, 2023. 568 p.

SIQUEIRA, C.; TEIXEIRA, M. Brazilian Resolutions, **Global Industry Standard on Tailings Management, Trends for Tailings Management in Sustainable Mining.** In: WORLD MINING CONGRESS, 26., 2023, Brisbane. Proceedings... Brisbane: WMC, 2023.

SUBCOMISSÃO DOS REGULAMENTOS DE BARRAGENS (SRB). **Normas de observação e inspeção de barragens.** Portaria 847/93, Portugal, 1993 Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/847-660968>. Acesso em: 7 jun. 2025.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). **Risk based profiling system.** Technical Manual, 2001.

WILSON, Gordon Ward. **The new expertise required for designing safe tailings storage facilities.** *Soils and Rocks*, v. 44, p. e2021067521, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/soiroc/a/6R6NXbMZ9LxVTbXgjX5cdHQ>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ZHU, Yi; PASCOE, Marnie. **ALARP for Safety Management of Tailings Storage Facilities.** In: Proceedings of Tailings and Mine Waste Conference, Vancouver, Canadá, 5–8 nov. 2023. DOI: 10.14288/1.0438108. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/59368/1.0438108/3>. Acesso em: 17 jun. 2025.

ZUFFO, M. S. R. **Análise de risco em barragens: um índice de priorização.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

## APÊNDICE A - Classificação dos requerimentos por tipo de impacto de risco

### Risco Financeiro

Nº	Descrição resumida	Tipo de Impacto de Risco	Justificativa
3.3	Utilizar a base de conhecimento integrado para novas estruturas	ALTO	Falta dessa avaliação pode gerar falhas mal planejadas, custos judiciais, paralisações e impactos econômicos graves.
5.3	Desenvolver e manter modelo de balanço hídrico e gestão hídrica com base em mudanças climáticas	EXTREMO	Ausência aumenta risco de falhas hidráulicas e transbordamentos, levando a custos emergenciais e suspensões operacionais.
5.4	Considerar todos modos plausíveis de ruptura para minimizar risco ALARP	EXTREMO	Ignorar modos de ruptura pode causar falhas estruturais catastróficas com prejuízos financeiros bilionários.
8.1	Conselho publicar política de gestão segura, resposta a emergências e recuperação	MÉDIO	Ausência enfraquece governança, impacta credibilidade e aumenta risco regulatório e de sanções financeiras.
8.4	Designar Executivo Responsável pela segurança e resposta a emergências	ALTO	Sem ER, risco maior de falhas na coordenação e decisões, aumentando custos financeiros em incidentes.
8.5	Designar Engenheiro Responsável Técnico (RTER) com expertise e comunicação efetiva	ALTO	Falta do RTER pode levar a erros técnicos não detectados, resultando em falhas e custos corretivos elevados.
8.7	Estabelecer CIRR ou revisor técnico independente para estruturas com consequências Muito Alta ou Extrema	EXTREMO	Sem revisão independente, falhas graves podem passar despercebidas, resultando em prejuízos financeiros catastróficos.
9.1	Contratar/Designar EdR experiente para estruturas de Alta a Extrema complexidade e fechamento	EXTREMO	Ausência do EdR compromete segurança técnica, podendo resultar em falhas, multas e danos financeiros severos.
10.4	EdR ou revisor técnico sênior realizar revisões anuais da construção e desempenho	ALTO	Falta dessas revisões pode permitir deterioração não detectada, elevando risco de falhas e custos emergenciais.
10.5	Realizar RPSB independente periódica conforme classificação das estruturas	EXTREMO	Não realizar RPSB aumenta risco de falhas técnicas não detectadas, com impactos financeiros graves.
10.6	CIRR ou revisor independente apresentar revisões sênior permanentes em todas fases do ciclo de vida	EXTREMO	Ausência reduz controle técnico contínuo, aumentando chance de falhas catastróficas e custos associados.
10.7	Revisar periodicamente custos estimados de fechamento, reabilitação e pós-fechamento	BAIXO	Sem revisão, pode faltar provisão financeira suficiente, expondo a empresa a passivos inesperados e custos elevados.
14.2	Avaliar impactos após falha catastrófica rapidamente, após segurança das pessoas	MÉDIO	Falta de avaliação compromete resposta e remediação rápida, causando maior dano financeiro em médio prazo.
14.3	Trabalhar com órgãos públicos e partes interessadas em planos de recuperação pós-falha	ALTO	Ausência prejudica reabilitação eficiente, prolonga impactos e custos financeiros elevados.
14.5	Facilitar monitoramento e divulgação pública dos resultados pós-falha e adaptar ações conforme feedback	BAIXO	Falta de transparência e adaptação pode piorar credibilidade e gerar custos adicionais de gestão de crises.
15.1	Publicar e atualizar informações sobre gestão segura, avaliações e classificações conforme regulamentação	MINIMO	Falta de transparência reduz confiança de investidores e reguladores, podendo afetar financiamento e causar sanções.

