

Comparação entre Curvas de Progressão de Brecha em Modelos de Ruptura de Barragens utilizando HEC-RAS e HEC-HMS

Victória Sofia Guimarães Braga¹, Iago de Carvalho Mello², Carlos Barreira Martinez³ & Marina

Batalini de Macedo⁴

Resumo: O estudo de ruptura hipotética de barragens é fundamental para a avaliação de riscos e planejamento de ações emergenciais. Este trabalho realiza uma análise comparativa entre diferentes curvas de progressão de brecha utilizando os softwares HEC-RAS e HEC-HMS. Para isso, considerou-se um barramento hipotético de terra com 31 m de altura e volume de 6,08 hm³, com parâmetros geométricos e temporais baseados na metodologia de Froehlich (2016). Avaliaram-se quatro cenários de evolução: progressão linear, senoidal nativa do HEC-HMS, senoidal nativa do HEC-RAS e modelagem dinâmica com representação explícita do reservatório no HEC-RAS. A propagação da onda de cheia foi simulada via modelagem bidimensional no HEC-RAS, analisando-se seções de controle ao longo de 10 km na Zona de Autossalvamento (ZAS). Os resultados indicam que as diferenças entre os modelos são pouco significativas para os parâmetros máximos de profundidade, velocidade e área inundada. Entretanto, observam-se variações na vazão de pico de até 1000 m³/s (15%) e diferenças de até seis minutos no tempo de chegada da onda na extensão avaliada, representando mais de 70% de diferença no tempo para as ações de auto proteção nas áreas mais próximas do barramento. Tais resultados evidenciam que a escolha da função de progressão influencia diretamente a efetividade do Plano de Ação de Emergência (PAE), reforçando a importância da análise de sensibilidade em estudos de ruptura hipotética.

Abstract: Hypothetical dam break studies play a fundamental role in risk assessment and emergency planning for downstream areas. This study presents a comparative analysis of different breach progression curves applied to dam break modeling using HEC-RAS and HEC-HMS software. A hypothetical earthfill dam with a height of 31 m and a storage volume of approximately 6.08 hm³ was adopted as the study case. Breach geometric parameters and formation time were estimated using the empirical methodology proposed by Froehlich (2016) and were kept constant for all simulated scenarios. Four breach progression scenarios were evaluated: linear progression, the standard sine progression implemented in HEC-HMS, the sine progression used in HEC-RAS, and a dynamic breach simulation with explicit reservoir representation in HEC-RAS. Flood wave propagation was simulated using a two-dimensional hydrodynamic model in HEC-RAS. Results were evaluated at control sections located up to 10 km downstream of the dam, corresponding to the Self-Rescue Zone (ZAS). The results indicate that differences between the models are small for depth, velocity and flood area for maximum parameters. However, variations of up to approximately 1000 m³/s (15%) were observed in peak discharge among the evaluated scenarios, as well as differences of up to six minutes in wave arrival time along the analyzed reach, representing a difference of over 70% in the time for self-protection actions in the sites nearest to the dam embankment. These findings demonstrate that the choice of the breach progression function can influence the effectiveness of the Emergency Action Plan (PAE), highlighting the importance of sensitivity analysis in dam break studies.

1 Engenheira Ambiental (UFMG). Mestranda em Engenharia Hídrica (UNIFEI). (victoriasgbraga@gmail.com)

2 Engenheiro Hídrico (UNIFEI). Mestrando em Engenharia Hídrica (UNIFEI). (iagomello@unifei.edu.br)

3 PPG-EME / MPEH (UNIFEI) & PPGMEC (UFMG). (cmartinez@unifei.edu.br)

4 Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento (USP). PRPPG/ MPEH (UNIFEI) (marinamacedo@unifei.edu.br)

Palavras-Chave: Ruptura de barragem; curvas de progressão; brecha de ruptura; modelagem hidrodinâmica; HEC-RAS.

