

Evaluation of different methods of seismic loading and determination of the factor of safety through the finite element method for tailings dams

Avaliação de diferentes métodos de carregamento sísmico e determinação do fator de segurança através do método dos elementos finitos para barragens de rejeitos

Jaime Souza

Earth Sciences and Engineering, Hatch, Brazil, jaime.souza@hatch.com

Cristyane Saraiva e Rafael Dávila

Tailings & Mine Waste, Hatch, Germany and Canada

RESUMO: Após os recentes rompimentos de barragens de rejeito e a implantação do GISTM, a atenção foi voltada a alguns mecanismos de ruptura, incluindo a liquefação induzida pela atividade sísmica. A temática que envolve a escolha do valor da aceleração para aplicação na análise sísmica para as Estruturas de Armazenamento de Rejeito (EAR) implantadas no segmento leste da Plataforma Sul-Americana, tem o seu pilar técnico na NBR 13028. A prática brasileira remete a diversos métodos para determinação da aceleração, já aplicadas em estudos e projetos de engenharia. Assim, o objetivo do artigo é comparar os resultados em termos de fator de segurança (FS) a partir do Método de Elementos Finitos (MEF), aplicando diferentes métodos utilizados em projetos brasileiros para determinação da aceleração. Adicionalmente, o artigo apresenta as variáveis para escolha do valor da aceleração numa região de baixo potencial sísmico, grande número de EAR e as implicações na elaboração dos projetos e para a manutenção da estrutura durante a sua vida útil. Abordagens sobre o tempo de recorrência, mostrarão que essa variável será muito atuante na determinação da aceleração da gravidade, assumindo um fator preponderante na aplicação em projetos de barragens.

ABSTRACT: After the recent tailings dam failures and the implementation of GISTM, attention has been focused on some failure mechanisms, including liquefaction induced by seismic activity. The theme that involves the choice of the acceleration value for application in seismic analysis for the Tailings Storage Structures (TSF) deployed in the eastern segment of the South American Platform, has its technical pillar in NBR 13028. The Brazilian practice refers to several methods for determining acceleration, already applied in engineering studies and projects. Thus, the objective of this article is to compare the results in terms of factor of safety (FS) from the Finite Element Method (FEM), applying different methods used in Brazilian projects to determine acceleration. Additionally, the article presents the variables for choosing the acceleration value in a region of low seismic potential and the implications for the design of projects and for the maintenance of the TSFs during its useful life. Approaches of recurrence time will show that this variable will be very active in determining the acceleration of gravity, assuming a preponderant factor of its application in dam projects.

KEYWORDS: seismic loading, Brazil, finite element method, liquefaction, safety factor.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Visão geral

A implantação do *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM, 2020), que estabelece “uma estrutura para uma gestão segura de estruturas de disposição de rejeitos” informa no seu requisito 2.2, a elaboração, documentação e atualização detalhada das estruturas de disposição de rejeitos, incluindo os dados sobre sismicidade. O estabelecimento deste Padrão Global, converge para uma gestão mais segura das estruturas de disposição de rejeito, apoiada em todo parâmetro que possa ser um deflagrador de instabilidade. A NBR 13028 indica, para as etapas iniciais de estudo, a adoção da aceleração da gravidade proveniente do sismo máximo provável, conforme sugerido pelo *Canadian Dam Association* (CDA, 2019) para análises pseudoestáticas.

É importante e relevante frisar que o Brasil, geologicamente, não é uma região com registros sísmicos constantes e capazes de gerar sistematicamente problemas nas estruturas de armazenamento de rejeito. Deve-se sempre considerar dois fatores importantes quando se busca as causas de rompimentos de barragens de rejeito: como a estrutura foi construída, assumindo um papel relevante o tipo de material, a qualidade construtiva e as condições de operação, onde deve ser observado se o manual de operação está sendo seguido.

1.2 Objetivos e justificativas

O tema apresentado nesse artigo mostra informações provenientes do estudo elaborado para avaliar os projetos que incluíram no seu escopo a análise do carregamento sísmico.

O artigo relata a experiência de aplicação do carregamento sísmico na elaboração de projetos de sistema de Estruturas de Armazenamento de Rejeito (EARs), principalmente barragens, onde as acelerações que representam a sismicidade natural num dado modelo são determinadas por diversos métodos, praticados pelas projetistas no Brasil. Esses diversos métodos implicam em acelerações distintas culminando em diferentes fatores de segurança, que devem estar de acordo com o fator de segurança mínimo, preconizado pela NBR 13028. Para determinação do tempo de recorrência para cálculo da aceleração, segundo o CDA (2019), deve-se indicar a classe da barragem que se refere a condição da população em risco e a estimativa de perdas de vidas. Uma vez determinada a classe da barragem, a probabilidade mínima anual de excedência para o sismo é obtida e pode variar de 1/100 até 1/10.000, para barragens de classe baixa a extrema, respectivamente.

Assim, o artigo vai determinar as acelerações obtidas por 5 métodos distintos e a partir da aplicação destas acelerações num modelo hipotético de uma barragem instalada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, serão verificados os fatores de segurança obtidos.

Apesar da liquefação ser um processo comum a barragens de rejeito e principalmente aventado em discussões, quando trata-se de modelagem com carregamento sísmico, o artigo se restringe a tratar quantitativamente os resultados, mostrando que as mudanças

nos diferentes valores de aceleração podem influenciar o fator de segurança do projeto, visando atender o preconizado na NBR 13028 na região do Brasil que tem mais barragens de rejeito em operação.

