

# Classificação de riscos geotécnicos em taludes industriais de uma mina de ferro utilizando a metodologia FMEA

Alisson Carvalho Santos Brasil<sup>1\*</sup> 

## Resumo

A indústria mineral por vezes está associada a efeitos negativos oriundos de problemas geotécnicos como rompimento de barragens, ruptura de taludes e escorregamento de encostas, resultando em degradação ambiental, perdas de vida, gerando a percepção de uma indústria insustentável. Compreender os riscos geotécnicos em todo o ciclo da obra e/ou mina é de suma importância para minimizar perdas financeiras, proteger a reputação e imagem da empresa e evitar acidentes de qualquer natureza. Organizações adotaram sistematicamente técnicas de gestão de riscos que se usado de forma eficaz, pode ser uma ferramenta para a tomada de decisão e direcionamento, no entanto, não é uma panaceia já que há uma clara necessidade e compreensão detalhada da variedade de riscos envolvidos e seus efeitos. A geotecnia é fundamental ao fornecer uma visão abrangente dos riscos operacionais e ao aplicar metodologias de controle para mitigar e eliminar esses riscos. Este estudo realizou um diagnóstico geotécnico de taludes industriais, utilizando a metodologia FMEA, devido a 51 eventos geotécnicos registrados nos últimos quatro anos. O objetivo foi avaliar a condição atual dos taludes e criar uma lista de controles para garantir a segurança operacional. Dos 146 riscos identificados, aproximadamente 11% foram classificados como altos ou muito altos, demandando prioridade em planos de ação, o que resultou na formulação de 55 ações para reduzir esses riscos.

**Palavras-chave:** Riscos; Mineração; Geotecnia; Taludes.

## Classification of geotechnical risks on industrial slopes in an iron mine using the FMEA methodology

## Abstract

The mining industry is sometimes associated with negative effects arising from geotechnical problems such as dam breaks, slope failures and landslides, resulting in environmental degradation, loss of life and the perception of an unsustainable industry. Understanding geotechnical risks throughout the construction and/or mining cycle is of paramount importance in order to minimize financial losses, protect the company's reputation and image and avoid accidents of any kind. Organizations have systematically adopted risk management techniques which, if used effectively, can be a tool for decision-making and steering, but it is not a panacea as there is a clear need for a detailed understanding of the variety of risks involved and their effects. Geotechnics plays a crucial role in providing a comprehensive view of operational risks, using methodologies and control techniques to mitigate, reduce and/or eliminate associated risks. The study developed a geotechnical diagnosis of industrial slopes, due to the recording of 51 geotechnical events over the last four years using the FMEA methodology. The aim was to assess the current condition of these slopes and develop a list of controls to ensure the operational safety of all interfaces. The results indicated that, of the 146 risks identified, around 11% were classified as high or very high, requiring priority in action plans. This resulted in the formulation of 55 actions aimed at reducing these risks.

**Keywords:** Risks; Mining; Geotechnics; Slope.

## 1 Introdução

O termo “risco” origina-se do italiano antigo “risicare,” que significa ousar, e do latim “*risicu*” e “*riscu*” [1]. Nesse contexto, risco refere-se às incertezas encontradas ao ousar,

não apenas como um problema. Segundo a ISO 31000, identificar riscos envolve buscar, reconhecer e descrever as fontes de risco, eventos, causas e potenciais consequências [2].

<sup>1</sup>Pesquisador Independente, Pojuca, BA, Brasil.

\*Autor correspondente: [alisson\\_engh@yahoo.com.br](mailto:alisson_engh@yahoo.com.br)



Riscos não se restringem às atividades controladas, mas também a fatores externos naturais ou humanos. Mesmo que a probabilidade de riscos de grande impacto seja baixa, não deve ser negligenciada [3]. Exemplos notáveis incluem o colapso da barragem de Brumadinho (Vale) e a ruptura da mina de Bingham Canyon (Rio Tinto).

A mineração é uma atividade de alto risco devido às incertezas geológicas, econômicas e políticas, tornando a gestão de riscos um requisito essencial [4]. Normas e códigos foram desenvolvidos após grandes acidentes para fortalecer a cultura de risco, comunicação e treinamento, visando a um sistema de gerenciamento mais eficaz [5]. A gestão de riscos envolve monitoramento periódico das ameaças, identificação e avaliação dos perigos, com o objetivo de reduzir a imprevisibilidade e evitar perdas [6]. Desde a década de 1990, técnicas sistemáticas de gestão de riscos vêm se mostrando eficazes quando adaptadas a cada empreendimento civil e/ou mineiro e sua fase de maturação [7].

Considerando que a mineração sempre foi vista como uma atividade de alto risco, tanto em termos de segurança quanto econômicos, é evidente que a gestão de riscos especialmente os geotécnicos devem ser adotados como procedimento padrão na indústria mineradora. Diversas metodologias são utilizadas para análise de riscos, incluindo métodos qualitativos, quantitativos e probabilísticos, cada uma com sua aplicabilidade e uso específicos [8]. Para este estudo, será adotado o método qualitativo utilizando a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) - Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE), que qualifica os riscos e define os efeitos indesejados a partir da identificação dos modos de falha e seus impactos nos componentes dos sistemas [9].

O FMEA ou simplesmente análise de modos e falhas, é uma metodologia de análise de risco de forma qualitativa e indutiva, que visa identificar e qualificar riscos além de definir os efeitos indesejados através da identificação do

modo de falha, causa raiz e do evento inicial, para identificar causas de falha de um produto/processo por exemplo. Isso possibilita a identificação detalhada dos diferentes modos de falha em diversos ativos geotécnicos, como cavas, taludes de mina, barragens e pilhas de estéril, permitindo uma prevenção mais específica e detalhada. A análise dos modos de falha proposta pelo FMEA seguiu diretrizes que visam identificar os riscos em sistemas, subsistemas e/ou componentes, utilizando critérios consolidados para os possíveis mecanismos de falha, causas e efeitos [10].