### Risco Psicossocial

Nº	Descrição resumida	Tipo de Impacto de Risco	Justificativa
1.1	Respeito aos direitos humanos e às comunidades afetadas	EXTREMO	Ignorar este princípio pode causar traumas sociais graves, perda de confiança institucional e conflitos comunitários intensos.
1.2	Reconhecimento e respeito aos direitos das comunidades afetadas, incluindo povos indígenas e comunidades tradicionais.	EXTREMO	A exclusão ou discriminação pode levar a impactos sociais severos e agravamento de desigualdades, aumentando tensões e riscos psicossociais.
9.5	Requisitos mínimos para equipes de resposta a emergências	EXTREMO	A ausência de preparo em situações críticas gera pânico, trauma coletivo e sensação de abandono.

12.1	Mecanismos de denúncia e resposta a preocupações	EXTREMO	A ausência de canais seguros para denúncias gera medo, silenciamento e sofrimento psicológico contínuo.
------	--	---------	---

## Risco Reputacional

Nº	Descrição resumida	Tipo de Impacto de Risco	Justificativa
1.1	Definir responsabilidades claras para segurança das estruturas	ALTO	Falhas na definição causam dúvidas sobre compromisso, afetando confiança pública e imagem institucional.
1.3	Implementar sistema de gestão integrado para rejeitos	MÉDIO	Ausência reduz percepção de profissionalismo e controle, impactando credibilidade do operador.
1.4	Revisar periodicamente políticas e procedimentos	MÍNIMO	Falta de atualização gera impressão de negligência, prejudicando a imagem da empresa perante stakeholders.
2.1	Analisar cenários de falhas e impactos sociais	ALTO	Ignorar impactos sociais pode gerar críticas públicas, protestos e danos à reputação junto às comunidades locais.
5.2	Garantir projeto e localização baseados em análises multicritério	ALTO	Escolhas inadequadas elevam percepção de irresponsabilidade e falha na gestão ambiental, afetando reputação.
5.4	Considerar todos modos plausíveis de ruptura para minimizar riscos	EXTREMO	Falhas graves e inesperadas abalam confiança pública, gerando danos reputacionais duradouros.
5.7	Definir critérios para inspeções e monitoramento durante o ciclo de vida	MÉDIO	Inspeções deficientes podem causar imagem negativa por negligência na manutenção da segurança.
5.8	Estabelecer critérios claros para ações corretivas e preventivas	MÉDIO	Falta de critérios cria percepção de falta de compromisso com segurança e prevenção.
6.1	Manter documentação técnica atualizada e acessível	ALTO	Documentação deficiente pode gerar críticas de transparência, afetando reputação com especialistas e reguladores e auditorias.
6.2	Assegurar comunicação clara e eficiente entre equipes	MÉDIO	Falha na comunicação interna pode gerar erros externos, causando percepção pública de desorganização.
6.3	Implementar sistema de controle documental robusto	MÍNIMO	Documentos mal gerenciados podem afetar credibilidade técnica e transparência.
6.4	Desenvolver e manter sistemas para gestão de rejeitos	MÉDIO	Falta de sistemas eficientes pode ser vista como falta de preparo e aumentar riscos reputacionais.
6.5	Garantir treinamento contínuo das equipes	MÉDIO	Equipes mal treinadas transmitem imagem de incompetência e falta de responsabilidade.
6.6	Investir em inovação e tecnologias para segurança	BAIXO	Falta de inovação pode ser vista como estagnação, mas impacto reputacional é moderado.
7.2	Divulgar políticas de sustentabilidade e segurança para stakeholders	ALTO	Falta de divulgação pode gerar percepção de opacidade, prejudicando imagem pública e relação com investidores.
8.1	Conselho publicar política de gestão segura, emergência e recuperação	ALTO	Transparência institucional é chave para confiança pública; ausência causa desconfiança.
8.2	Estabelecer governança clara para gestão de rejeitos	ALTO	Governança nebulosa é vista como falha ética, afetando reputação junto a reguladores e sociedade.
8.3	Vincular incentivos financeiros à segurança	MÉDIO	Falta de alinhamento pode ser interpretada como descompromisso com segurança, afetando imagem interna e externa.
8.4	Designar Executivo Responsável pela segurança e resposta	ALTO	Ausência de liderança clara gera dúvidas públicas sobre responsabilidade em crises.
8.5	Designar Engenheiro Responsável Técnico com expertise e comunicação	ALTO	Falta desse responsável pode gerar desconfiança quanto à capacidade técnica da gestão.
8.7	Estabelecer Conselho Independente de Revisão	EXTREMO	Falta de revisão independente mina a confiança pública na integridade e segurança das operações.
10.1	Avaliar riscos com equipe multidisciplinar e revisão periódica	ALTO	Ausência ou falhas na avaliação são vistas como negligência, prejudicando imagem e credibilidade.
10.2	Revisar SGDR e SGAS e reportar a instâncias superiores	MÉDIO	Falta de reporte e revisão cria impressão de ocultação de informações, prejudicando confiança pública.