1.3 Papel do carregamento sísmico nos recentes rompimentos de barragens no Brasil

Os casos recentes de rompimentos no Brasil evidenciaram que a prática de armazenamento de rejeitos em barragens se mostrava ineficiente do ponto de vista de segurança das estruturas, sobretudo das estruturas mais antigas em operação. Os casos mais emblemáticos e recentes, relatados no Brasil, são de Fundão e da Mina Córrego do Feijão, ambos ocorridos no estado de Minas Gerais.

Em 2015 a barragem de Fundão rompeu despejando 39,2 milhões de m³ de rejeito no vilarejo de Bento Rodrigues, no município de Mariana. Pouco mais de 3 anos após o rompimento da barragem de Fundão, outra barragem se rompia, agora no município de Brumadinho. A barragem da Mina Córrego do Feijão causou a morte de 270 pessoas, soterradas por cerca de 10 milhões de m³ de rejeito.

As detonações periódicas fazem parte do processo de exploração das minas diariamente. Assim, são comuns tremores de pequena magnitude nos arredores das minas. Ao mesmo tempo, embora terremotos maiores sejam raros no Brasil, pequenos terremotos em Minas Gerais são relativamente comuns.

Cerca de 1,5h antes do rompimento de Fundão foram detectados três sismos de magnitudes variando entre 1,8 e 2,6 M_w com epicentro a aproximadamente 2 km da barragem. Assim, concluiu-se que o local sofreu sismos naturais com epicentros próximos a barragem as cargas sísmicas não seriam consideradas normalmente para estruturas com concepção e funcionamento robusto. Porém, devido ao estado frágil que a barragem se encontrava uma avaliação mais detalhada é necessária para avaliar se os sismos aceleraram o colapso da estrutura (Morgenstern *et al.*, 2016).

Segundo o relatório elaborado por Robertson *et al.* (2019), as vibrações registradas no dia do rompimento não possuem características de sismo natural, segundo também avaliado pelas estações sismográficas das Universidades de Brasília e São Paulo. O relatório produzido pelo CIMNE (2021) exclui a hipótese de um carregamento dinâmico, seja por terremotos ou atividades de mineração, como gatilho provável do rompimento.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E SISMOLÓGICOS

2.1 Síntese da Geologia do Quadrilátero Ferrífero

A região do Quadrilátero Ferrífero está localizada no estado de Minas Gerais, na sua porção sul e ocupa uma área de 7000 km², sendo um dos mais importantes distritos minerários do Brasil,

contribuindo também com a extração de ouro e manganês. A região que abrange a capital, Belo Horizonte, tem 22% da população do estado e contribui com 26,8% do PIB estadual.

A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero é dividida em 4 conjuntos maiores: terrenos granito-gnáissicos arqueanos, seqüências vulcanossedimentares arqueanas, seqüências de coberturas sedimentares e vulcanossedimentares proterozóicas e coberturas sedimentares recentes (Baltazar *et al.* 2005). Segundo Dorr (1969) apud Baltazar *et al.* (2005) três importantes períodos de deformação ocorreram na região do Quadrilátero Ferrífero e tem a sua geometria definida por *megadobras sinformes e antiformes, truncadas por cinturões de falhas de empurrão, de direção norte-sul, na sua parte oriental.*

2.2 Sismicidade intraplaca no Brasil e no Quadrilátero Ferrífero

Estudos baseado num catálogo elaborado a partir de dados sísmicos de diversas instituições de ensino e pesquisa, locando os sismos e suas respectivas magnitudes no território brasileiro. A distribuição de zonas sísmicas na margem este da Plataforma Sul Americana não pode ser explicada num simples modelo. Os autores concluíram que as regiões cratônicas apresentam, em geral, magnitudes mais baixas, porém ocorreram registros de magnitude em torno de 5. Nas regiões cratônicas os sismos tendem a ocorrer nas suas bordas ou ao redor das quilhas litosféricas profundas. Embora na proximidade de algumas falhas neotectônicas não apresentam registro de sismos estas regiões aparentam ser mais propensas a registros de sismos, principalmente em áreas a menos de 20 km de distância do epicentro (Assumpção *et al.*, 2014).

A ocorrência de sismos de baixa magnitude, inferiores a 4_{m_b}, é de difícil detecção através da rede sismográfica brasileira. Assim, um histórico desses sismos somente é possível em epicentros a cerca de 50 km do sismógrafo. As Figuras 1 e 2 apresentam os registros de sismos superiores a 3 e a 4 _{m_b}, respectivamente, com destaque na região do Quadrilátero Ferrífero. Fica claro o adensamento de registros sísmicos nessa região, seja pela óbvia ocorrência de sismos como também por ser uma região mais monitorada que as demais. Os sismos de magnitude 5,2 e 6 _{m_b}, ocorridos a 100 e a 300 km de distância, respectivamente, são capazes de gerar acelerações de 0,02g, e em geral não geram risco de ruína para por exemplo, barragens hidrelétricas, que são projetadas para suportar vibrações de até 0,05g. Para eventos com 6 _{m_b}, com ocorrência de 50 e 25 km, são capazes de gerar acelerações horizontais de 0,07 e 0,15g, respectivamente. Os autores ressaltam que um sismo de 6 _{m_b}, com recorrência superior a 45 anos, *deve ser considerado em planos de emergência sísmica, pois não há obras no país capazes de suportar esse tipo de abalo sísmico a pequenas distâncias epicentraís.* Ainda, segundo o autor, os sismos de maior magnitude, registrados no Brasil foram de 6,2, no estado do Mato Grosso e 6,1, no Alto de Vitória Trindade, na porção oceânica perto do estado do Espírito Santo (Lopes & Nunes, 2011).

