

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

PROPOSTA DE FORMULAÇÃO PARA OS PARÂMETROS DE FORMAÇÃO DA BRECHA EM ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO

Adolfo Pedro de Resende ¹

Abstract: This study focuses on the critical issue of tailings dam failures, which result in large-scale environmental, social, and economic damages, including loss of human life. The research aims to improve the understanding of the dam breach process by comparing historical cases of tailings dam failures with calculated values derived from Froehlich's (2016) formulation. Unlike water dams, tailings dams exhibit distinct behaviors due to the material properties of the stored waste, necessitating tailored approaches for breach parameter estimation. The study reviews existing literature, highlighting the limitations of current formulations, which often isolate specific dam characteristics rather than considering them holistically. A methodology involving the least squares method is employed to adjust equations for determining breach width, slope inclination, and formation time, using data from 23 historical cases. The proposed equation for average breach width incorporates dam height, downstream slope inclination, and mobilized volume, achieving a determination coefficient of 0.902. Comparative analysis with Froehlich's formulation demonstrates the superior accuracy of the proposed model. Results indicate that tailings dam breaches tend to form rectangular shapes with shorter formation times compared to water dams. The study underscores the influence of reservoir material properties on breach geometry and emphasizes the need for improved parameter definitions in tailings dam failure studies. The findings contribute to advancing breach modeling and risk assessment.

Resumo: Este estudo aborda o crítico problema de rupturas de barragens de rejeitos, que causam danos ambientais, sociais e econômicos em larga escala, incluindo perda de vidas humanas. A pesquisa busca aprimorar a compreensão do processo de formação de brechas, comparando casos históricos de rupturas de barragens de rejeitos com valores calculados a partir da formulação de Froehlich (2016). Diferentemente das barragens de água, as de rejeitos apresentam comportamentos distintos devido às propriedades dos materiais armazenados, exigindo abordagens específicas para estimar parâmetros de brecha. O estudo revisa a literatura existente, destacando as limitações das formulações atuais, que frequentemente isolam características específicas das barragens em vez de considerá-las de forma integrada. Uma metodologia baseada no método dos mínimos quadrados é empregada para ajustar equações que determinam a largura média da brecha, a inclinação dos taludes e o tempo de formação, utilizando dados de 23 casos históricos. A equação proposta para a largura média da brecha incorpora a altura da barragem, a inclinação do talude de jusante e o volume mobilizado, alcançando um coeficiente de determinação de 0,902. A análise comparativa com a formulação de Froehlich demonstra a maior precisão do modelo proposto. Os resultados indicam que as brechas em barragens de rejeitos tendem a assumir formatos retangulares, com tempos de formação menores em comparação às barragens de água. O estudo ressalta a influência das propriedades do material do reservatório na geometria da brecha e enfatiza a necessidade de melhorias na definição de parâmetros para estudos de ruptura de barragens de rejeitos. As conclusões contribuem para avanços na modelagem de brechas e avaliação de riscos.

Palavras-Chave – Barragem de rejeito, ruptura de barragens, proposição de formulação

1) WSP Australia, Tower 2 Mia Yallagonga, 5 Spring street, Perth 6000. adolfo.resende@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A ocorrência de eventos de ruptura de barragens gera prejuízos em grande escala, tanto em aspectos ambientais, sociais, econômicos e perda de vida humana, assim o desenvolvimento de estudos para melhor entender o processo de ruptura de barragens é importante para que estudos mais robustos possam ser realizados e, conseqüentemente, definir ações mais efetivas, caso um evento dessa magnitude venha a acontecer.

Um estudo da ruptura hipotética de uma barragem deve ser dividido em etapas. Primeiramente avalia-se a evolução da brecha, após essa avaliação é preciso estimar o hidrograma de ruptura resultante, o qual deve ser propagado para jusante, permitindo, assim, estimar o potencial da cheia decorrente da ruptura.

A determinação dos parâmetros de brecha é um dos pontos mais críticos em um estudo de ruptura de barragens, pois as formulações apresentadas atualmente não levam em consideração todas as particularidades das barragens analisadas, como, por exemplo, a variação da altura e do volume, tipo de barragem, formato do reservatório, material presente no reservatório, no caso das barragens de rejeito ou assoreadas e demais características das estruturas elencadas na literatura. A grande parte das formulações apresentadas atualmente na literatura tratam características isoladas das estruturas, por exemplo, ou somente volume e altura, ou material de formação do maciço, ou do material presente no reservatório, ou seja, não avaliam as características de forma conjunta.