10.6	CIRR ou revisor técnico independente apresentar revisões permanentes	EXTREMO	Sem controle técnico independente, reputação é severamente impactada pela falta de transparência e segurança.
10.7	Revisar periodicamente custos estimados de fechamento e pós-fechamento	MÉDIO	Falta de revisão financeira gera críticas quanto à responsabilidade fiscal e ambiental da empresa.
11.1	Educar funcionários sobre prevenção de falhas e responsabilidades	MÉDIO	Funcionários mal preparados passam imagem de descuido e baixa cultura de segurança.
11.2	Incorporar experiência dos trabalhadores no planejamento	BAIXO	Falta de participação pode diminuir engajamento interno, com impacto reputacional limitado externamente.
11.3	Promover comunicação interfuncional eficaz	MÉDIO	Comunicação ruim gera erros visíveis e críticas à gestão, prejudicando imagem institucional.
11.4	Identificar e implementar lições aprendidas	MÉDIO	Falta de aprendizado contínuo passa impressão de negligência em relação a incidentes passados.
11.5	Reconhecer e proteger denunciantes	EXTREMO	Falta de proteção afasta denúncias e pode causar escândalos reputacionais.
12.1	Processo formal para receber e responder a preocupações	EXTREMO	Ausência ou falha no processo pode gerar denúncias públicas e críticas por falta de transparência.
12.2	Proibir retaliações contra denunciantes	EXTREMO	Retaliação pode gerar escândalos e perda de confiança pública e interna.
13.1	Plano de Preparação e Resposta a Emergências (PPRE) baseado em cenários	ALTO	Falta ou desatualização do plano gera percepção de irresponsabilidade diante de crises.
13.2	Colaborar com órgãos públicos para melhorar capacidade de resposta	MÉDIO	Falta de colaboração prejudica imagem de comprometimento e transparência.
13.3	Manter prontidão e realizar treinamentos e exercícios regularmente	ALTO	Baixa prontidão e falta de treinamentos geram dúvidas públicas sobre segurança real.
13.4	Resposta imediata em caso de falha catastrófica	EXTREMO	Resposta tardia ou insuficiente causa graves danos à imagem institucional e confiança da população.
14.1	Engajar órgãos públicos e organizações em estratégias pós-falha	MÉDIO	Falta de engajamento prejudica percepção pública de responsabilidade social.
14.2	Avaliar impactos locais rapidamente após falha	MÉDIO	Avaliação tardia gera críticas de negligência e má gestão dos danos.
14.3	Desenvolver planos de recuperação com partes interessadas	ALTO	Falta de planos claros causa dúvidas sobre compromisso e capacidade de reparação.
14.4	Permitir participação das pessoas afetadas na recuperação	ALTO	Falta de participação reduz aceitação social e pode gerar resistência e críticas.
14.5	Monitorar e divulgar resultados pós-falha, adaptando ações	MÉDIO	Falta de transparência e adaptação prejudica imagem pública e gera desconfiança.
15.1	Publicar e atualizar informações sobre políticas, avaliações e classificações	ALTO	Transparência contínua é fundamental para manter confiança de público e investidores; falta dela prejudica imagem.
15.3	Cooperar com iniciativas globais de transparência	ALTO	Não cooperação afeta percepção de responsabilidade corporativa Global, prejudicando imagem.

## Risco Legal

Nº	Descrição resumida	Tipo de impacto de Risco	Justificativa
1.1	Obter consentimento livre, prévio e informado (CLPI) de povos indígenas	EXTREMO	Violação de direitos humanos e leis ambientais pode gerar ações judiciais, sanções internacionais e bloqueios operacionais.
1.2	Trabalhar para manter consentimento indígena conforme melhores práticas internacionais	EXTREMO	Descumprimento pode acarretar litígios, multas severas e danos reputacionais internacionais irreversíveis.
1.3	Garantir que as pessoas estejam engajadas nos processos	MÍNIMO	Pode gerar processos e reclamações com possíveis autuações
1.4	Responsabilidade técnica clara para projetos e operações	ALTO	Ausência pode levar a penalizações por negligência técnica e falhas regulatórias com multas e embargos.
2.1	Elaborar caracterização detalhada do local e rejeitos	MÉDIO	Dados incompletos podem resultar em não conformidade com normas ambientais, gerando autuações e restrições operacionais.
2.2	Atualizar regularmente propriedades físicas e químicas dos rejeitos	MÉDIO	Falta de atualização pode levar a riscos regulatórios por descumprimento de padrões ambientais e exigências técnicas.