Madeira *et al.* (2017) tratam sobre significativa atividade sísmica intraplaca no Quadrilátero Ferrífero associada a estruturas de *trend* N-S. Ainda segundo o autor, a implantação da Rede Sismográfica Brasileira, em 2017, registrou 102 eventos sísmicos entre 0,4 e 4,0, na escala Richter.

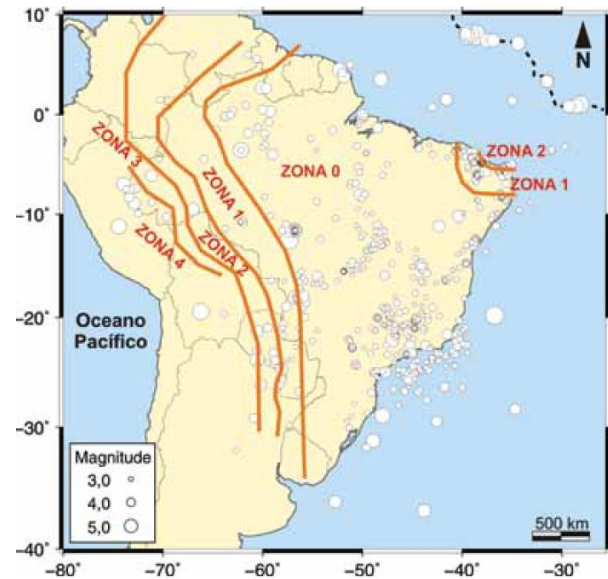


Figura 1. Distribuição dos epicentros de sismos rasos (profundidade menor que 30 km), magnitude maior que 3_{m_b}.

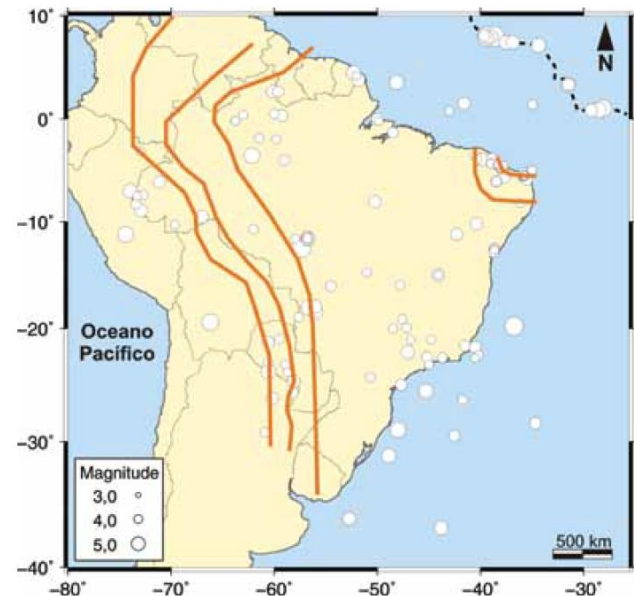


Figura 2. Distribuição dos epicentros de sismos rasos com magnitude maior que 4_{m_b}.

Uma série de eventos sísmicos ocorreram entre os anos de 2014 e 2016 na região do Quadrilátero Ferrífero, incluindo próximo a falha de Bento Rodrigues, próximo a Barragem de Fundão. A causa desses sismos pode ser resultado de reativações de falhas Arqueanas e Paleoproterozoicas no campo de tensão atual que controlam a localização dos epicentros.

3 DETERMINAÇÃO DO MODELO

3.1 Materiais e métodos

Com o objetivo de apresentar a simulação proveniente da análise do carregamento sísmico, reproduziu-se as características comuns de uma estrutura, hipotética, alteada a montante e construída na região do Quadrilátero Ferrífero, que comporta rejeito proveniente da extração de minério de ferro.

O modelo é representado por uma barragem de 700 m de largura, 50 m de altura a uma distância de 50 m da base da barragem até o leito rochoso, com uma inclinação de 3H:1V. O maciço consiste em um dique de partida de 20 m, seguida por 6 alteamentos de 5 m de altura cada. Para o dique de partida e demais alteamentos a largura da crista é de 10 m e sua inclinação a montante é de 1H:1V. A borda livre é de 2 m, sendo que a superfície freática satura a maior parte da seção e está paralela ao talude de jusante da barragem (Figura 3).

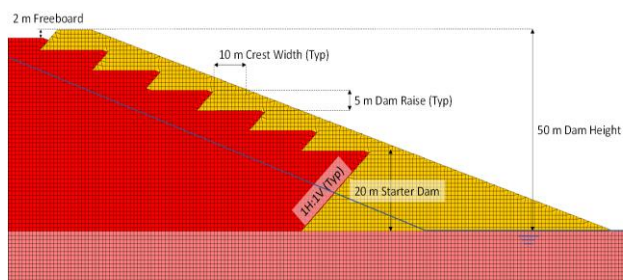


Figure 3. Geometria da barragem utilizada no modelo

A fundação composta por um perfil de intemperismo *in situ* de materiais característicos do Quadrilátero Ferrífero. O material de aterro, para o dique de partida e alteamento, é representado por parâmetros de resistência e rigidez correspondentes ao material silto-arenoso. Para representar o rejeito, adotou-se dados de material gerado a partir da extração do minério de ferro em condições não drenadas.