Para barragens de rejeito o comportamento do material possui impacto direto na formação da brecha, diferentemente das barragens de água. A grande parte da formulação das formulações de parâmetros de formação de brecha fio desenvolvida utilizando casos históricos de barragem de água, assim sua utilização para barragens de rejeito precisa ser analisada com cautela. Nesse trabalho será apresentada uma comparação entre casos históricos de ruptura de barragens de rejeito e os valores calculados de acordo com a formulação apresentada por Froehlich (2016).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários autores apresentaram diferentes formulações para os parâmetros de formação de brecha, mas mais voltada para as barragens de água.

Visando a verificação de outras características que podem influenciar no desenvolvimento da brecha Chang & Zhang (2010) fizeram um modelo que simula a ruptura de uma barragem por galgamento considerando a variação da erodibilidade do maciço ao longo da altura do maciço. Ainda nesse campo Chang et al. (2011), indicam que a erodibilidade dos solos sem coesão é controlada principalmente por forças gravitacionais e parâmetros do solo. Já em solos coesos, as propriedades mais importantes do solo são: a densidade do solo, distribuição granulométrica, teor de argila, plasticidade do solo, teor de umidade antecedente, grau de compactação, razão de dispersão do solo e composições químicas da água. Chen et al. (2019), com base em um estudo para avaliação de um modelo para rupturas causadas por piping, indicaram que a erodibilidade do solo e a posição inicial do piping possuíam grande influência no resultado de vazão de pico encontrado.

Ainda verificando a influência das características do maciço, Dhiman & Patra (2018) desenvolveram um estudo para determinação do equacionamento dos parâmetros de formação de brecha a partir das características do material do maciço; de forma específica foram avaliados 13 maciços com composições diferentes. Os resultados encontrados apontaram que o tamanho do diâmetro médio de composição do maciço é o principal fator que influencia na geometria final da brecha, bem como na vazão de pico da ruptura.

Analisando outras características que podem influenciar nesse tipo de estudo Hooshyaripor et al. (2017) verificaram qual a influência do volume e tamanho do reservatório e sua inclinação para determinação de hidrogramas de ruptura. Foi encontrado que reservatórios com uma menor inclinação, ou seja, mais planos, acabam resultando em hidrogramas com maior magnitude.

Diante das incertezas inerentes ao processo de formação de brecha Zhang et al. (2015) utilizaram uma análise bayesiana a partir das variáveis: altura da barragem, altura de água no momento da ruptura, capacidade total de armazenamento do reservatório e volume de água acima do fundo da brecha para definição da largura média e de topo da brecha, altura da brecha, tempo de formação e vazão de ruptura. Peter et al. (2018) fizeram análise similar, apenas adicionando a taxa de erosão do maciço. Froehlich (2016) propôs uma metodologia para definir os parâmetros de formação da brecha dentro de uma faixa de 95% de chance de ocorrer; dessa maneira pode haver uma diminuição na incerteza para determinação dos parâmetros de formação da brecha. O autor analisou 111 casos históricos de ruptura e realizou uma análise estatística, diferenciando-se assim dos estudos anteriores disponíveis.

Ainda buscando formas de avaliação da sensibilidade e demonstrando as incertezas no processo de geração dos parâmetros de formação de brecha, Albu et al. (2020) fizeram um estudo considerando vários cenários com variação da largura da brecha, contudo utilizaram o tempo de formação da brecha constante para todos os cenários (1 hora). Os autores encontraram grandes diferenças entre os resultados obtidos.

Complementarmente pode-se citar que as barragens com reservatórios para acúmulo de rejeitos e água se comportam de formas distintas, gerando brechas que podem apresentar grandes diferenças entre si, mas mesmo assim ainda são utilizadas as formulações definidas para barragens de água em estudos de ruptura de barragens de rejeito, por exemplo. Com relação às barragens de rejeito, podem ser considerados dois tipos de ocorrência de volume de saída, sendo um caracterizado por alta viscosidade do rejeito e outro com altos volumes de água dentro dos seus reservatórios (PIRULLI ET AL., 2017).

De forma geral existem estudos desenvolvidos para avaliação de casos históricos de ruptura de barragens de rejeito ocorridos no Brasil e no mundo, além das publicações já apresentadas podemos indicar: Rocha (2015), Machado (2017), Llano-Serna et al. (2017) e Glotov et al. (2018). Os primeiros realizaram estudos de estruturas localizadas no Brasil, enquanto o penúltimo foi da barragem Mont Polley, localizada no Canadá e o último da barragem Karamken, localizada na Rússia.