2.3	Análise detalhada de brechas e modos de ruptura, com atualização	ALTO	Não cumprimento pode resultar em fiscalização rigorosa, multas pesadas e embargos devido à má gestão do risco estrutural.
3.4	Atualizar avaliação de impactos locais conforme mudanças no contexto	MÉDIO	Ignorar mudanças pode gerar inconsistências legais em licenças e processos de fiscalização, aumentando riscos legais.
4.1	Determinar e documentar classificação de consequências das falhas	ALTO	Falhas na classificação podem causar decisões judiciais contrárias, multas e restrições por erro na avaliação de riscos.
4.2	Desenvolver projetos preliminares para carregamentos compatíveis com classificações mais altas	ALTO	Falta de projeto adaptativo pode resultar em penalidades por negligência técnica e riscos regulatórios significativos.
4.3	Decisão executiva documentada sobre critérios de projeto flexíveis	MÉDIO	Falta de documentação pode comprometer defesa legal em processos administrativos e dificultar comprovação de diligência.
4.4	Documentar critérios de projeto para minimizar riscos em todos modos de ruptura	ALTO	Não atender ao requisito pode gerar autuações por falhas no planejamento e riscos legais por negligência.
4.5	Aplicar fatores de segurança e gestão adequada de infiltrações	ALTO	Falhas podem levar a sanções severas e responsabilização jurídica em caso de incidentes e acidentes ambientais.
5.2	Implementar sistema de governança para rejeitos com responsabilidades e processos claros	ALTO	Inexistência pode resultar em penalidades por falta de conformidade regulatória e má gestão de segurança.
5.4	Considerar todos modos plausíveis de ruptura para minimizar riscos	EXTREMO	Ignorar pode acarretar falhas catastróficas com graves consequências legais, incluindo processos criminais.
5.5	Projetar todas fases da construção, alteamentos e fechamento	ALTO	Ausência de projeto detalhado compromete conformidade regulatória, podendo causar multas e embargos.
5.6	Planejar fechamento progressivo e reabilitação durante operações	ALTO	Falta de planejamento pode causar irregularidades em licenças e penalizações administrativas.
5.7	Realizar análises periódicas para garantir segurança e conformidade	ALTO	Falha em análises pode acarretar ações judiciais e sanções por negligência na gestão de riscos.
5.8	Garantir processo robusto para avaliação de riscos e mitigação	ALTO	Falta de mitigação adequada eleva chances de autuações e processos regulatórios contra o operador.
6.1	Implementar sistemas de monitoramento e manutenção adequados	ALTO	Sistema inadequado pode gerar não conformidade com normas ambientais e judiciais, e multas pesadas.
6.2	Garantir pessoal qualificado para operação e manutenção	MÉDIO	Falta de pessoal qualificado pode resultar em responsabilização administrativa e penalidades.
6.3	Realizar treinamentos e capacitação contínua	BAIXO	Falha na capacitação compromete conformidade legal e aumenta risco de penalizações por negligência.
6.4	Documentar manutenção e inspeções regularmente	MÉDIO	Documentação insuficiente dificulta defesa legal e aumenta riscos de sanções em auditorias e fiscalizações.
6.5	Realizar auditorias internas e externas periódicas	ALTO	Ausência pode resultar em penalidades por não cumprimento das melhores práticas e normas regulatórias.
6.6	Atualizar programas de gestão adaptativa com base em resultados de monitoramento	MÉDIO	Ignorar atualizações pode comprometer licenciamento e levar a autuações administrativas.
7.1	Programa integrado de monitoramento abrangente	ALTO	Falta do programa pode acarretar responsabilização legal por falha na prevenção de acidentes.
7.2	Integrar monitoramento com gestão de segurança operacional	ALTO	Não integração pode resultar em multas por descumprimento de normas técnicas.
7.3	Estabelecer indicadores e atualizar programa com base em dados	MÉDIO	Falha no monitoramento e atualização reduz defesa legal em inspeções e pode gerar sanções.
8.1	Conselho publicar política clara de segurança e gestão de rejeitos	MÉDIO	Falta de transparência pode levar a questionamentos regulatórios e multas por descumprimento de requisitos legais.
9.2	Contratar EdR com contrato claro e funções definidas	ALTO	Falta de contrato pode gerar responsabilidade direta da empresa em caso de falhas e embargos por gestão inadequada, além do descumprimento de legislações.

9.4	Seleção do EdR pelo Executivo Responsável com informação ao setor de compras	ALTO	Falha na seleção pode gerar questionamentos jurídicos sobre idoneidade e responsabilização por falhas.
10.4	Revisões anuais da construção e desempenho pelo EdR ou revisor sênior independente	BAIXO	Ausência de revisões pode acarretar desatualizações e possíveis autuações.
10.5	RPSB independente periódica conforme classificação das estruturas	EXTREMO	Falha em RPSB pode levar a graves penalidades legais, incluindo a suspensão de operações e processos criminais.
10.6	CIRR ou revisor independente apresentar revisões permanentes nas fases do ciclo de vida	ALTO	Ausência pode resultar em responsabilização por falhas técnicas e judiciais por negligência.
10.7	Revisar custos estimados de fechamento, reabilitação e pós-fechamento	MÉDIO	Falha na revisão pode gerar passivos legais e financeiros inesperados, com questionamento de gestores e reguladores.
11.4	Definir e implementar procedimentos para emergências e comunicação	ALTO	Falta de procedimentos pode resultar em penalidades severas, responsabilização criminal e administrativa.
12.2	Estabelecer sistema de reporte transparente e acessível	MÉDIO	Falta de transparência dificulta auditorias e aumenta riscos regulatórios e reputacionais.
13.1	Garantir conformidade com leis ambientais e regulatórias locais	EXTREMO	Descumprimento pode resultar em multas pesadas, embargos, processos criminais e suspensão de atividades.
15.1	Publicar e atualizar informações sobre gestão segura e classificações conforme regulamentação	MÉDIO	Falha na publicação pode gerar questionamentos legais e perda de confiança de órgãos reguladores e investidores.