Junto ao FMEA, uma ferramenta amplamente utilizada para a gestão e visualização dos riscos no estudo é a matriz de risco (Figura 1). A ferramenta permite uma visualização gráfica resultante da combinação das avaliações de probabilidade e severidade, o que possibilita a visualização das áreas de maior preocupação e orienta a alocação eficiente de recursos para a mitigação [11].

Devido a eventos geotécnicos ocorridos nos últimos quatro anos no local de estudo em que não foram previamente identificados e/ou cuja causa raiz não foi determinada de forma comprovatória, surgiu a necessidade e a atenção de verificar estes eventos de modo sistemático através de metodologia de gestão de riscos.

Desta forma o objetivo do estudo foi descrever e prescrever os riscos de cada um desses ativos em relação aos seus respectivos modos de falha e mapear os principais riscos associados ao negócio na elaboração e recomendações dos planos de ação. Dessa maneira, o estudo utilizará a metodologia FMEA para avaliar os modos de falha e a ferramenta da matriz para gestão das prioridades de cada risco, a fim de realizar um diagnóstico geotécnico em 20 taludes industriais que já apresentaram algum evento geotécnico. Alguns destes taludes são ilustrados na Figura 2, em que do total 13 foram considerados de taludes corte e 7 de aterro. A geologia local desses taludes apresenta, em geral, solo residual de rocha máfica, itabirito friável, solo residual de rocha félsica, saprólito de rocha vulcânica e colúvio. A aplicação desta metodologia permitirá uma

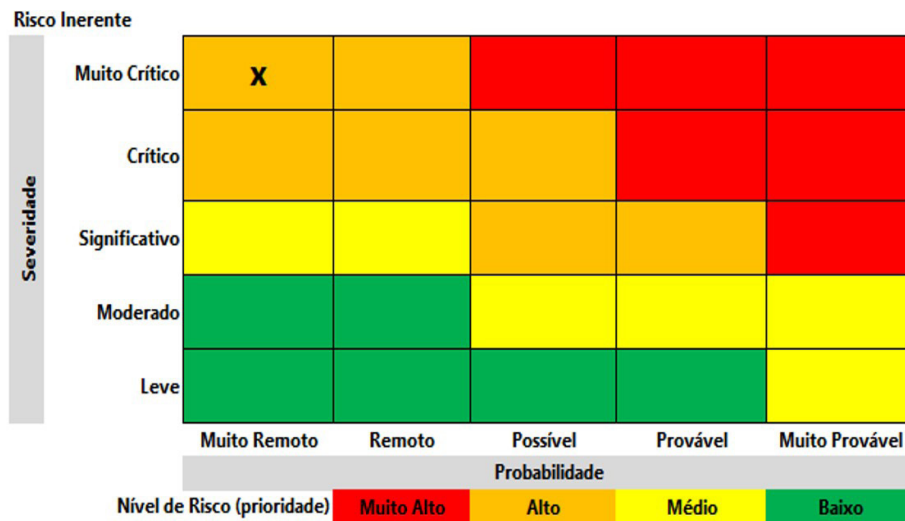
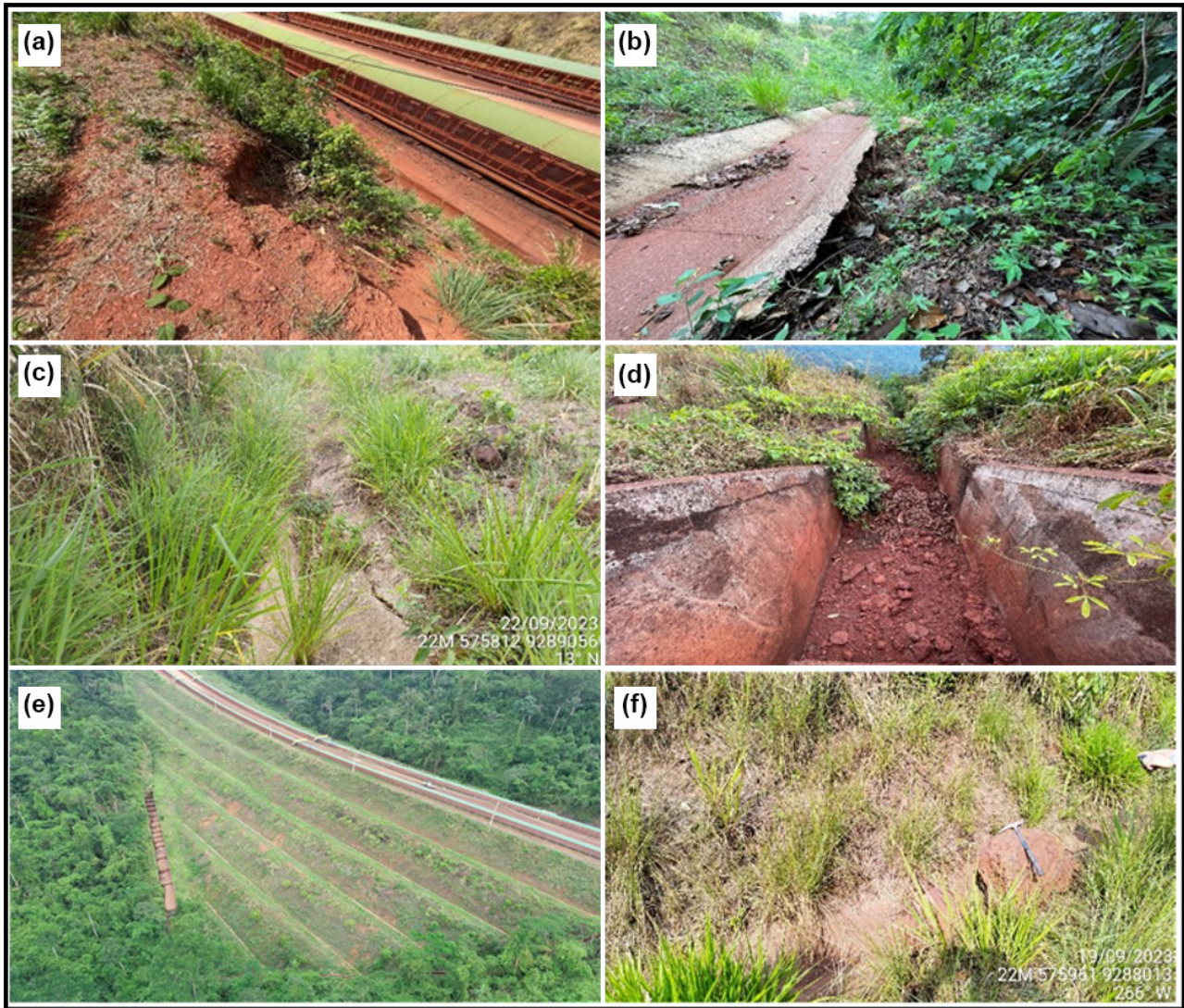