As análises de estabilidade podem ser, tradicionalmente, realizadas através do método equilíbrio limite ou método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF foi escolhido para entender como se processa a deformação da estrutura com a aplicação do carregamento sísmico, como também obter o fator de segurança. Para a análise através do MEF é necessário que os parâmetros geotécnicos empregados no modelo sejam oriundos do modelo constitutivo Mohr-Coulomb. A Tabela 1 resume as propriedades geotécnicas utilizadas na modelagem da fundação, barragem e rejeitos adotados nas análises. As propriedades foram inferidas a partir das características de materiais da região, incluindo do rejeito.

O modelo proposto será analisado através do programa Plaxis 2D, desenvolvido pela Bentley System, na sua versão 2023.2. O programa utiliza o método dos elementos finitos para analisar problemas geotécnicos em duas dimensões (Bentley, 2023).

Para simular a superfície crítica no Plaxis, realizou-se o procedimento de determinação da estabilidade por redução de resistência.

A estabilidade por redução de resistência é um procedimento onde o fator de segurança é obtido enfraquecendo o solo em etapas em uma análise de elementos finitos elástico-plásticos até que o talude rompa. O fator de segurança é considerado o fator pelo qual a resistência do solo precisa ser reduzida para atingir a ruptura. (Dawson et al., 1999; Griffiths and Lane, 1999).

A análise elasto plástica leva em conta o rendimento do material e a deformação plástica, onde os materiais não recuperam totalmente sua forma original após o carregamento. A magnitude do deslocamento é, conseqüentemente, maior devido à inclusão de deformações permanentes e à resposta não linear do material (Bentley, 2023).

O modelo fornece as cinco (5) opções para condição de contorno: livre, normalmente fixo, horizontalmente fixo, verticalmente fixo e totalmente fixo. Para a modelagem em questão, utilizou-se as seguintes condições: X_{min} : normalmente fixo, X_{max} : normalmente fixo, Y_{min} : totalmente fixo, Y_{max} : livre (Bentley, 2023).

Um solo não drenado do tipo A foi utilizado para o material do rejeito, representando um comportamento em que a rigidez e as resistências são definidas em termos de valores efetivos. Uma grande rigidez à água é automaticamente aplicada para tornar o solo como um todo incompressível, e poropressões excessivas são calculadas, mesmo acima da superfície freática. Para a fundação, dique de partida e alteamentos, utilizou-se um comportamento de material drenado, no qual a rigidez e a resistência são definidas em termos de valores efetivos e não são geradas poropressões em excesso (Bentley, 2023).

A estrutura do modelo no Plaxis foi organizada da seguinte maneira (Bentley, 2023):

1. Fase inicial, configuração e preparação dos parâmetros iniciais do modelo;
2. Fase deformação: cálculo das deformações, onde a poropressão é calculada com base no nível freático;
3. Fase de cálculo do Fator de Segurança: inicia-se a partir da fase de deformação, avaliando a estabilidade do sistema com a inserção da aceleração sísmica e aplicação de cada um dos cinco (5) métodos de estudo.

A análise é realizada com as propriedades de resistência mobilizadas para o ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c), seguida por uma diminuição incremental de $\tan\phi$ (tangente do ângulo de atrito) e coesão. Isso resulta em estados de tensão que violam os critérios de resistência ' c ', que estão resolvidos empregando o mesmo algoritmo iterativo de atualização de tensão usado no Plaxis para um comportamento linear elástico perfeitamente plástico.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos da análise de estabilidade

Propriedades	Fundação	Dique	Alteamento	Rejeito
Modelo Constitutivo		Mohr-Coulomb		
Φ' (°)	35	29	24	25
c' (kPa)	25	5	2	2
γ_{sat} (kN/m ³)	24	22	22	20

γ (kN/m ³)	22	20	20	18
e_o	0,6	0,7	0,7	0,8
Condição	Drenada			Não drenada
E (MPa)	50	45	38	44
K_0	-	-	-	0,5
ν	0,2	0,3	0,25	0,3
$k_x=k_y$ (m/s)	10^{-8}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-6}

3.2 Modelagem sísmica

Duncan (2005) informa que, o procedimento pseudoestático, no qual a carga do terremoto é representada por uma força estática, igual ao peso do solo multiplicado por um coeficiente sísmico, k . A força pseudoestática é usada em uma análise convencional de estabilidade de talude de equilíbrio limite. O coeficiente sísmico pode ser pensado como uma aceleração (expressa como uma fração da aceleração, g , devido à gravidade) que é produzida pelo terremoto. No entanto, a força pseudoestática é tratada como uma força estática e atua em apenas uma direção, enquanto as acelerações do terremoto atuam apenas por um curto período de tempo e mudam de direção, tendendo em certos momentos a estabilizar em vez de desestabilizar o solo. O termo pseudoestático, segundo Duncan (2005) é um nome impróprio, porque a abordagem é, na verdade, uma abordagem estática que é mais corretamente denominada pseudodinâmica; no entanto, o termo pseudoestático tem sido usado por muitos anos e é comum na literatura geotécnica. Os componentes verticais das acelerações do terremoto são geralmente negligenciados no método pseudoestático, e o coeficiente sísmico geralmente representa uma força horizontal.

Por fim, a aplicação de um coeficiente sísmico e força pseudoestática em análises de estabilidade de taludes de equilíbrio limite é relativamente direta da perspectiva da mecânica: a força pseudoestática é assumida como uma força conhecida e está incluída nas várias equações de equilíbrio (Duncan, 2005).

Para determinação do método a serem utilizados para obtenção da aceleração, foram consultados documentos elaborados para construção ou avaliação de projetos nacionais de grandes mineradoras com data de submissão a partir de 2016, nos quais foram analisados 12 (doze) documentos/projetos de nove (9) projetistas diferentes. Não houve diferenciação entre as fases de engenharia dos projetos para esta análise (construção, operação ou encerramento).