## Risco Estrutural

Nº	Descrição resumida	Tipo de impacto do risco	Justificativa
2.1	Governança clara sobre responsabilidades	ALTO	A ausência de governança definida pode gerar falhas na tomada de decisão e responsabilização, comprometendo a integridade da estrutura.
2.2	Designação de Executivo Responsável	ALTO	A falta de um responsável pode levar à omissão de decisões críticas e ações preventivas.
2.3	Comitê independente de revisão técnica (CIRR)	ALTO	Sem revisão técnica externa, erros de projeto, operação e manutenção podem passar despercebidos, comprometendo a estabilidade da estrutura.
3.4	Engajamento das pessoas afetadas no processo decisório	MÍNIMO	Embora social, a ausência desse engajamento pode resultar em informações relevantes não consideradas no projeto e operação.
4.1	Classificação de consequências	ALTO	Sem uma classificação adequada, medidas de segurança podem ser subdimensionadas, levando a risco maior de falhas.
4.2	Avaliação de perigos e cenários plausíveis de falha	EXTREMO	A ausência dessa avaliação pode resultar em falhas catastróficas não previstas e não mitigadas.
4.3	Avaliação de riscos e impactos de maneira integrada	EXTREMO	Não integrar riscos físicos e operacionais compromete completamente a segurança estrutural.
4.4	Atualização periódica das classificações e avaliações	ALTO	Avaliações desatualizadas não consideram mudanças críticas nas condições da estrutura.
4.5	Comunicação e transparência dos riscos	MÉDIO	A falta de comunicação adequada pode atrasar ações preventivas e decisões baseadas em risco.
4.6	Planejamento para minimizar riscos de falha	EXTREMO	Não planejar ações de mitigação aumenta significativamente o risco de ruptura.
4.7	Integração de riscos ao processo decisório	ALTO	Sem essa integração, decisões técnicas e operacionais podem ignorar riscos estruturais relevantes.
4.8	Aplicação do princípio TBRP (Tão Baixo Quanto Razoavelmente Possível)	ALTO	Ignorar o TBRP pode permitir riscos acima do aceitável para a estrutura.
5.1	Integração de aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos no projeto	ALTO	Projetos desbalanceados podem falhar tecnicamente se ignorarem essas dimensões.
5.2	Avaliação de alternativas de projeto	ALTO	Falta de comparação pode resultar na escolha de projetos estruturalmente inadequados.
5.4	Projeto para fechamento seguro	MÉDIO	Fechamento mal planejado compromete estabilidade no longo prazo.
5.5	Design técnico robusto para todas as fases	EXTREMO	Projeto mal dimensionado é uma das principais causas de ruptura.