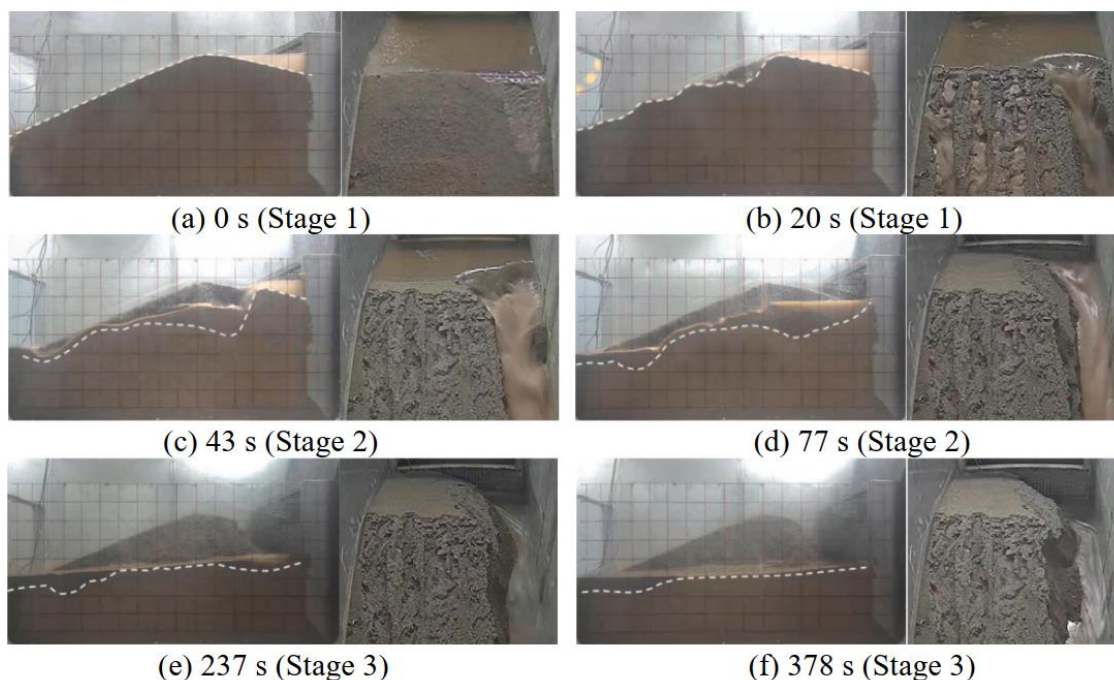
Islam & Murakami (2021) realizaram um levantamento de rupturas de estruturas de contenção de rejeito e verificaram a existência de 366 incidentes ocorridos no período de 1915 a 2020, obtendo uma média de 3,45 ocorrências por ano. Lin et al. (2022) avaliaram 342 casos de ruptura de barragens de rejeito e identificaram as causas e distribuição regional de ocorrência dos eventos. Os autores chegaram a uma média de 4,4 acidentes por ano, considerando o período de 1947 a 2021.

Yao et al. (2020) realizaram testes com a variação do tamanho da partícula do rejeito presente em estruturas de contenção e observou que essa é uma característica que modifica desde o modo de falha da estrutura como nos resultados de vazão e duração do evento de ruptura. Tian et al. (2021) realizaram dois experimentos, forçando o galgamento, modificando a concentração de areia no material do reservatório para avaliação da evolução da ruptura. A conclusão dos autores indica que a maior concentração de areia resulta em vazão e profundidade de sedimentos a jusante.

Mei et al. (2022) indicam a dificuldade de geração de modelos físicos para verificar a formação da brecha, assim propuseram um teste em centrífuga geotécnica para investigar o processo de galgamento de barragens de rejeito. Foram retiradas amostras de uma barragem de rejeito em Dangtu

County, localizada na China. Foram avaliadas 6 posições para início da brecha e foram retiradas 39 amostras da estrutura para caracterização do material e desenvolvimento do experimento. O processo de desenvolvimento da brecha foi dividido em 3 estágios, sendo: início da passagem pela crista da barragem, desenvolvimento da brecha em si causado pela erosão e geração do pico da vazão de ruptura e por fim a diminuição da taxa de erosão e do nível no reservatório, findando com o final da brecha. Na Figura 2 está apresentada a evolução da brecha para uma das situações do experimento.

Figura 2 - Evolução para uma das disposições da brecha no experimento.



Fonte: (Mei et al. 2022).

Zhou et al. (2022) realizaram experimentos de campo para verificação do desenvolvimento da brecha para os processos de galgamento e combinação entre galgamento e erosão interna. Os autores concluíram que o processo combinado leva a resultados mais catastróficos.

Rana et al. (2022) analisaram dados de construção e ruptura de estruturas de contenção de rejeitos desde o período de 1965 a 2020. Os autores indicaram a dificuldade de obtenção de informações sobre as estruturas. Apesar dos mesmos indicarem que houve uma redução na quantidade de mortes por ruptura de barragens de rejeito, sendo inferior a proporção por ruptura de barragem de água, mas observaram um aumento no tamanho das estruturas e no impacto ambiental das rupturas a partir de 2014.