Figura 1. Matriz de risco 5 × 5 para avaliar nível de risco priorizado.



**Figura 2.** Avaliação geotécnica dos taludes industriais (a) Anomalia em talude por processo erosivo; (b) canaleta com necessidade de manutenção; (c) vegetação alta impedindo a verificação de taludes; (d) passagem de água obstruídas; (e) interface dos taludes operacionais com as correias transportadoras de minério; (f) assoreamento do dispositivo de drenagem.

análise detalhada e abrangente dos riscos associados, através da identificação e análise dos modos de falha, além da implementação de ações estruturadas (Figura 1).

## 2 Materiais e métodos

### 2.1 Metodologia

A metodologia resumida empregada neste estudo está ilustrada na Figura 3, que descreve os passos que devem ser seguidos desde o mapeamento geológico/geotécnico e as identificações de anomalias de campo. O fluxograma visa servir para nortear os processos exigidos como boa prática para o sequenciamento da metodologia proposta e suas descrições detalhadas na Tabela 1.

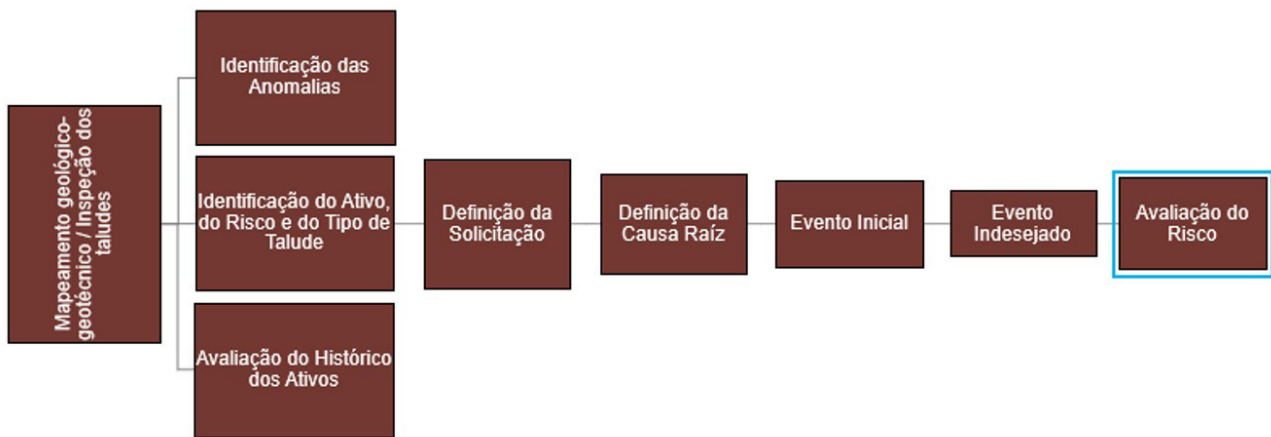
Para a realização da proposta é apresentado um fluxo esquemático de como as variáveis do fluxograma presente pela Figura 3 se combinam, até que se culmina a avaliação do risco e proposta pelo FMEA (Figura 4).

Com base em registros históricos, relatórios internos e boas práticas de unidades similares, foram identificadas as definições de solicitação e eventos iniciais (Figura 5), além das causas raízes (Figura 6). Esses elementos serão utilizados para descrever o modo de falha (PMF). As mesmas variáveis serão detalhadas nos resultados e discussões, a fim de verificar aquelas que oferecem maior compreensão no processo de gestão de risco.

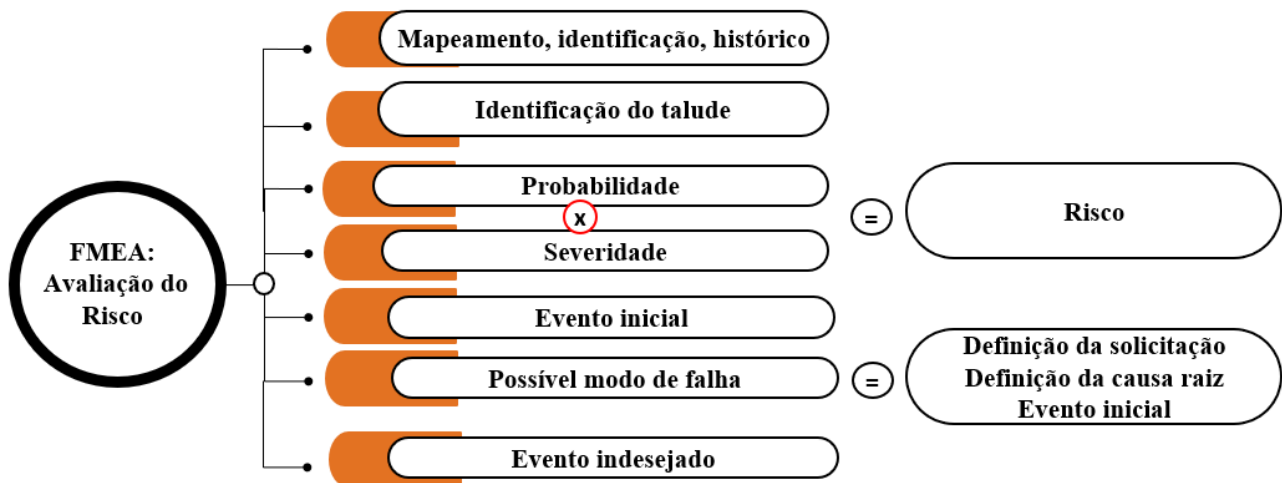
Para determinar o risco e sua prioridade, realiza-se a avaliação combinando as escalas de probabilidade e severidade, juntamente com o evento indesejável analisado. A probabilidade reflete a medida de quão provável é a