5.6	Verificações de projeto por especialistas independentes	ALTO	Sem verificação técnica independente, falhas de projeto podem não ser detectadas.
5.7	CrITÉrios de aceitaçŁo de materiais	ALTO	Uso de materiais inadequados compromete a integridade fŁsica da estrutura.
6.1	OperaçŁo conforme o projeto tŁcnico	EXTREMO	Operar fora dos parŁmetros projetados compromete diretamente a estabilidade estrutural.
6.2	Procedimentos operacionais padronizados	ALTO	OperaçŁes inconsistentes aumentam o risco de sobrecarga ou falha da estrutura.
6.3	Limites operacionais e plano de resposta a desvios	ALTO	Sem limites claros e açŁes corretivas, desvios crŁticos podem causar falhas.
6.4	Monitoramento da condiçŁo estrutural	EXTREMO	Sem monitoramento, nŁo Ł possŁvel detectar sinais de instabilidade a tempo.
6.5	Sistema de alerta e resposta a eventos	EXTREMO	A ausŁncia de alerta rŁpido impossibilita açŁes emergenciais, agravando falhas.
6.6	RevisŁo dos dados de operaçŁo e monitoramento	ALTO	Dados nŁo analisados nŁo geram açŁes corretivas necessŁrias.
7.1	ManutençŁo planejada e preventiva	ALTO	Falta de manutençŁo pode acelerar deterioraçŁo estrutural.
7.2	InspeçŁes visuais e tŁcnicas regulares	ALTO	InspeçŁes sŁo essenciais para identificar deterioraçŁes ou anomalias.
7.3	CorreçŁo de anomalias identificadas	EXTREMO	Ignorar anomalias identificadas pode levar Ł ruptura da estrutura.
7.4	Plano de manutençŁo atualizado	MŁDIO	Um plano desatualizado pode deixar de prever açŁes corretivas ou preventivas importantes.
7.5	Registro de manutençŁo e correçŁes	MŁDIO	Sem rastreabilidade, pode-se repetir erros ou negligenciar manutençŁes crŁticas.
8.2	InventŁrio de dados geotŁcnicos, hidrolŁgicos e de operaçŁo	ALTO	Dados incompletos ou ausentes comprometem a base de decisŁo e avaliaçŁo estrutural.
8.3	Interoperabilidade de dados	MŁDIO	Dificuldade no cruzamento de dados tŁcnicos pode atrasar anŁlises crŁticas.
8.4	Qualidade e integridade de dados	ALTO	Dados imprecisos ou corrompidos podem levar a decisŁes tŁcnicas incorretas.
8.5	Acesso aos dados pelos tomadores de decisŁo	MŁDIO	Falta de acesso pode atrasar açŁes corretivas ou avaliaçŁes de risco.
8.6	ProteçŁo de dados crŁticos	BAIXO	Perda de dados pode dificultar o acompanhamento, mas tem menor impacto imediato na estrutura.
8.7	Armazenamento e retençŁo de dados	BAIXO	Similar ao anterior, embora importante, o impacto estrutural direto Ł limitado.
9.1	Sistemas e tecnologia de monitoramento adequados	EXTREMO	Sem tecnologia confiŁvel, sinais de instabilidade podem nŁo ser detectados a tempo.
9.3	FrequŁncia de monitoramento compatŁvel com o risco	ALTO	Monitoramento esparsos pode nŁo captar variaçŁes crŁticas.
9.5	CalibraçŁo e validaçŁo dos instrumentos de monitoramento	ALTO	Instrumentos mal calibrados fornecem dados errŁneos, comprometendo a avaliaçŁo da estabilidade.
10.1	AvaliaçŁo de risco atualizada e multidisciplinar	EXTREMO	Sem essa avaliaçŁo, riscos crŁticos podem ser subestimados ou nŁo reconhecidos.
10.2	RevisŁo do SGDR por revisor tŁcnico qualificado	ALTO	Falta de revisŁo compromete a efetividade do sistema de gestŁo estrutural.
10.3	Auditorias internas para verificaçŁo de conformidade	ALTO	Sem auditorias, desvios e falhas nos processos tŁcnicos podem nŁo ser corrigidos.
10.4	RevisŁes periŁdicas de desempenho da estrutura	EXTREMO	RevisŁes negligenciadas nŁo detectam degradaçŁes estruturais.
10.5	RevisŁo independente (RPSB)	ALTO	Sem RPSB, riscos sistemŁticos e falhas de governançŁa podem permanecer ocultos.
10.7	VerificaçŁo periŁdica da capacidade financeira para fechamento e emergŁncias	MŁDIO	Pode comprometer açŁes corretivas ou emergenciais em caso de necessidade crŁtica.
11.1	Treinamento dos trabalhadores sobre impacto das suas funçŁes	MŁDIO	Falta de capacitaçŁo pode levar a açŁes que afetam a estrutura sem percepçŁo de risco.
11.2	Uso do conhecimento empŁrico dos trabalhadores	BAIXO	Pode-se perder observaçŁes relevantes, mas o impacto direto Ł limitado se houver controle tŁcnico adequado.
11.3	ColaboraçŁo entre funçŁes para troca de informaçŁes	MŁDIO	ComunicaçŁo ineficiente pode atrasar resposta a falhas.
11.4	Aprendizado com incidentes e fatores humanos	ALTO	NŁo incorporar liçŁes aprendidas pode perpetuar erros estruturais.
11.5	ProteçŁo e incentivo Ł denŁncia de problemas	MŁDIO	A ausŁncia desse mecanismo pode atrasar a identificaçŁo de riscos crŁticos.
13.1	Plano de emergŁncia baseado em cenŁrios plausŁveis	EXTREMO	A ausŁncia de plano adequado impede resposta rŁpida a falhas estruturais iminentes.

13.2	Avaliação da capacidade da resposta a emergências com parceiros externos	ALTO	Falta de prontidão dos serviços de emergência pode agravar os efeitos estruturais de falhas.
13.3	Manutenção do estado de prontidão com exercícios simulados	MÉDIO	Sem simulações, a resposta real pode ser ineficaz, aumentando danos estruturais.
13.4	Acionamento imediato em caso de falha	EXTREMO	A demora em agir em caso de falha catastrófica compromete vidas e integridade estrutural remanescente.