Piciullo et al. (2022) utilizaram dados históricos de ruptura de estruturas de contenção de rejeito para atualizarem a relação entre volume propagado e volume total da estrutura, bem como novas relações como: tipo de construção, material da estrutura e o método de construção. Os autores indicaram que barragens construídas pelo método de alteamento a montante possuem maior susceptibilidade de sofrerem com liquefação estática, instabilidade da estrutura e liquefação dinâmica.

Wang et al. (2022) realizaram um experimento de forma a induzir o galgamento de uma barragem de rejeitos através de um evento extremo de precipitação. Foram encontradas diferenças na infiltração do maciço da estrutura ao longo do evento de precipitação. A largura e a altura da brecha

apresentaram uma relação positiva e a taxa de alargamento da brecha variou de 3 a 8 dependendo do tempo de evento de abertura da brecha, a maior taxa foi observada no meio da abertura.

Chen et al. (2021) realizaram um estudo para verificação da erosão hidráulica em barragens de rejeito reforçadas com geo-grid. Foram realizados cinco testes, com espaçamento diferente entre as camadas. Os autores concluíram que a diminuição entre o espaçamento das camadas reduziu o potencial de erosão da estrutura.

Chen et al. (2021) realizaram estudos com diferentes concentrações volumétricas para verificar o impacto nas variáveis de profundidade de escoamento, força de impacto e velocidade. Os testes foram realizados com concentrações de 30, 40, 50 e 60%. Os resultados encontrados indicaram que quanto maior for a concentração volumétrica, maior será a profundidade de escoamento, já para menores concentrações ocorre valores mais elevados de força de impacto e velocidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

A obtenção de dados históricos de ruptura é realizada a partir da busca de dados históricos para justamente poder classificar as barragens e realizar todo tratamento estatístico requerido.

A principal fonte de obtenção artigos de formulação da brecha atualmente disponíveis, pois esses, geralmente, apresentam uma tabela com as barragens analisadas e suas características no momento da ruptura e seus parâmetros da brecha e estudos de retroanálise de casos de ruptura de barragens de rejeito. Existem vários estudos analisando casos históricos e desenvolvendo modelagens física para melhor entendimento da formação da brecha em barragens de rejeito.

Com os dados históricos levantados foi necessário um tratamento desses para obtenção da formulação proposta, o que demanda a definição de uma metodologia para processar os dados e buscar a melhor regressão visando minimizar os erros associados à relação escolhida.

A partir do tratamento dos dados foi possível observar quais estariam disponíveis, de forma a possibilitar a determinação das variáveis de interesse.

Para a pesquisa em desenvolvimento serão ajustadas equações para determinação da largura média da brecha, inclinação dos taludes e tempo de formação da mesma. Os parâmetros das equações serão definidos com base no método dos quadrados mínimos. Esse método basicamente verifica a minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo ajuste definido e indica qual seria os parâmetros para se chegar nesse ajuste.

O método dos quadrados mínimos é uma técnica estatística usada para estimar os parâmetros de um modelo matemático que melhor se ajusta a um conjunto de dados observados. Ele busca encontrar os coeficientes da função de tal forma que a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos pela função seja minimizada. A diferença pode ser apresentada como um erro residual e representada da seguinte forma:

$$\varepsilon_i = y_i - f(x_i; \theta) \quad (1)$$

A partir do método indicado serão definidos quantos e quais variáveis impactam na definição dos parâmetros de formação de brecha para as barragens de rejeito. Tal método foi selecionado para grande utilização na literatura, além de ser o método que vários autores utilizaram para definir as equações de formação de brecha para barragens de água.

RESULTADOS

Com os resultados obtidos foi possível observar que a brecha formada em barragens de rejeito tende a possuir um formato mais próximo a um retângulo, do que propriamente formato trapezoidal e tempo de formação menor em relação a barragens de água.

Ainda é perceptível que as diferentes características do material do reservatório e do próprio maciço afetam a geometria da brecha. Da Figura 2 a Figura 3 estão mostrados alguns gráficos que ilustram a situação indicada.