Abaixo, são apresentados os métodos utilizados para obtenção da aceleração da gravidade, utilizada como dado de entrada para análises de estabilidade.

A Figura 4 apresenta os dados resultantes da análise dos projetos, quanto aos dados para o carregamento sísmico, associados aos procedimentos praticados no Brasil. Os tópicos são detalhados da seguinte forma:

- a) Principais fontes para obtenção da aceleração de referência (normalmente, PGA);

- b) Coeficientes que foram empregados (e suas combinações) nas análises de estabilidade por equilíbrio limite (horizontal e/ou vertical);
- c) Aplicação de multiplicador da aceleração para o coeficiente sísmico para os principais métodos aplicados para o contexto brasileiro.

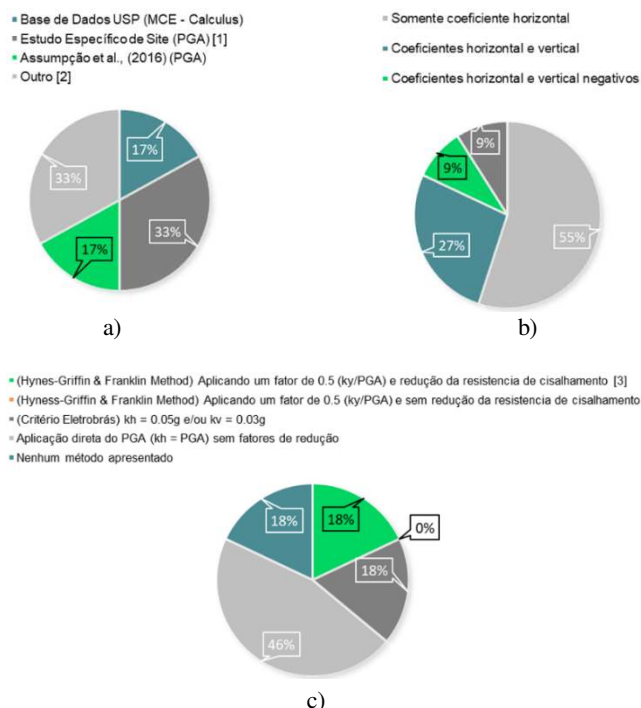


Figure 4. Resultado do levantamento em projetos quanto a aplicação de carregamento sísmico. a) Referência para a obtenção da PGA; b) Coeficientes Sísmicos e c) Multiplicador da aceleração para o coeficiente sísmico.

Os valores da PGA foram obtidos através da determinação classe da barragem hipotética, aqui nesse modelo classificado como alto, gerando uma *annual exceedance probability* (AEP) de 1/2475, de acordo com o método do CDA (2019).

Os dados de PGA utilizados nesse artigo para calcular a aceleração são provenientes do Quadrilátero Ferrífero, somente para o período de retorno de 2475 anos. Esses dados publicados por Cruz *et al.* (2021) apresentou 6 dados de PGA no Quadrilátero Ferrífero variando entre 0,063 e 0,100. Para se obter o valor de PGA a ser aplicado para o carregamento sísmico foi calculada um valor de média simples (Tabela 2).

Local	PGA	Período de retorno
QF1	0,100	2475
QF2	0,065	
QF3	0,063	
QF4	0,070	
QF5	0,070	
QF6	0,076	
Média	0,074	

4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Um modelo MEF estático e pseudo-estático foi elaborado para uma barragem de rejeitos, juntamente com uma análise de deformação dinâmica. O objetivo foi comparar os resultados em termos de FS com simulações numéricas das deformações resultantes da barragem, usando diferentes métodos para obtenção da aceleração.

Com base nas especificidades da estrutura hipotética como: ausência de drenagem interna, elevado nível freático dentro do reservatório e “praia de rejeito” praticamente ausente, com aproximação da linha freática da barragem em análise, a NBR 13028, recomenda a adoção do FS mínimo 1,3 para cenários operacionais extremos, como a operação com rede de fluxo em condição extrema, considerando o nível máximo do reservatório. Diante disso, os resultados demonstram que, sob condições estáticas, a estrutura apresenta o FS de segurança mínimo determinado pela NBR 13208.

Na Tabela 3 abaixo estão os fatores de segurança relacionados aos diferentes carregamentos sísmicos obtidos. Observa-se que, nos métodos em que há redução da resistência ao cisalhamento (Hynes-Griffin e Franklin, 1984) ou quando a aceleração é igual ao PGA, os resultados indicam valores inferiores do FS mínimo exigido pela norma NBR 13028.

Para efeito de comparação, a análise que identifica uma redução de resistência demonstra um impacto no desempenho sísmico geral do maciço da EAR, sendo mais suscetível a deslocamentos e deformações. Essa dinâmica pode provocar um rearranjo das partículas, levando a compressão dos poros e aumentando tanto a poropressão nos rejeitos quando a carga sobre a estrutura.