## Risco Ambiental

Nº	Descrição resumida	Tipo de impacto do risco	Justificativa
1.2	Respeito aos direitos humanos e ambientais	ALTO	A não observância pode resultar em contaminação ambiental que afeta comunidades vulneráveis.
1.3	Responsabilidade ambiental clara e liderança	ALTO	Sem liderança clara, obrigações ambientais podem não ser cumpridas.
2.2	Classificação de Consequências com base em impacto ambiental	EXTREMO	Pode ocultar a gravidade de danos ambientais e atrasar ações preventivas.
2.3	Designação do NCR apropriado considerando ambiente	MÉDIO	Subdimensionamento de estruturas pode aumentar a exposição a riscos ambientais.
3.1	Avaliação de opções com menor impacto ambiental	ALTO	Ignorar alternativas menos impactantes pode aumentar significativamente o dano ambiental.
3.2	Decisão de localização considerando riscos ambientais	EXTREMO	Localizações inadequadas podem afetar corpos d'água, fauna e flora sensíveis.
3.3	Projeto considerando riscos ambientais	ALTO	Projetos mal concebidos podem resultar em vazamentos e contaminação do solo e água.
3.4	Escolha de tecnologia considerando riscos ambientais	ALTO	Tecnologias inadequadas podem não conter resíduos ou contaminantes.
4.1	Gestão da água e efluentes	EXTREMO	Falhas podem levar à contaminação direta de águas superficiais e subterrâneas.
4.2	Controle de infiltração e percolação	ALTO	Pode contaminar lençóis freáticos e comprometer a biodiversidade.
4.4	Gestão e controle da água de contato	EXTREMO	Pode causar poluição severa de cursos d'água e afetar fauna e flora aquáticas.
4.5	Controle de poeira e emissões	ALTO	Pode degradar a qualidade do ar e afetar comunidades e ecossistemas.
4.6	Monitoramento ambiental	ALTO	Sem monitoramento, falhas ambientais podem não ser detectadas a tempo.
5.1	Projeto ambientalmente seguro	ALTO	Estruturas sem segurança ambiental adequada podem causar impactos severos.
5.2	Verificação independente do projeto	MÉDIO	Falhas ambientais podem passar despercebidas sem revisão externa.
5.4	Gestão de mudanças com foco ambiental	ALTO	Mudanças não avaliadas podem aumentar riscos ambientais.
5.6	Descomissionamento ambientalmente responsável	EXTREMO	Pode deixar passivos ambientais permanentes.
5.7	Planos de fechamento com critérios ambientais	ALTO	Falta de critérios pode resultar em áreas degradadas.
5.8	Incorporação de lições aprendidas ambientais	MÉDIO	Ignorar aprendizados pode repetir falhas ambientais anteriores.
6.1	Sistema de gestão ambiental robusto	ALTO	Sistemas frágeis podem falhar na prevenção e mitigação ambiental.
6.3	Revisão técnica com foco ambiental	MÉDIO	Sem revisão adequada, aspectos ambientais podem ser negligenciados.
6.4	Registro de dados ambientais	MÉDIO	A ausência de dados dificulta a identificação e mitigação de impactos.
6.5	Auditorias ambientais internas	MÉDIO	Sem auditorias, falhas ambientais podem persistir sem correções.
7.1	Identificação de riscos ambientais em operações	ALTO	Pode deixar de identificar situações com potencial de causar danos ambientais.
7.2	Avaliação de riscos ambientais	ALTO	Pode levar à subestimação de riscos relevantes ao meio ambiente.
7.3	Medidas para mitigação de riscos ambientais	EXTREMO	A ausência de mitigação pode levar a incidentes ambientais de grandes proporções.
7.4	Respostas a incidentes ambientais	EXTREMO	Falta de resposta rápida pode intensificar os danos ambientais.
7.5	Planos de emergência com foco ambiental	ALTO	Planos deficientes aumentam os danos em caso de falhas estruturais com efeitos ambientais.

8.1	Recursos disponíveis para ações ambientais	ALTO	Sem recursos, ações preventivas e corretivas ambientais podem ser inviáveis.
8.2	Capacitação ambiental da força de trabalho	MÉDIO	Funcionários despreparados podem cometer erros com consequências ambientais.
8.4	Consciência ambiental das partes interessadas	MÉDIO	Falta de conscientização pode gerar comportamentos de risco ambiental.
10.1	Documentação de políticas ambientais	MÉDIO	Sem diretrizes documentadas, práticas ambientais podem ser inconsistentes.
13.1	Comunicação transparente de impactos ambientais	ALTO	A omissão de informações pode comprometer a gestão ambiental participativa.
13.2	Diálogo com partes afetadas sobre riscos ambientais	ALTO	Sem diálogo, medidas preventivas podem não refletir preocupações legítimas.
13.3	Resposta a preocupações ambientais das comunidades	ALTO	Ignorar preocupações pode resultar em conflitos e danos não mitigados.
13.4	Consulta contínua sobre desempenho ambiental	MÉDIO	Sem consulta contínua, falhas podem não ser detectadas oportunamente.
14.1	Transparência sobre riscos e desempenho ambiental	ALTO	A falta de transparência reduz a confiança pública e a eficácia das ações ambientais.
14.2	Relatórios públicos sobre desempenho ambiental	MÉDIO	Sem relatórios, não há prestação de contas nem pressão por melhoria contínua.
14.3	Verificação de dados ambientais divulgados	MÉDIO	Informações erradas podem induzir decisões inadequadas de gestão ambiental.
14.5	Divulgação de lições aprendidas ambientais	MÉDIO	Ocultar falhas ambientais impede que outras operações evitem os mesmos erros.
15.1	Revisão contínua do sistema de gestão ambiental	MÉDIO	Sem revisões, o sistema pode ficar obsoleto e ineficaz frente a novos desafios ambientais.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão de rejeitos na mineração representa um dos maiores desafios contemporâneos do setor mineral, exigindo soluções que aliem segurança, sustentabilidade e responsabilidade socioambiental. Diante do histórico de desastres envolvendo estruturas de disposição de rejeitos no Brasil e no mundo, torna-se evidente que o fortalecimento da governança, a melhoria da gestão de riscos e a conformidade com padrões globais não sejam apenas recomendações técnicas, mas compromissos éticos e sociais indispensáveis.