Figura 2 – Variação da largura média da brecha em função da porcentagem de volume de rejeitos em relação ao volume total do reservatório

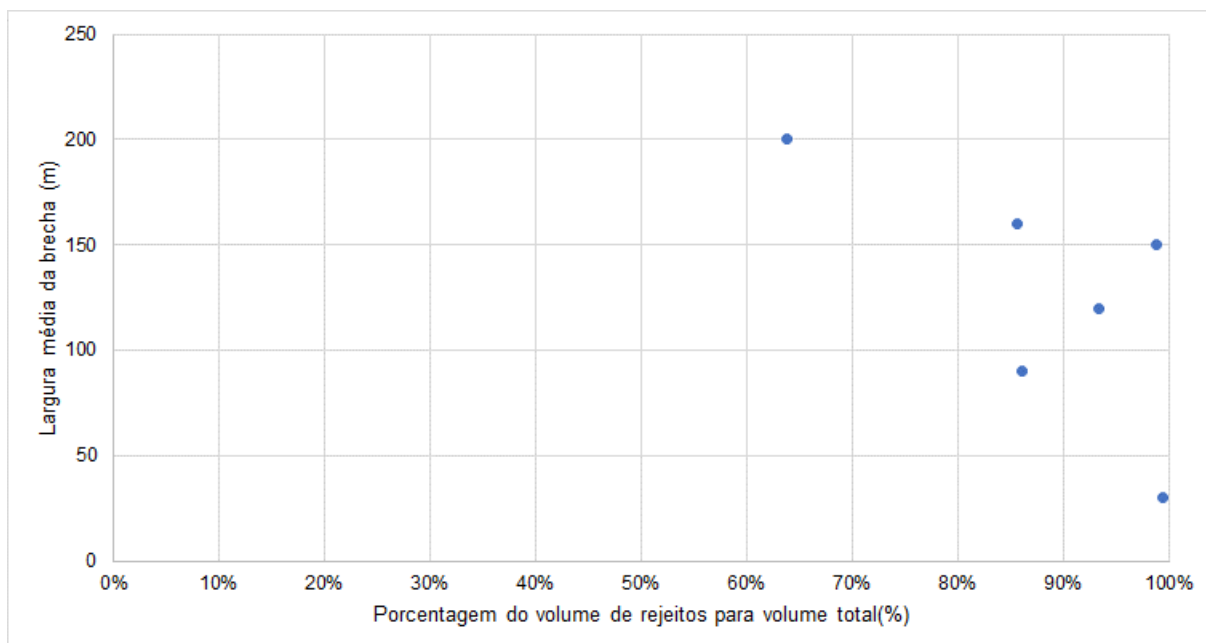
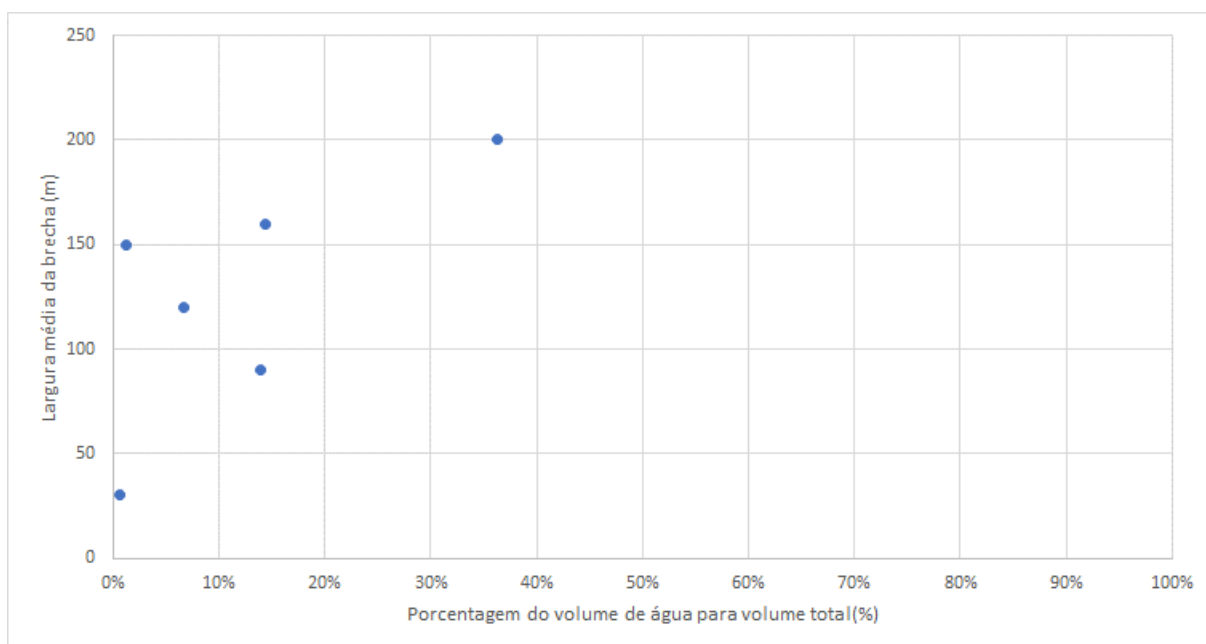


Figura 3 – Variação da largura média da brecha em função da porcentagem de volume de água em relação ao volume total do reservatório