Tabela 3. Fatores de segurança associados aos carregamentos sísmicos

Método	Aceleração	F.S Mínimo	F.S Obtido
Sem carregamento	-	1,3	1,40
Assumpção <i>et al.</i> (2016)	$k_h = 0,025$	1,1	1,27
Hynes-Griffin (sem redução resistência ao cisalhamento)	$k_h = 0,037$	1,1	1,21
Critério Eletrobrás (2003)	$k_h = 0,05 k_v = 0,03$	1,1	1,19
$K_h = \text{PGA}$	$k_h = 0,074$	1,1	1,06
Hynes-Griffin (com redução resistência ao cisalhamento)	$k_h = 0,037$	1,1	0,99

Dos métodos para obtenção da aceleração que quando aplicados o FS obtido foi maior que o determinado em norma, o de Assumpção *et al.* (2016) apresentou o maior valor. Quando se utiliza a aceleração vertical (Eletrobrás, 2003) o valor do FS é ligeiramente menor que o método proposto por Hynes-Griffin e Franklin (1984), sem redução da resistência e somente aplicando a aceleração horizontal. A única situação em que ocorre falha na

estrutura com aplicação do carregamento sísmico, ou a sua iminência é quando há redução da resistência, através do método de obtenção da aceleração proposto por Hynes-Griffin e Franklin (1984).

Além disso, é importante ressaltar que o nível freático exerce uma influência significativa na estabilidade da barragem, especialmente em situações de carregamento dinâmico. Variações no nível freático podem afetar diretamente a distribuição de cargas e pressões no maciço da barragem, impactando assim na segurança da estrutura. A relação entre a distância da linha freática do barramento e a sua estabilidade deve ser considerada de forma criteriosa na elaboração e operação das EARs.

Por fim, é essencial analisar as deformações resultantes dos diferentes carregamentos sísmicos. Inicialmente, na condição geoestática sem aceleração sísmica, são observadas deformações mínimas, representando a fase inicial. As deformações decorrentes de cada método distinto de carregamento sísmico são cerca de 50% superiores, da deformação sem carregamento sísmico, quando comparados aos métodos de Assumpção *et al.* (2016) e Hynes-Griffin (sem redução resistência ao cisalhamento). Quando se compara a deformação sem carregamento sísmico com a aceleração correspondente a $K_h = \text{PGA}$ a deformação da estrutura duplica. As Figuras 5 a 10 representam as deformações, com uma escala que permite visualizar as variações nas dimensões da estrutura em resposta aos diferentes carregamentos sísmicos e apresentado os fatores de segurança correspondentes a cada situação analisada.

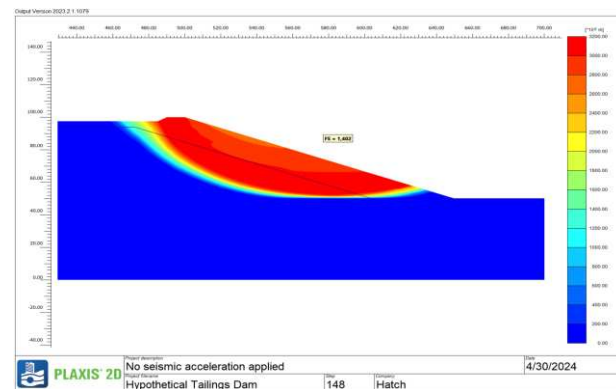


Figure 5. Análise MEF sem carregamento sísmico o FS obtido foi de 1,40.

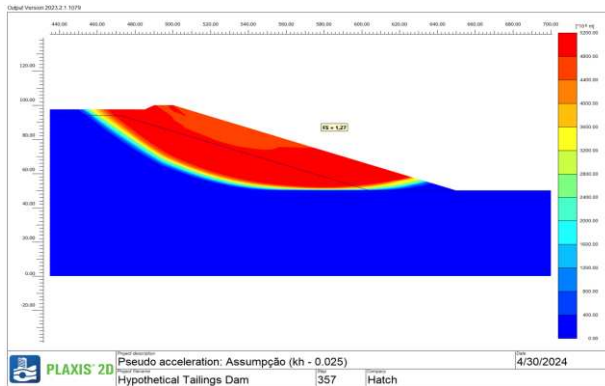


Figure 6. Análise MEF com carregamento sísmico, segundo Assumpção (2016), sem redução de resistência o FS obtido foi de 1,27.

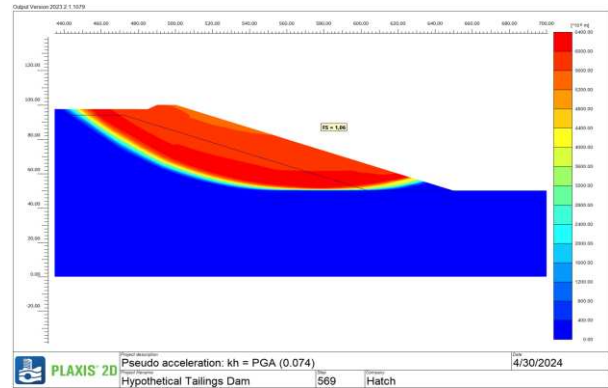


Figure 9. Análise MEF com carregamento sísmico, assumindo que $K_h = \text{PGA}$, sem redução de resistência o FS obtido foi de 1,06.

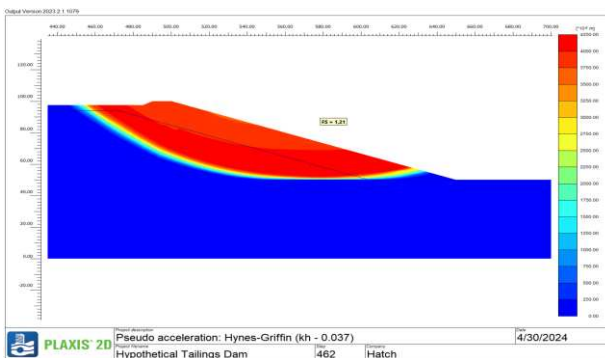


Figure 7. Análise MEF com carregamento sísmico, segundo Hynes-Griffin e Franklin (1984), sem redução de resistência o FS obtido foi de 1,21.