Keywords: Dam break; progression curves; dam breach; hydrodynamic modeling; HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

O estudo de ruptura hipotética de barragens é fundamental para a gestão de riscos e o planejamento de ações emergenciais a jusante. No cenário regulatório brasileiro, essa relevância é consolidada pela Resolução ANM nº 220/2025 e pela norma ABNT NBR 17.188/2024, que estabelecem diretrizes rigorosas para a delimitação precisa da Zona de Autossalvamento (ZAS) nos Planos de Ação de Emergência (PAE). O sucesso dessas estratégias preventivas depende diretamente da acurácia na modelagem da onda de cheia, uma das principais fontes de incerteza nesses estudos reside nas definições da brecha de ruptura, dentre eles a progressão temporal, fator que influencia diretamente a forma do hidrograma de ruptura e a propagação da onda de cheia (Prastalo et al, 2024).

Embora existam metodologias empíricas e paramétricas consagradas para a definição da geometria da brecha, como a de Froehlich (2016), a função de evolução temporal dessa abertura ainda é um aspecto menos explorado na literatura. A adoção de simplificações, como a evolução linear ou variações na interpretação da função senoidal, pode resultar em subestimações ou superestimações da vazão de pico e do tempo de chegada da onda, comprometendo a eficácia das medidas de segurança.

Nesse contexto, este trabalho realiza uma análise comparativa entre diferentes curvas de progressão de brecha aplicadas à modelagem de ruptura utilizando os softwares HEC-RAS e HEC-HMS. O objetivo é avaliar a influência dessas variáveis nos resultados hidrodinâmicos em um barramento hipotético de terra, fornecendo subsídios técnicos para o gerenciamento de riscos de barragens.

METODOLOGIA

O estudo seguiu uma abordagem quantitativa dividida na caracterização da estrutura, estimativa paramétrica da brecha, definição de cenários evolutivos e simulação hidrodinâmica bidimensional.

Caracterização da Estrutura

Considerou-se um barramento de terra hipotético inserido em um talvegue do Modelo Digital de Terreno (MDT) obtido na data de 31/01/2026, junto à base de dados oficial do Estado de Santa Catarina, com resolução espacial de 1 x 1 metro. O aterro considerado possui altura máxima de 31,0 m, largura de crista de 20,0 m, 350 m de extensão e inclinação dos taludes de montante e jusante de 3,0:1,0 (V:H) e 2,0:1,0 (V:H), respectivamente. Resultando em um volume total mobilizável de 6.075.597 m³ (aprox. 6,08 hm³).

Parâmetros da Brecha e Cenários

Para isolar o efeito da curva de progressão, os parâmetros geométricos e o tempo de formação (t_f) da brecha foram mantidos constantes em todos os cenários, calculados pela metodologia de Froehlich (2016) para falha por galgamento (Tabela 1).

Foram simulados três cenários de progressão de brecha sob abordagem paramétrica, considerando as curvas apresentadas na Figura 1, e complementarmente um quarto cenário hidrodinâmico mais completo, usado como referência física.

- Cenário 1 (Linear): Taxa de erosão constante ao longo do tempo;

- Cenário 2 (Senoidal HEC-HMS): Progressão senoidal nativa do HEC-HMS, com crescimento acelerado na fase inicial. Segundo o manual de referência do HEC-HMS (USACE, 2023), essa abordagem assume que a brecha cresce rapidamente nas fases iniciais do desenvolvimento, reduzindo a taxa de erosão à medida que atinge o tamanho máximo;
- Cenário 3 (Senoidal HEC-RAS): Curva senoidal nativa do HEC-RAS ajustada com maior taxa de erosão no terço médio, inserida manualmente no HEC-HMS. Conforme descrito na documentação técnica do software (USACE, 2023), as rupturas tendem a iniciar lentamente devido à resistência inicial do material, acelerar significativamente na fase intermediária (colapso do maciço) e desacelerar ao se aproximar das dimensões finais;
- Cenário 4 (Senoidal HEC-RAS com reservatório dinâmico): Modelagem explícita do reservatório no domínio 2D do HEC-RAS, avaliando o decaimento dinâmico da carga hidráulica utilizando a curva senoidal nativa do HEC-RAS.

Tabela 1 – Parâmetros da brecha calculados por Froehlich (2016).