A partir da utilização de 23 casos históricos com dados disponíveis de altura da estrutura e volume mobilizado foi possível ajustar uma equação para determinação da largura média da brecha. Na está apresentada a equação gerada.

$$B = 7,13H^{0,5565}Z^{0,2189}V^{0,1489} \quad (2)$$

Em que:

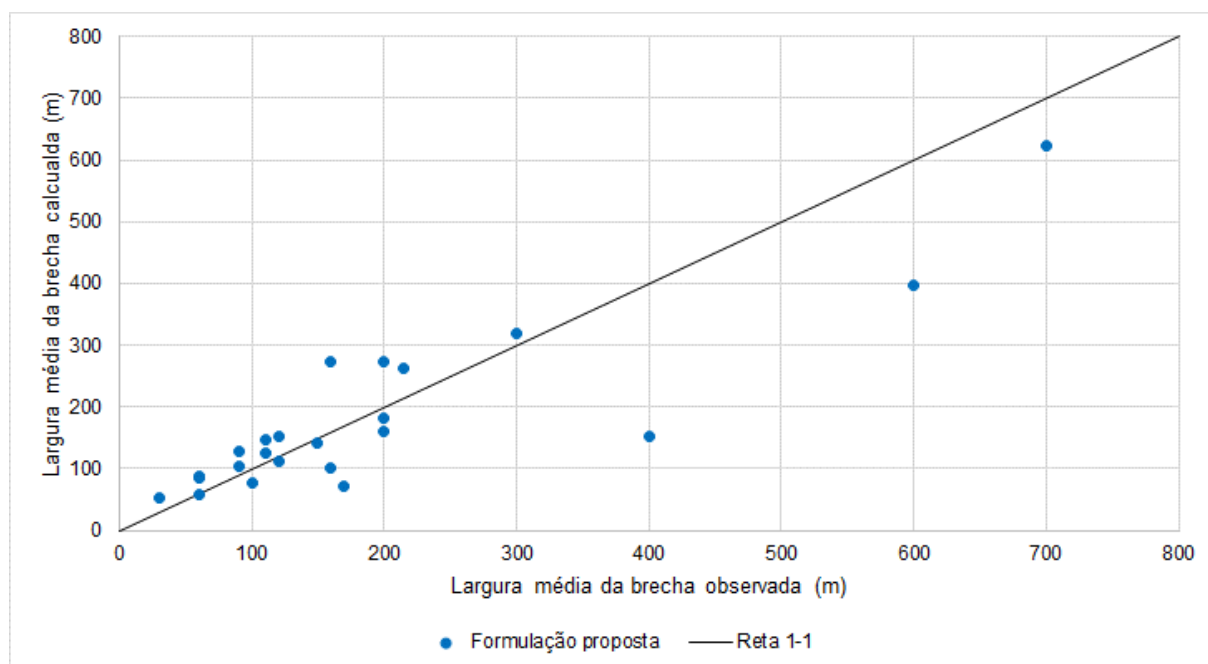
B = largura média da brecha, em m;

Z = Inclinação do talude de jusante da estrutura, em rad;

V = volume mobilizado para jusante, em 10^3 m^3 .

Na Figura 4 estão apresentado o gráfico relacionando os valores observados e calculados da largura média da brecha.

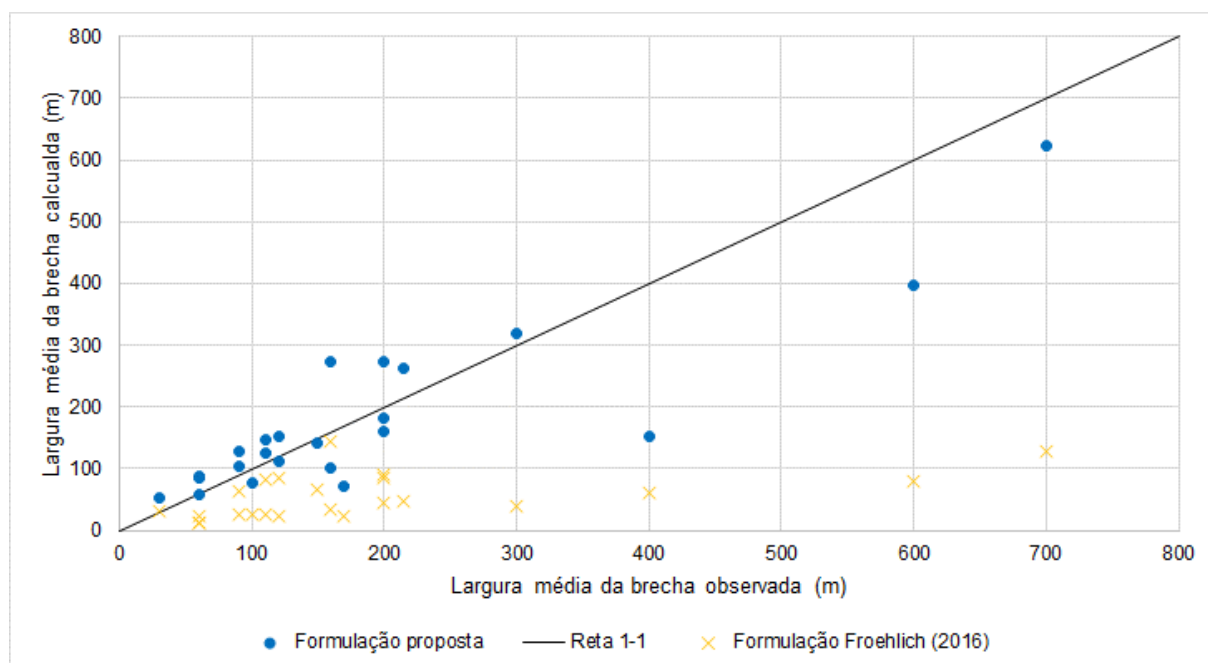
Figura 4 – Relação valores calculados e observados da largura média da brecha