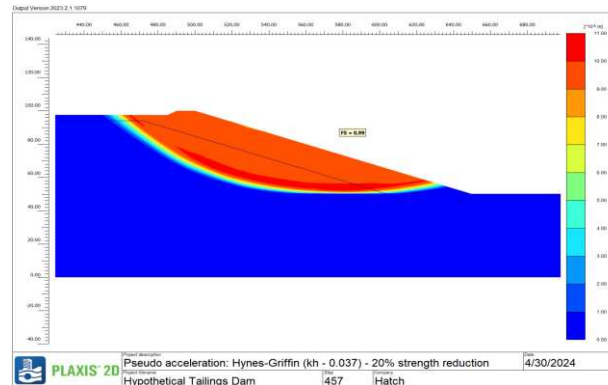


Figure 10. Análise MEF com carregamento sísmico, segundo Hynes-Griffin e Franklin (1984), com redução de resistência o FS obtido foi de 0,99.

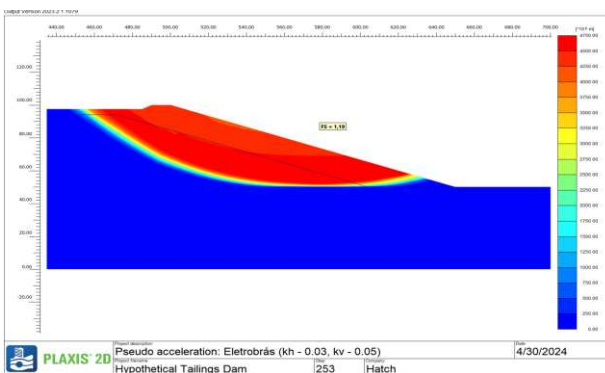


Figure 8. Análise MEF com carregamento sísmico, segundo Critério Eletrobrás (2003), sem redução de resistência o FS obtido foi de 1,19.

5 CONCLUSÕES

O GISTM é um importante marco para a implantação e gestão de EARs mais seguras. Apesar da questão sísmica ser tratada de maneira generalizada a sua menção a coloca como um importante item, principalmente pela participação das mineradoras na construção do padrão global da indústria mineral. Um impacto direto e esperado para após os rompimentos de Fundão e Córrego do Feijão foram medidas judiciais, como a descaracterização de barragens construídas a montante. Durante a elaboração de alguns projetos de descaracterização o carregamento sísmico, natural e induzido, foi tratado detalhadamente, porém não estudado na sua gênese, quando das causas naturais dos sismos. A importância do entendimento das causas embasadas no conhecimento geológico é um fator determinante para apurar e detalhar as regiões sísmicas homogêneas, numa visão para elaboração de projetos conceituais. O Quadrilátero Ferrífero é um dos locais mais destacados para apurar o conhecimento geológico e associar as principais estruturas aos sismos, pois como outros distritos minerários do Brasil e do mundo, são profundamente estudados e detalhados. Por

consequência, também esses distritos minerários são os que possuem numerosas EARs, também em âmbito mundial.

A importância de associar os sismos, mesmo de baixa magnitude a atuação nas estruturas no tempo, deve ser avaliada. O fato que ao longo do tempo de operação as estruturas vêm sofrendo com o carregamento sísmico e as mesmas podem não ter sido projetadas adequadamente e os pequenos sismos podem causar instabilidade a longo prazo. O controle tecnológico muitas vezes inexistente na construção de barragens e pilhas é uma regra empregada contratualmente em projetos rodoviários e ferroviários ou de infraestrutura em geral, assim como os registros pós-obra, como o *as-built*, também praticamente inexistente nos projetos de EARs.

De um ponto de vista sismológico, uma melhoria da cobertura da rede RSBR melhoraria a estimativa dos parâmetros de origem para pequenos sismos e levaria a uma compreensão mais profunda das suas origens e causas, e a uma melhor avaliação do risco sísmico neste caso (Agurto-Detzel *et al.*, 2016). O artigo de Cruz *et al.* (2021) apresenta um dado que aponta que por vezes a PGA apontada por Assumpção *et al.* (2016) baseada na Figura 11 alcança o dobro do valor de uma PGA real, como pode ser visualizado na Tabela 4.

Tabela 4. PGAs calculados para período de retorno de 2475 anos e inferidos por Assumpção (2016).

Local	PGA _{real}	PGA Assumpção (2016)	Período de retorno
QF1	0,100	0,170	2475
QF2	0,065	0,170	
QF3	0,063	0,170	
QF4	0,070	0,160	
QF5	0,070	0,160	
QF6	0,076	0,170	
Média	0,074	0,167	

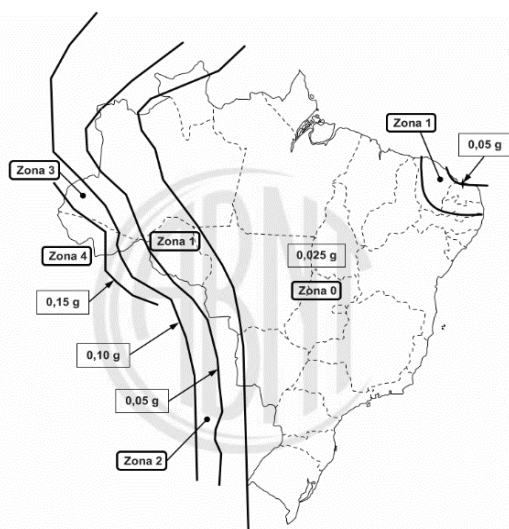


Figura 11. Zonas de acelerações sísmicas – Terrenos classe B (rocha), segundo NBR 15421.