Parâmetros	Valor	Unidade
Elevação do topo da brecha	1115,0	m
Elevação do fundo da brecha	1084,0	m
Nível máximo atingido	1115,0	m
Altura da barragem (H_b)	31,0	m
Volume de água (V_w)	6.075.597	m ³
Coefficiente de modo de falha (K_M)	1,5	-
Inclinação lateral das paredes da brecha (m)	1,0	-
Espessura média do barramento ($\bar{W}$)	97,5	m
Largura média da brecha ($\bar{B}$)	63,3	m
Tempo de formação (t_f)	0,47	h

Modelagem Hidrodinâmica e Avaliação

Para os cenários 1, 2 e 3, utilizou-se dos hidrogramas pré-definidos pelas metodologias anteriormente citadas, sendo que, os hidrogramas de ruptura foram calculados externamente com o auxílio do software HEC-HMS (v. 4.11) e posteriormente utilizados no modelo hidrodinâmico. A propagação da onda de cheia foi realizada no software HEC-RAS (v. 6.6) utilizando o módulo bidimensional (2D) de escoamento não permanente e as equações de águas rasas (SWE-ELM) e o MDT da base de dados oficial do Estado de Santa Catarina, com resolução espacial de 1 x 1 metro. A área de estudo abrange os articuladores SG-22-Z-C-V-4-NE-E, NE-F, SE-A, SE-B e NO-F.

Para a discretização do domínio computacional, gerou-se uma malha estruturada com células de 5 x 5 metros. A fim de garantir a correta representação hidráulica, aplicaram-se linhas de quebra (*breaklines*) com refinamento ao longo da calha fluvial e das zonas de talvegue, permitindo que a propriedade *Sub-grid Bathymetry* do HEC-RAS capture a geometria detalhada do canal mesmo

quando este é menor que a dimensão da célula. Adotou-se coeficiente de Manning uniforme de 0,025 para mitigar incertezas associadas ao atrito e focar na forma do hidrograma.

A análise restringiu-se aos 10 km a jusante, correspondentes à Zona de Autossalvamento (ZAS) conforme a Resolução ANM nº 220/2025. Os resultados foram extraídos em 10 seções de controle (espaçadas a cada 1 km), monitorando-se a vazão de pico, profundidade máxima, velocidade máxima, área inundada e o tempo de chegada da onda de ruptura (sobrelevação de 0,61 m).

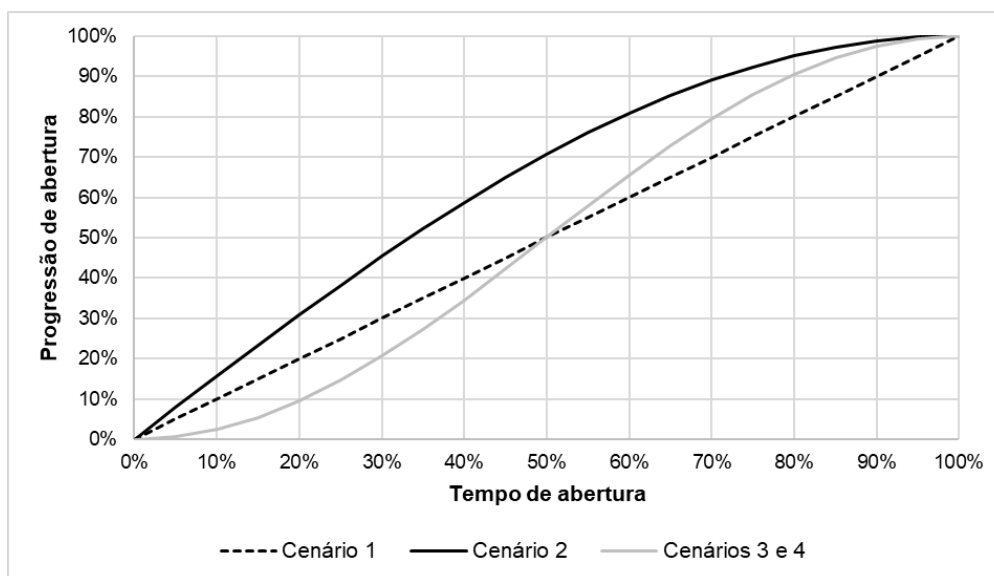


Figura 1 – Curvas adimensionais de progressão de abertura pelo tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os hidrogramas de ruptura (Figura 2) demonstraram que a função de progressão da brecha altera significativamente a vazão de pico e o tempo de sua ocorrência. O Cenário 3 (senoidal do HEC-RAS) apresentou a maior vazão máxima na seção do barramento ($6.905,37 \text{ m}^3/\text{s}$), enquanto o Cenário 2 (senoidal do HEC-HMS) resultou na menor ($5.880,63 \text{ m}^3/\text{s}$), evidenciando uma variação de aproximadamente $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (15%) decorrente apenas da escolha do modelo de evolução.