**Tabela 1.** Detalhamento do fluxograma proposto para a metodologia do trabalho

Fluxo	Detalhe
Mapeamento geotécnico/inspeções	Verificação geológico/geotécnicos regional e local com avaliação tátil visual (qualitativa)
Mapeamento, identificação, histórico	Verificar histórico dos ativos referentes a problemas, anomalias e eventos geotécnicos (erosões, subsidências, trincas, rupturas etc.)
Identificação do talude	Analisar se o tipo da estrutura (talude de aterro ou talude de corte)
Identificação das anomalias	Deficiência, irregularidade, anormalidade ou mau funcionamento que possa vir a afetar a segurança (drenagem inadequado, erosão, escorregamento, infiltração, recalque, trincas, canaletas obstruídas, empoçamento etc.)
Definição da solicitação	Distinção do tipo de carregamento ao qual está submetida a estrutura (período chuvoso, percolação de água, evento sísmico)
Definição da causa raiz	Referência ao mecanismo de e gatilho da falha, motivado pela solicitação
Evento inicial	Mecanismo de falha e evento iniciador que acarreta o evento indesejado
Evento indesejado	Evento geotécnico de topo (ruptura global, localizada, queda de blocos)
Avaliação do risco	Para cada modo de falha são avaliadas a probabilidade e severidade das suas consequências para pessoas e meio ambiente



**Figura 3.** Fluxograma para avaliação do risco de taludes.



**Figura 4.** Fluxograma para realização e avaliação do FMEA.

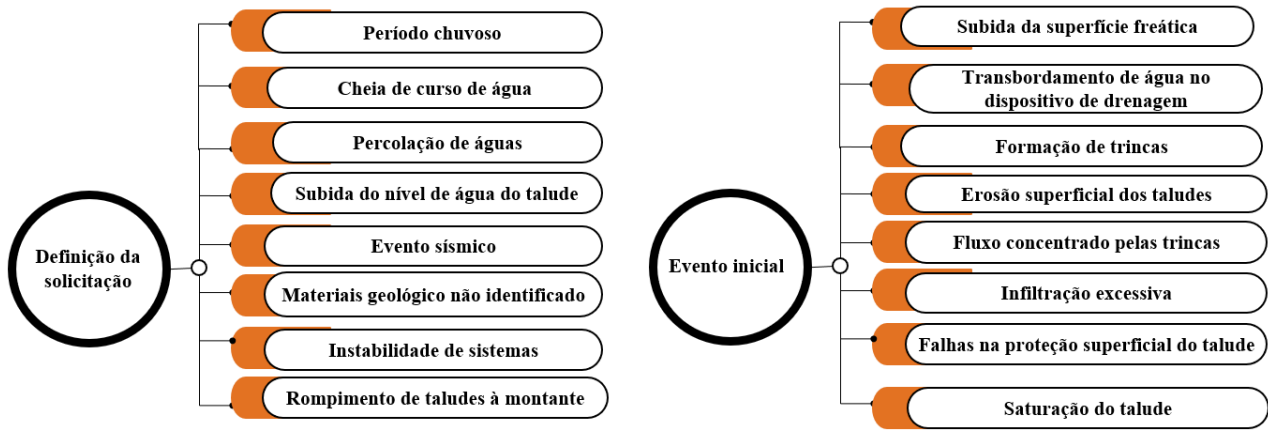


Figura 5. Definições das solicitações e eventos iniciais identificados.

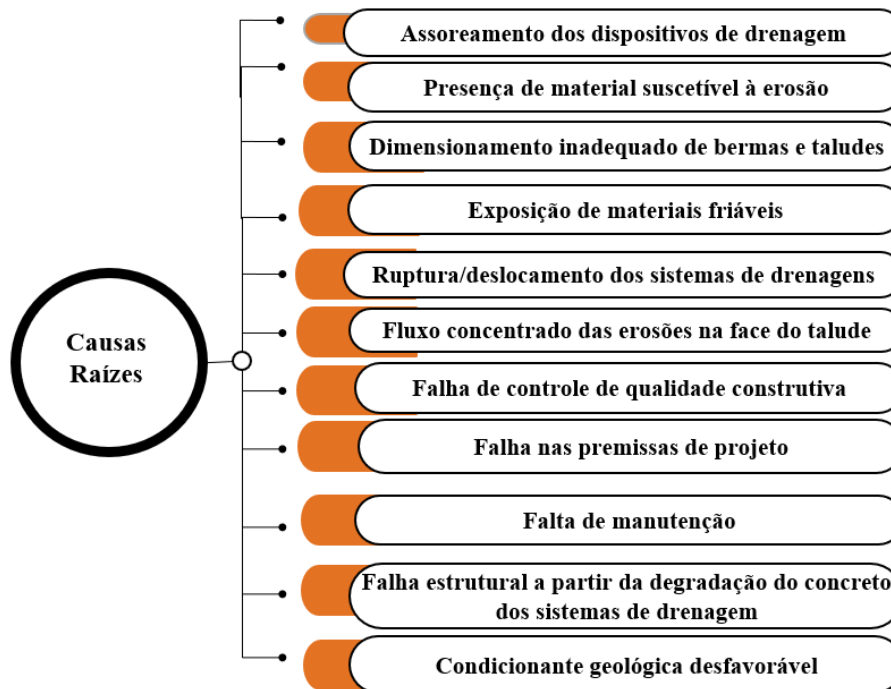


Figura 6. Causas raízes identificadas.

ocorrência do risco que um determinado evento adverso ocorra. A probabilidade é geralmente classificada em níveis, como muito remoto, remoto, possível, provável e muito provável. Esses níveis podem também ser quantificados numericamente em frequências de ocorrência por ano (Tabela 2).