O coeficiente de determinação encontrado pela equação proposta foi de 0,902, já o erro padrão de estimativa foi de 0,432.

A partir dos resultados encontrados foi verificada qual seriam os valores de largura média de brecha encontrados, caso se utilizasse alguma formulação já proposta, no caso, foi utilizada a proposição de Froehlich (2016). Na Figura 5 estão apresentados os gráficos dos valores observados e calculados da largura média da brecha considerando as duas equações.

Figura 5 – Relação valores calculados e observados da largura média da brecha pela formulação proposta e formulação de Froehlich (2016)



Observando a Figura 8 é verificar que a formulação proposta se adere melhor aos resultados encontrados pela formulação de Froehlich. O valor do coeficiente de determinação encontrado para a formulação proposta foi de 0,902, enquanto para a equação de Froehlich tal coeficiente foi encontrado com o valor de 0,279.

CONCLUSÕES

A partir do apresentado é possível identificar que as avaliações de estudos de ruptura estão sofrendo diversas modificações e atualizações ao longo dos últimos anos, em especial por causa de eventos que ocorreram no Mundo, em especial no Brasil. O volume de publicações apresentadas nos últimos anos acaba por ser uma evidência dessa evolução do tema.

Foi possível observar que houve evolução, desde a definição do modo de falha, volume a ser propagado para jusante e como se realizar a propagação em si. Estudos de ruptura de barragem de rejeitos possuem especificidades que os estudos desenvolvidos para barragens de água não possuem, assim se torna necessário evoluir em sua análise e verificar quais seriam fatores importantes de ser levar em consideração nesse tipo de estudo. Foram observados que estudos experimentais estão cada vez mais sendo utilizados e dessa forma se torna possível gerar relações para maior assertividade nas modelagens desse tipo de estudo.

Contudo é importante ressaltar que precisa-se de boa caracterização do material do reservatório e do maciço para melhor entendimento e geração dos parâmetros de entrada nas simulações. A própria definição dos parâmetros de formação de brecha para os estudos de barragens de rejeito ainda é um campo indefinido, sendo necessário muitas vezes utilizar formulações disponíveis para barragens de água nos estudos.

Ainda se faz importante indicar que não foram observadas publicações que indiquem os parâmetros de brecha a serem adotados para barragens de rejeito, assim essa é uma importante evolução que precisa ser alcançada com o desenvolvimento dos estudos dessa natureza.