Em relação aos parâmetros hidráulicos na Zona de Autossalvamento (ZAS), as variações de profundidade e velocidade máxima foram pouco significativas entre os cenários, conforme apresentado na Tabela 2. Contudo, observaram-se diferenças de até seis minutos no tempo de chegada da frente de onda (sobrelevação de 0,61 m) ao longo dos 10 km analisados. No limite da ZAS (Seção 10), o tempo de chegada variou entre 43 minutos (Cenário 2) e 49 minutos (Cenário 4).

A relevância dessas variações temporais é mais evidente nas áreas imediatamente a jusante da estrutura, onde o tempo de resposta é naturalmente reduzido. Conforme os dados da Tabela 2, na Seção 1, a frente de onda atinge o local em 7 minutos no Cenário 2, contra 12 minutos no Cenário 4. Embora a diferença absoluta seja de apenas 5 minutos, isso representa um aumento relativo de aproximadamente 71% no tempo disponível para a evacuação da população local. Enquanto no limite da ZAS (Seção 10) essa diferença de tempo se dilui no tempo total de propagação da cheia, nos primeiros quilômetros do vale esse mesmo intervalo mostra-se operacionalmente relevante para o Plano de Ação de Emergência (PAE), influenciando os procedimentos de acionamento de sistemas de alerta e a viabilidade do autossalvamento.

A divergência observada entre o Cenário 3 e o Cenário 4 fundamenta-se na física da interação entre o reservatório e a brecha. No Cenário 3, o hidrograma é gerado de forma externa por um modelo

hidrológico que, embora utilize a função senoidal para descrever a evolução da abertura, desconsidera a variação dinâmica da linha de água e os efeitos de inércia dentro do reservatório. Fisicamente, isso pode resultar em uma superestimação da vazão de pico, pois o modelo assume uma disponibilidade de carga hidráulica que não decai em tempo real com a mesma precisão de um modelo hidrodinâmico.

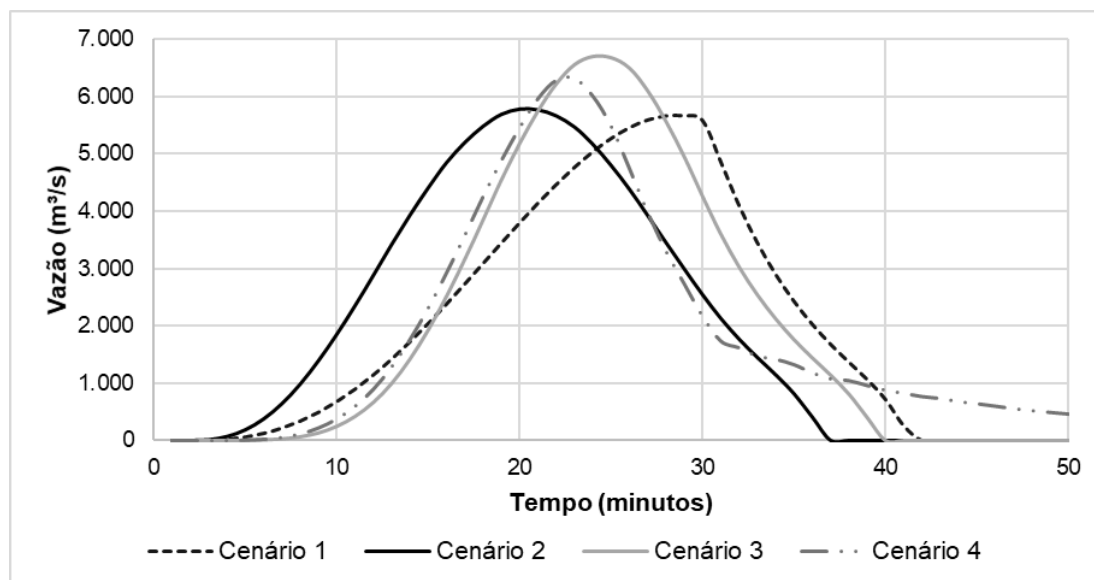


Figura 2 – Hidrogramas de ruptura dos cenários avaliados.