Compreender onde e como se processa o carregamento máximo é essencial para garantir a integridade da barragem e para desenvolver estratégias de mitigação de riscos eficazes. Essa análise detalhada das deformações é fundamental para a avaliação completa da estabilidade da estrutura em cenários dinâmicos.

Assim, a avaliação do método pseudo-estático, como método descrito para entendimento do comportamento das EARs deve ser revisto. A revisão da norma NBR 13208 que versa sobre a avaliação da sismicidade é essencial para implantação de um método eficaz para a quantificação correta das deformações e do fator de segurança adequado para cada região no Brasil que tenha uma elevada concentração de EARs.

Os métodos estatísticos para prever fenômenos naturais apresentam um embasamento coerente e fundamentando em boas práticas. Mas um fato notório é que os sismos têm um registro histórico cada vez mais denso e concentrado nos grandes centros mineradores. Entende-se que a eficácia dos métodos estáticos para determinação do período de retorno deve ser revistos e aplicado uma aceleração igual a PGA. Essa informação deve ser amparada pelas estações sismográficas e atualizadas sempre quando se tem registros superiores aos sismos já documentados. Assim, recomenda-se também sempre uma reavaliação dos projetos e medidas para alcançar o fator de segurança mínimo quando níveis maiores de PGA são medidos. Entende-se que para regiões intraplacas como o Brasil, a redução da resistência junto com a aplicação da aceleração não deve ser praticada, uma vez que está se penalizando duas vezes o projeto.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Vale por autorizar a publicação dos dados do estudo sobre Avaliação de Ameaças Sísmicas e Diretriz de Desempenho de Carregamento Sísmico para EARs.

A Hatch Engenharia pelo apoio na elaboração, publicação e apresentação deste artigo.

A Bentley pelo apoio na elaboração do modelo e na interpretação dos resultados através do programa Plaxis.

7 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2006. Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – procedimento, NBR 15421, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2017. Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos, NBR 13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Assumpção, M. de S. *et al.* 2016. Terremotos no Brasil: preparando-se para eventos raros. Boletim SBGf, n. 96, p. 25-29.

ASSUMPÇÃO, M. *et al.* 2014. Intraplate seismicity in Brazil. In: P. Talwani. (Org.). Intraplate earthquakes. 1ed. Cambridge. Cambridge University Press, v. 1, p. 50-71.

Bentley. 2023. General Information Manual. PLAXIS.

Baltazar, O.F.; Baars F.J.; Lobato, L.M.; Reis, L.B.; Achtschin, A.B.; Berni, G.V.; Silveira, V.D. 2005. Mapa Geológico na Escala 1: 50.000 com Nota Explicativa. In: *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Lobato et al. CODEMIG. Belo Horizonte.

Canadian Dam Association (CDA). 2019. Revision to Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams. CDA, Toronto. 61 p.

Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE). 2021. Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijão mine in Brumadinho Final Report. Report, UPC (Universidad Politécnica de Catalunya), Catalunya, 561 p.

Cruz, F. V. A. de S., Matarazo, F. Y., Faria, L. G., Bretas T., Riul, M. 2021. Estimativa do Pico De Aceleração Sísmica (PGA) Para Barragens de Rejeito no Brasil. Revista Brasileira De Engenharia De Barragens, Comitê Brasileiro De Barragens, Ano VII, Vol. 11, P. 125 a 131.

Dawson, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A. 1999. Slope Stability Analysis by Strength Reduction, *Geotechnique*, 49(6), 835-840

Dorr II, J. v. N., 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS. Prof. Paper, 641-A, 110 pp, Washington.

Duncan, J. M.; Wright, S. G., 2005, Soil Strength and Slope Stability. 1ed. Hoboken: John Wiley & Sons.

Eletrobras. 2003. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas S.A.

Global Industry Standard on Tailings Management – GISTM. 2020.

Griffiths, D.V. and Lane, P.A. 1999. Slope Stability Analysis by Finite Elements, *Geotechnique*, 49(3), 387-403

Hynes-Griffin M. E., Franklin A. G. 1984. "Rationalizing the seismic coefficient method", Miscellaneous Paper GL-84- 13, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 21 pp.

H. Agurto-Detzel, M. Bianchi I, M. Assumpção, M. Schimmel, B. Collaço, C. Ciardelli, J. R. Barbosa, and J. Calhau. 2016. The tailings dam failure of 5 November in SE Brazil and its preceding seismic sequence.

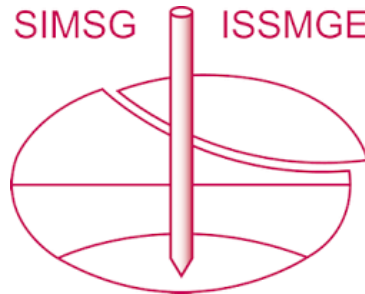
Lopes, A. E. de V.; Nunes L. C. 2011. Intensidades sísmicas de terremotos: formulação de cenários sísmicos no Brasil. IN: Revista USP, São Paulo, n. 91, p. 90-102, setembro/novembro.

Madeira T. J. A., Borges A. J. (*in memoriam*), Endo I, Barbosa M. S. C. 2017. Sismicidade intraplaca no quadrilátero ferrífero. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto Geosudeste, Diamantina.

Morgenstern N. R; Vick S. G; Viotti C. B; Watts B. D. 2016. Fundão Tailings Dam Review Panel - Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam, p. 88.

Robertson et al., 2019 Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão Apêndice I – Análise Sísmica.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.