A presente dissertação, desenvolvida em formato de artigos, teve como propósito avaliar a aplicabilidade do GISTM às PDRs e propor uma nova metodologia e ferramenta para a gestão de riscos associada a essas estruturas. A partir da análise conjunta dos dois estudos apresentados, observa-se que o GISTM, embora originalmente concebido com foco em barragens, oferece uma base consistente para a avaliação de riscos em PDRs, desde que suas particularidades sejam devidamente consideradas.

O primeiro artigo demonstrou que os riscos estruturais, ambientais e psicossociais são os mais recorrentes dentro do Padrão, revelando a ênfase do GISTM na prevenção de impactos catastróficos à vida humana e ao meio ambiente. A análise dos dados de cinco PDRs permitiu identificar padrões de aderência ao GISTM e fragilidades específicas no atendimento a determinados tópicos e princípios, sobretudo nos aspectos relacionados à gestão, governança e resposta a emergências.

Com base nessas observações, o segundo artigo avançou na proposição de um Índice Global de Riscos ( $\alpha g$ ), adaptado para PDRs, capaz de incorporar de maneira integrada as dimensões estruturais, ambientais, legais, reputacionais, financeiras e psicossociais. A metodologia proposta mostrou-se eficaz para classificar as estruturas em zonas de risco, orientar planos de ação e subsidiar a tomada de decisão técnica, regulatória e corporativa, oferecendo um modelo replicável, transparente e alinhado às boas práticas internacionais de segurança e sustentabilidade.

Os riscos analisados evidenciam a necessidade de uma gestão mais estruturada, especialmente no que se refere à governança de rejeitos, uma vez que a aptidão para gerenciar riscos está diretamente relacionada à mudança de cultura necessária para alcançar as metas propostas pelo GISTM. Já não é mais suficiente limitar a preocupação apenas aos aspectos técnicos, embora estes permaneçam prioritários no contexto das estruturas de disposição de rejeitos; é imprescindível considerar também outros fatores nas análises de risco, tais como os aspectos sociais, ambientais, legais e reputacionais. Ressalta-se, ainda, que o aumento contínuo

da construção de PDRs deve ser acompanhado pelo desenvolvimento e realização de estudos mais criteriosos que contemplem os desafios operacionais específicos das PDRs.

A governança de rejeitos, entendida como a capacidade institucional e organizacional de gerenciar riscos de forma proativa, transparente e integrada, emerge como elemento central na promoção de práticas mais seguras de disposição de rejeitos. Nesse sentido, o GISTM se mostra um instrumento valioso ao estabelecer diretrizes claras com aspectos técnicos, sociais e ambientais, promovendo uma mudança de cultura no setor, ao mesmo tempo em que demanda o compromisso efetivo das mineradoras com a tolerância zero a fatalidades e a danos ao meio ambiente.

Como contribuição prática, este trabalho fornece uma base metodológica que pode ser aplicada por operadores, órgãos reguladores e consultores técnicos para aprimorar o processo de avaliação e mitigação de riscos em PDRs. Além disso, reforça a importância de se adaptar os padrões internacionais às realidades locais e aos diferentes tipos de estruturas existentes na mineração, o que é uma própria sugestão dos Protocolos de Conformidade (ICMM, 2021) de oferecer respaldo para autoavaliações e avaliações feitas por terceiros independentes sobre o progresso na implementação do Padrão (ICMM, 2021).

Como direcionamento para futuras pesquisas, recomenda-se o aprimoramento da metodologia proposta, incorporando os requerimentos específicos que foram excluídos por se aplicarem exclusivamente a barragens. No entanto, embora o presente estudo tenha sido direcionado às PDRs, a aplicação da metodologia pode apresentar boa aderência também às barragens. Isso se deve ao fato de que, na fórmula do Índice Global de Riscos, a exclusão de alguns requerimentos não causa variação significativa no valor do  $\alpha g$ , dado o número expressivo de itens avaliados em cada fator de risco.

Adicionalmente, sugere-se a realização de estudos comparativos entre a metodologia proposta e abordagens baseadas no princípio ALARP, especialmente para eventos críticos já ocorridos, dado que estabelecem uma correlação entre investimentos financeiros e a salvaguarda de vidas humanas. Tais comparações podem ser expandidas para outras metodologias semiquantitativas reconhecidas no campo da análise de riscos. Outro ponto relevante de investigação consiste no aprofundamento individual de cada fator de risco, com o objetivo de desenvolver zonas de classificação específicas para cada categoria avaliada, permitindo diagnósticos mais precisos e ações mais direcionadas.

Por fim, recomenda-se aplicar a metodologia em um número maior de PDRs, contemplando diferentes tipos de operação e contextos geográficos, de modo a avaliar seu desempenho frente à crescente demanda por esse tipo de disposição. Essa ampliação permitirá

identificar padrões, fragilidades e oportunidades de melhoria nos processos de gestão de riscos e governança operacional.