A severidade refere-se às consequências do risco caso venha a ocorrer, ou seja, os danos ou prejuízos que poderiam resultar de sua ocorrência. Nesta avaliação, apenas os impactos negativos foram considerados. A severidade foi avaliada em níveis como leve, moderado, significativo, crítico e muito crítico e consideradas as dimensões de pessoas, meio ambiente e aspectos financeiros. Na dimensão financeira, os impactos foram quantificados em dólares, com base na

produção diária de 225.000 toneladas de minério de ferro e no valor de venda médio anual da tonelada do minério, estipulado em novembro de 2023, utilizando o valor de US\$ 127,68 00 e referência do índice MB65 da MetalBulletin (Tabela 3).

### 3 Resultados e discussões

Com a aplicação da matriz e classificação de risco, foram compilados os 146 riscos identificados pela ferramenta FMEA, resumido ao processo de preenchimento pela Figura 6. Estes riscos foram agrupados na matriz de

**Tabela 2.** Avaliação da probabilidade dos riscos

Probabilidade	Descrição (Histórico)	Frequência
Muito remoto	Nenhum histórico conhecido	1:1.000.000
Remoto	Ocorrência conhecida em outra empresa.	1:20.000/1:4.000
Possível	Ocorrência na empresa, mas nunca ocorrido na unidade.	1:1.000/ 1:400/ 1:80
Provável	Ocorrência nessa unidade uma vez ao ano.	1:40/1:20
Muito provável	ocorrência nesta unidade mais de uma vez por ano.	1:8/ 1:2

**Tabela 3.** Avaliação da probabilidade dos riscos

Dimensão	Leve	Moderado	Significativo	Crítico	Muito crítico
Pessoas	Impacto não mensurável	Primeiros socorros;	Lesões com afastamento de trabalho	Lesões com vida mudada ou 1 fatalidade	Múltiplas fatalidades
Meio Ambiente	Abrangência pontual ou medidas simples de controle	Abrangência local que demanda medidas simples de controle e/ou mobilização de recursos internos	Abrangência adjacente que demanda medidas simples de controle e recursos internos	Abrangência municipal que demanda mobilização de recursos internos e/ou externos	Abrangência municipal/ regional que demanda mobilização de recursos internos e/ou externos
Operação / Financeiro	<= US\$ 100 MM (até 3 dias)	>US\$ 100 MM - US\$ 300 MM	>US\$ 300 MM - US\$ 1 BI	>US\$ 1 BI - US\$ 3 BI	>US\$ 3 BI

						Avaliação de Risco				
Ativo	Tipo da estrutura	Possível modo de falha			Evento Indesejado	Risco Atual				Prioridade do risco
		Solicitação	Causa raiz	Evento inicial (mecanismo)		Probabilidade	Severidade			
							Pessoas	Meio Ambiente	Operacional	
Talude 1	Talude de corte	Período chuvoso	Falha de controle de qualidade construtiva	Formação de trincas	Ruptura global	Possível	Significativo	Leve	Significativo	Alta
Talude 2	Talude de corte	Período chuvoso	Assoreamento dos dispositivos de drenagem	Transbordamento de água	Ruptura global	Muito Remoto	Significativo	Leve	Significativo	Média

**Figura 7.** Realização de matriz FMEA para um dos taludes industriais estudados.

risco 5 × 5, auxiliando na verificação dos riscos de maior magnitude (Figura 7). Observa-se que eventos iniciais, como erosões e formação de trincas, podem potencializar rupturas localizadas e globais. Isso destaca a necessidade de inspeções contínuas e frequentes e a importância de estudar e gerir adequadamente os eventos iniciais muitas vezes datados sem a devida importância. (Figura 8).

O nível de risco demonstrado pela Figura 9, evidencia que 11% dos riscos foram considerados altos ou muito altos, devendo estes ter obrigatoriedade de planos de ação para mitigação de risco conforme a classificação do risco na matriz.

Em relação a variável da solicitação geotécnica é verificado que o período chuvoso apresentou cerca de 94 eventos representando 64% dos principais ofensores encontrados por questão da solicitação geotécnica (Figura 10).

A solicitação do período chuvoso mostra a necessidade da elaboração do plano preparatório de chuva específico a fim de minimizar impactos em virtude da alta precipitação local em períodos chuvosos. Fato evidente que corrobora o efeito do período chuvoso é demonstrado pela Figura 11 em que nos meses que ocorreram os maiores indicadores pluviométricos (Jan/Fev/Mar) foram aqueles que originaram o maior quantitativo de eventos geotécnicos (erosões, subsidências, trincas superiores, queda de blocos),

Houve quatro causas raízes representativas, entretanto questões relacionadas à falta de ações de manutenção, projeto inadequado, foram as que poderiam ter sido evitadas através de ações preventivas e mais adequadas. Destaca-se que as condições geológicas potenciais representaram cerca de 17,1% (condição geológica desfavorável, presença de