REFERÊNCIAS

- ALBU, L. M.; ENEA, A.; IOSUB, M.; BREABAN, I. G.; (2020) *Dam Breach Size Comparison for Flood Simulations. A HEC-RAS Based, GIS Approach for Dracsani Lake, Sitna River, Romania*. Water, v. 12, 27p.
- CHANG, D. S.; ZHANG, L. M., (2010) *Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 933–946. doi:10.5194/nhess-10-933-2010.
- CHANG, D. S, ZHANG L. M. AND HUANG, R. Q., (2011) *Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan. earthquake*. Landslides 8, 321–332. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0256-x>.
- CHEN, S.; ZHONG, Q.; SHEN, G., (2019) *Numerical modeling of earthen dam breach due to piping failure*. Water Science and Engineering. v. 12(3), 169-198.
- CHEN, X.; JING, X.; CAI, H.; WANG, Y.; YE, L. (2021) *Hydraulic Erosion Rate of Reinforced Tailings: Laboratory Investigation and Prediction Model*. Hindawi, v. 2021, 11 p.
- CHEN, X.; JING, X.; CHEN, Y.; PAN, C.; WANG, W. (2021) *Tailings Dam Break: The Influence of Slurry with Different Concentrations Downstream*. Frontiers in Earth Science, v. 9, 11 p.
- DHIMAN, S.; PATRA, K. C.; (2018) *Experimental study of embankment breach based on its soil properties*, ISH Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1080/09715010.2018.1474500.
- FROELICH, D. C. *Empirical Model of Embankment Dam Breaching*. The Internacional Conference on Fluvial Hydraulics, Saint Louis, 2016, pp. 1821-1830.
- GLOTOV, V.; E.; CHLACHULA, J.; GLOTOVA, L.; P.; LITTLE. (2018) *Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East*. Engineering Geology, v. 245, p. 236-247.
- HOOSHYARIPOR, F.; TAHERSHAMSI, RAZI, S. (2017) *Dam Break Flood Wave Under Different Reservoir's Capacities*. Sadhana. v. 42, pp. 1557-1569.
- ISLAM, K.; MURAKAMI, S.; (2021) *Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020*. Global Environmental Change, v. 70, 16 p.
- LIN, S. Q.; WANG, G. J.; LIU, W. L.; ZHAO, B.; SHEN, Y. M.; WANG, M. L.; LI, X. S. (2022) *Regional Distribution and Causes of Global Mine Tailings Dam Failures*. Metals, v. 12, 19 p.
- LLANO-SERNA, M.; WILLIAMS, D.; RUEST, M. (2017) *Analysis of Tailings Dam Break and Run Out*. 4th International Seminar on Tailings Management, Santiago – CHL, 7 p.
- MACHADO, N., C. (2017) *Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos e Numéricos e Hipóteses de Simulação*, Minas Gerais, Brasil. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 188 p.
- MEI, S.; ZHONG, Q.; CHEN, S.; SHAN, Y. (2022) *Investigation of the overtopping-induced breach of tailings dams*. Computers and Geotechnics, v. 149, 15 p.

- PETER, S. J.; SIVIGLIA, A.; NAGEL, J.; MARELLI, S.; BOES, R. M.; VETSCH, D.; SUDRET, (2018) *Development of Probabilistic Dam Breach Model Using Bayesian Inference*. Water Resources Research. v. 54, pp 4376-4400.
- PICIULLO, L.; STORROSTEN, E. B.; LIU, Z.; NADIM, F.; LACASSE, S. (2022) *A new look at the statistics of tailings dam failures*. Engineering Geology, v. 303, 14 p.
- PIRULLI, M.; BARBERO, M.; MARCHELLI, M.; SCAVIA, C. (2017) *The Failure of the Stava Valley Tailings Dams (Northern Italy): Numerical Analysis of the Flow Dynamics and Rheological Properties*. Geoenvironmental Disasters. v. 4, 15 p.
- RANA, N. M.; GHAHRAMANI, N.; EVANS, S. G.; SMALL, A.; SKERMER, N. MCDOUGALL, S.; TAKE, W. A.; (2022) *Global magnitude-frequency statistics of the failures and impacts of large water-retention dams and mine tailings impoundments*. Earth-Science Reviews, v. 232, 26 p.
- ROCHA, F., F. (2015) *Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 200 p.
- STARK, T. D.; MOYA, L.; LIN, F. (2022) *Rates and Causes of Tailings Dam Failures*. Hindawi, v. 2022, 21 p.
- TIAN, S.; DAI, X.; WANG, G.; LU, Y.; CHEN, J. (2021) *Formation and evolution characteristics of dam breach and tailings flow from dam failure: an experimental study*. Natural Hazards, v. 107, p.1621-1638.
- WANG, G.; ZHAO, B.; LAN, R.; LIU, D.; WU, B.; LI, Y.; LI, Q.; ZHOU, H.; LIU, M.; LIU, W.; LIU, X. (2022) *Experimental Study on Failure Model of Tailing Dam Overtopping under Heavy Rainfall*. Geo Science World, c. 2022, 14 p.
- YAO, C.; WU, L.; YANG, J.; XIAO, L.; LIU, X.; JIANG, Q.; ZHOU, C. (2020) *Influences of Tailings Particle Size on Overtopping Tailings Dam Failures*. Mine Water and the Environment, v. 40, p. 174-188.
- ZHANG, L.; YAN, W. M.; YENG, Ka-V. (2015) *Empirical Formulas in the Prediction of Breach Parameters*. 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fukuoka, pp. 1727-1731.
- ZHOU, G. G. D.; LI, S.; LU, X.; TANG, H. (2022) *Large-scale landslide dam breach experiments: Overtopping and “overtopping and seepage” failures*. Engineering Geology, v. 304, 19 p.