Por outro lado, o Cenário 4 utiliza a representação explícita da geometria do reservatório dentro do domínio bidimensional do HEC-RAS. Esta abordagem permite capturar o fenômeno do decaimento dinâmico da carga hidráulica: à medida que a brecha se expande, o volume do reservatório é depletado, reduzindo a pressão hidrostática que impulsiona o fluxo através da abertura. Além disso, a modelagem dinâmica no HEC-RAS considera a formação da "onda negativa" que se propaga para dentro do reservatório e a influência de possíveis efeitos da água a jusante da estrutura, fatores que naturalmente atenuam a vazão de descarga.

Conforme apontado por Collischonn e Tucci (1997), modelos hidrológicos que não representam a declividade da linha de água tendem a superestimar as vazões afluentes à brecha, especialmente em reservatórios com menor inércia volumétrica ou quando a ruptura ocorre de forma acelerada. Assim, o pico superior observado no Cenário 3, 6.905 m³/s, contra os 6.327 m³/s do Cenário 4, reflete o conservadorismo intrínseco das abordagens paramétricas estáticas frente à complexidade física capturada pela simulação hidrodinâmica completa.

Tabela 2 – Resultados das seções transversais avaliadas.

Seção	Parâmetros de avaliação	Cenário			
		1	2	3	4
Seção-00	Velocidade Máxima (m/s)	26,8	27,0	26,5	9,89
	Profundidade Máxima (m)	24,0	24,1	23,1	19,9
	Vazão Máxima (m³/s)	6.255	5.880	6.905	6.327
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:02	0:01	0:04	0:04
	Área Afetada incremental (m²)	205.208	221.976	208.751	219.571
Seção-01	Velocidade Máxima (m/s)	14,9	14,9	15,1	14,9
	Profundidade Máxima (m)	15,4	15,6	16,4	15,1

Seção	Parâmetros de avaliação	Cenário			
		1	2	3	4
Seção-01	Vazão Máxima (m³/s)	5.708	5.731	6.595	5.895
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:08	0:07	0:11	0:12
	Área Afetada incremental (m²)	208.490	227.207	206.886	192.695
	Velocidade Máxima (m/s)	10,6	12,4	12,8	12,6
	Profundidade Máxima (m)	15,4	15,5	16,0	14,4
	Vazão Máxima (m³/s)	5.042	5.324	5.759	4.510
Seção-02	Tempo de chegada (hh:mm)	0:14	0:11	0:16	0:17
	Área Afetada incremental (m²)	195.967	200.675	196.357	185.162
	Velocidade Máxima (m/s)	9,48	9,48	9,78	9,18
Seção-03	Profundidade Máxima (m)	13,7	13,7	14,2	12,8
	Vazão Máxima (m³/s)	3.844	3.839	4.127	3.367
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:19	0:16	0:21	0:22
	Área Afetada incremental (m²)	258.062	104.590	102.490	97.615
	Velocidade Máxima (m/s)	14,6	14,8	15,0	14,7
Seção-04	Profundidade Máxima (m)	10,3	10,3	10,6	9,61
	Vazão Máxima (m³/s)	3.825	3.870	4.145	3.288
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:23	0:20	0:25	0:25
	Área Afetada incremental (m²)	102.209	261.404	118.467	249.216
	Velocidade Máxima (m/s)	6,80	6,94	7,02	6,65
Seção-05	Profundidade Máxima (m)	10,7	10,8	10,9	10,1
	Vazão Máxima (m³/s)	3.819	3.869	3.853	2.946
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:28	0:24	0:29	0:30
	Área Afetada incremental (m²)	117.973	120.040	258.538	110.134
	Velocidade Máxima (m/s)	11,6	11,6	11,8	10,7
Seção-06	Profundidade Máxima (m)	11,9	11,9	12,1	11,0
	Vazão Máxima (m³/s)	3.173	3.196	3.333	2.662
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:33	0:29	0:33	0:34
	Área Afetada incremental (m²)	241.760	245.247	241.421	206.539
	Velocidade Máxima (m/s)	10,1	10,1	10,2	9,32
Seção-07	Profundidade Máxima (m)	9,70	9,71	9,76	8,92
	Vazão Máxima (m³/s)	2.575	2.618	2.680	2.179
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:36	0:32	0:36	0:37
	Área Afetada incremental (m²)	139.911	141.339	140.236	130.678
	Velocidade Máxima (m/s)	7,95	7,95	8,03	7,34
Seção-08	Profundidade Máxima (m)	7,46	7,45	7,53	7,08
	Vazão Máxima (m³/s)	2.538	2.587	2.606	2.140
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:41	0:36	0:40	0:41
	Área Afetada incremental (m²)	199.222	202.718	199.145	167.933
	Velocidade Máxima (m/s)	10,5	10,5	10,5	10,1
Seção-09	Profundidade Máxima (m)	8,48	8,49	8,58	7,68
	Vazão Máxima (m³/s)	2.412	2.417	2.450	2.063
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:45	0:40	0:44	0:46
	Área Afetada incremental (m²)	546.085	547.064	546.292	522.251
	Velocidade Máxima (m/s)	5,32	5,34	5,41	4,99
Seção-10	Velocidade Máxima (m/s)	5,32	5,34	5,41	4,99