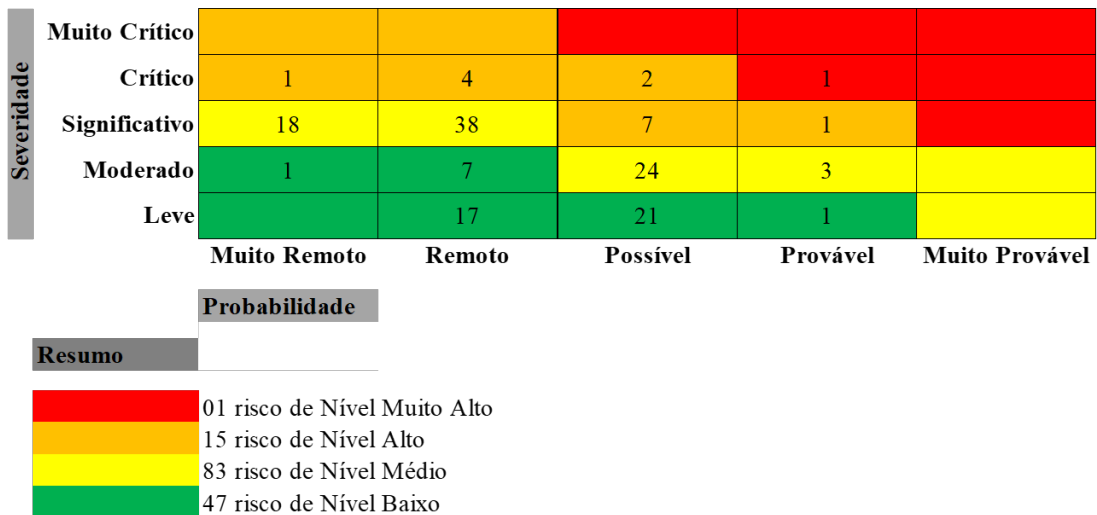


Figura 8. Matriz de risco consolidada para os taludes estudados.

material suscetível a erosão) corroborando que se necessitava de maior antecipação das ações para a redução dos riscos devido a maior quantidade de causas oriundas por falta de algum processo interno (Figura 12).

Os eventos iniciais ficaram centrados nos pilares de processos erosivos, formação de trincas, fluxo pelas erosões nos taludes e saturação do talude ocasionado pelo sistema de drenagem. Destaca-se que retirando a subida da superfície freática evento de cunho não previsível e/ou não-controlado, todos os outros eventos estão relacionados à ação antrópica ou falta de análise antecipada (Figura 13).

Os eventos indesejados, ou seja, aqueles que têm como consequência a segurança operacional, vidas mudadas e reputação, foram também estratificados representando cerca de 70%. O evento indesejado como rupturas localizadas tiveram a maior representatividade (62%) e de queda de blocos com 22% representando 85% dos eventos considerados indesejados (Figura 14).

Com a classificação dos riscos altos e muito altos, foi elaborado um plano de ação para os 17 ativos mapeados, destacando o ativo com maior prioridade de risco, classificado como muito alto. O plano de ação foi desenvolvido com base em necessidades específicas e boas práticas adotadas em outras unidades. Para os riscos altos e muito altos, foram propostas aproximadamente 55 ações. Uma ação significativa foi a elaboração de projeto de estabilização para o único ativo considerado de risco muito alto, o que corrobora o alto risco evidenciado. Observou-se que todos os ativos com risco alto e muito alto careciam de qualquer tipo de monitoramento (prismas, estação total robótica, radar).

A falta de drenagem adequada foi também identificada como uma necessidade crítica, especialmente devido à alta pluviometria em certos períodos do ano, onde a ausência de um sistema de drenagem eficiente é uma das principais causas dos problemas identificados. Além disso, a ausência de monitoramento contínuo para avaliar o comportamento geotécnico ao longo do tempo foi um ponto de destaque.

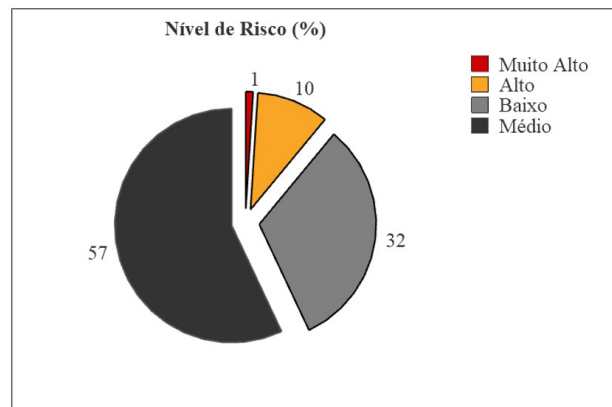


Figura 9. Quantitativo de risco.

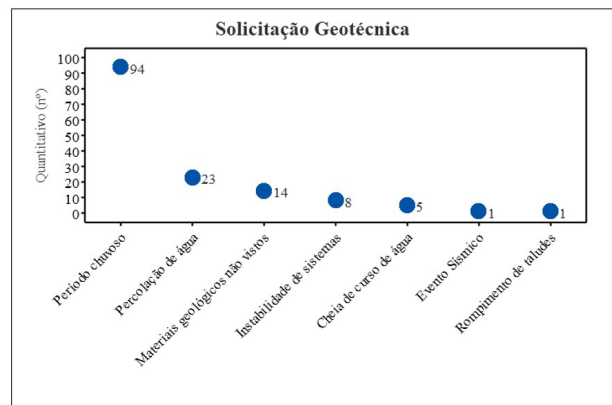


Figura 10. Quantitativo de risco.

Dos 16 ativos classificados com risco alto e muito alto, nove não passaram por nenhuma investigação geotécnica em sua fase conceitual, essencial para entender os parâmetros e definir as melhores soluções para cada caso. Isso pode resultar em problemas no projeto da obra, nos projetos de estabilização e na própria geometria do talude, sendo

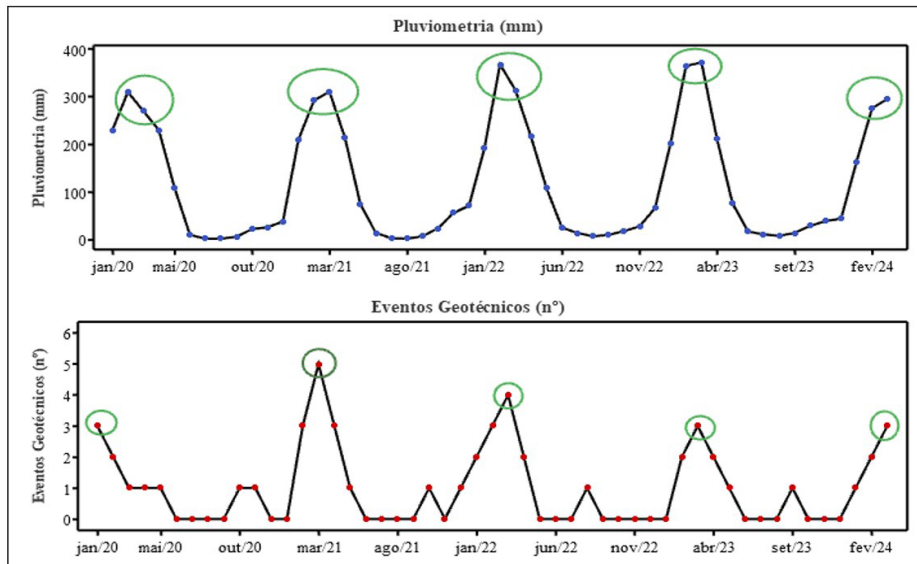


Figura 11. Pluviometria e eventos geotécnicos.

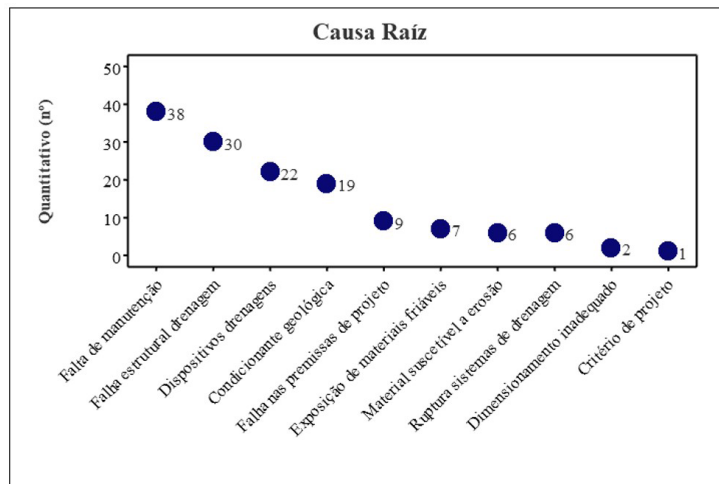


Figura 12. Causas raízes identificadas.

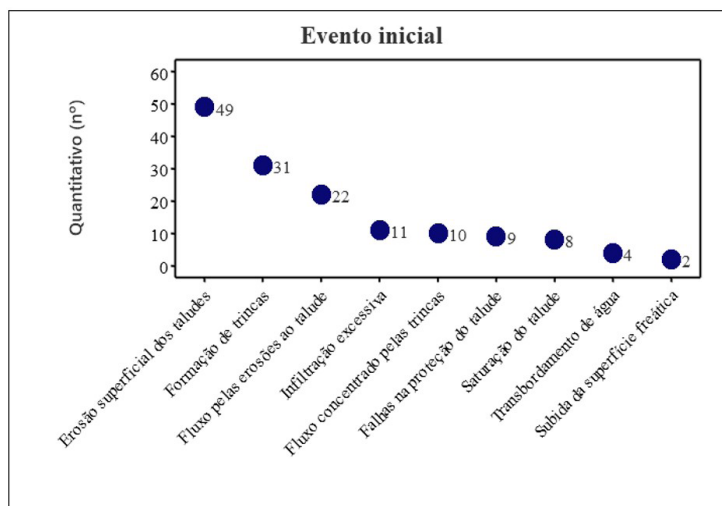


Figura 13. Eventos iniciais identificados.



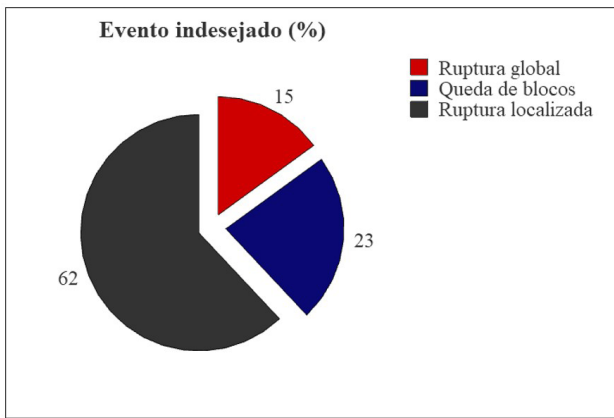


Figura 14. Eventos indesejados.

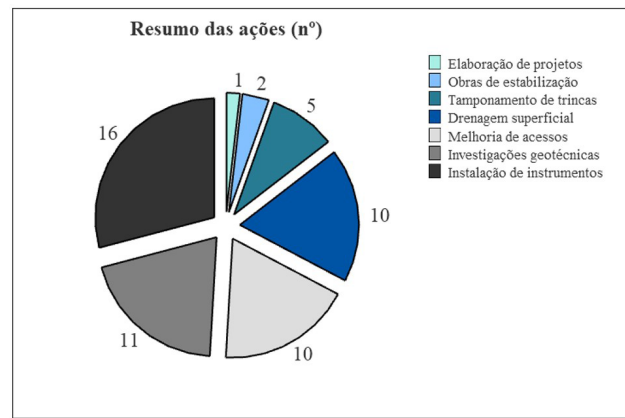


Figura 16. Ações propostas para redução de risco.

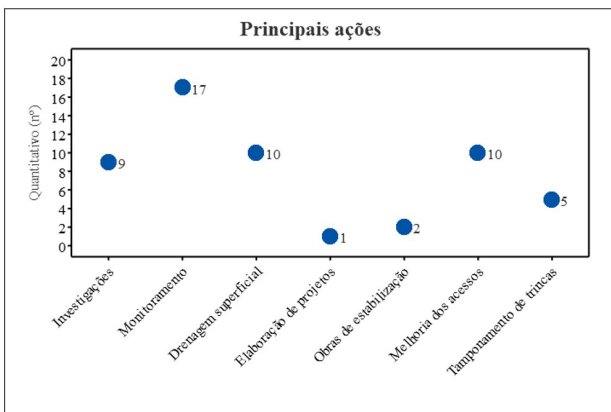


Figura 15. Plano de ação para um ativo com risco muito alto.

a investigação geotécnica uma das principais análises necessárias (Figura 15).

Foram compiladas também o resumo com as ações propostas a fim de reduzir os 16 riscos mapeados como alto e muito alto (Figura 16).

#### 4 Conclusões

A avaliação de risco é essencial em atividades industriais, pois demonstra de forma clara e estruturada o gerenciamento e as medidas de controle necessárias para minimizar os riscos. Isso resulta em menor exposição das pessoas e maior maturidade do negócio. Avaliar riscos significa aumentar a confiança nas operações de uma organização, prevendo, priorizando e identificando eventos indesejados que possam comprometer os recursos humanos, materiais e financeiros da empresa. Assim, desenvolver e fomentar técnicas de eliminação, redução e controle de riscos são cruciais para o desenvolvimento sustentável de uma empresa.

Este estudo validou a importância de se avaliar o risco geotécnico em taludes permanentes através da metodologia FMEA, devido a históricos de eventos geotécnicos nesses locais. A avaliação geotécnica foi realizada em 20 taludes que já apresentaram algum evento geotécnico, potencializando

efeitos maiores como rupturas globais. Foram identificados 146 riscos, dos quais 16 foram classificados como muito altos ou altos, exigindo planos de ação mais rápidos. A metodologia FMEA permitiu a avaliação detalhada dos taludes industriais, consolidando a revisão dos modos de falha, eventos iniciais e causas raízes, que são os principais fatores na análise dos modos de falha resultando em eventos indesejados, como rupturas globais (15%), rupturas localizadas (62%) e queda de blocos (23%).

Observou-se que processos mal gerenciados de drenagem de água e controle de erosão podem provocar rupturas localizadas e globais, além de queda de blocos, aumentando os riscos do negócio. Nos momentos de maior pluviometria, registou-se o maior número de anomalias geotécnicas (trincas, erosões, subsidências, etc.). Dos 51 eventos ocorridos de janeiro de 2020 a fevereiro de 2024, cerca de 35 foram associados ao período chuvoso, especialmente nos meses de janeiro, fevereiro e março.

Em aproximadamente 80% dos casos, chuvas e drenagens pluviais mal direcionadas foram os principais gatilhos para os eventos indesejados. A não antecipação de ações preventivas resultou nos principais riscos identificados como altos e muito altos, como rupturas globais e localizadas, além de queda de blocos. Dos 17 riscos considerados altos e muito altos, 13 foram associados ao período chuvoso, 2 à instabilidade de sistemas de estabilização ou encostas e 1 à ocorrência de estruturas ou materiais geológicos não identificados nas investigações.

O FMEA ajudou a entender os principais modos de falha que causam os principais eventos indesejados já que dos 20 ativos avaliados inicialmente dezesseis apresentaram risco alto e muito alto, o que gera a necessidade da criação de ações estruturadas.

A avaliação de riscos e a seleção de medidas de controle, baseadas em 54 ações estruturadas, priorizando os recursos de acordo com os riscos avaliados. O desenvolvimento e uso de planos de gerenciamento de controle são críticos para a condução segura e lucrativa das operações, fornecendo uma base eficaz para o monitoramento futuro e a revisão do processo geral de gerenciamento de risco desses taludes.

## Referências

- 1 Bernstein L. Desafio aos deuses: a fascinante história do risco. 1ª ed. Rio de Janeiro: Alta Books; 1997. 400 p.
- 2 Salles CAC Jr, Soler AM, Valle JAS, Rabechini R Jr. Gerenciamento de riscos em projetos. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora FGV; 2010. 123 p.
- 3 Assis AP, Francis FO, Rabechini R Jr. Gestão de riscos: empreendimentos complexos. 1ª ed. Curitiba: Editora CRV; 2019. 344 p.
- 4 Baraldi P. Gerenciamento de riscos empresariais: a gestão de oportunidades, a avaliação de riscos e a criação de controles internos nas decisões empresariais. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2010. 360 p.
- 5 Silva TQ. Análise de risco geológico-geotécnico em áreas sujeitas a movimentos de massa [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2016.
- 6 Guimarães RP. Desenvolvimento de um método para o processo de gestão de riscos no planejamento do fechamento de minas [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2012.
- 7 Galante RA. Princípios de gestão de riscos. 1ª ed. Curitiba: Appris; 2015. 155 p.
- 8 Palady O. Towards and educational production function. 1st ed. São Paulo: Iman; 2004. 83 p.
- 9 Bowles S. Fundamentos do ESG: Geração de valor para os negócios e para o mundo. In: Hansen WL, editor. Education, income, and human capital. New York: National Bureau of Economic Research; 1970. p. 9-70.
- 10 Tavares APM. Metodologia de gestão de riscos e barragem de disposição de minério com vistas a fiscalização [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2020.
- 11 Rezende DA. Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeito [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro Ouro Preto; 2013.

Recebido em: 3 Abr. 2024

Aceito em: 12 Set. 2024

Editor responsável: André Carlos Silva 