Seção	Parâmetros de avaliação	Cenário			
		1	2	3	4
	Profundidade Máxima (m)	10,7	10,7	10,7	10,3
	Vazão Máxima (m³/s)	1.343	1.337	1.366	1.217
	Tempo de chegada (hh:mm)	0:48	0:43	0:47	0:49
	Área Afetada incremental (m²)	274.310	274.375	274.314	263.171
	Área Afetada Total (m²)	2.489.197	2.546.635	2.492.898	2.344.964

A escolha entre as funções senoidais nativas do HEC-HMS e do HEC-RAS deve pautar-se na fidelidade à representação física do processo erosivo do maciço. A evolução senoidal implementada no HEC-RAS descreve um crescimento inicialmente lento devido à resistência mecânica do solo, seguido por uma aceleração brusca durante o colapso do material e uma desaceleração final conforme o reservatório se esvazia. Esse comportamento é corroborado por diretrizes técnicas como o Guidelines (2010) que indicam que a progressão lenta nos instantes iniciais e finais é mais condizente com registros históricos de falhas reais.

Em contraste, a função nativa do HEC-HMS modela uma aceleração máxima logo no início do evento, resultando em um pico de vazão antecipado (conforme observado no Cenário 2), o que pode não refletir adequadamente a inércia inicial do barramento. Embora Froehlich (2016) destaque a incerteza intrínseca em registrar a evolução temporal de rupturas reais, a parametrização do HEC-RAS captura com maior precisão a dinâmica da erosão progressiva e do transporte de sedimentos. Portanto, para análises que buscam representar a física do colapso progressivo, o modelo do HEC-RAS apresenta-se mais adequado, enquanto a abordagem do HEC-HMS pode ser adotada para garantir resultados mais conservadores em termos de tempo de alerta para a Zona de Autossalvamento (ZAS).

CONCLUSÃO

A análise comparativa demonstrou que a função de progressão da brecha exerce influência direta na forma do hidrograma de ruptura e, consequentemente, na propagação da onda de cheia a jusante. Embora os parâmetros de profundidade e velocidade máxima tenham apresentado variações reduzidas entre os cenários simulados, diferenças significativas foram identificadas na magnitude da vazão de pico e no tempo de chegada da frente de onda.

As variações na vazão máxima atingiram a ordem de 1000 m³/s (15%), evidenciando que a escolha da função de progressão altera sensivelmente a descarga inicial liberada. Tais discrepâncias permanecem perceptíveis ao longo de toda a extensão analisada, resultando em diferenças de até seis minutos no tempo de chegada da onda no limite da Zona de Autossalvamento (ZAS). Adicionalmente, a representação explícita da geometria do reservatório (Cenário 4) configura uma situação menos conservadora, porém mais realista quando comparada aos modelos hidrológicos simplificados, pois captura o decaimento dinâmico da carga hidráulica e os efeitos da onda negativa, evitando superestimações da descarga.

Quanto à forma de evolução, a progressão senoidal apresenta-se como a mais adequada para representar a física da ruptura em barragens de terra, simulando a resistência inicial do maciço seguida pelo colapso acelerado. Entre as opções analisadas, a curva nativa do HEC-RAS (Cenário 3), que concentra a erosão no terço médio do tempo de formação, alinha-se melhor aos processos mecânicos de falha progressiva do que o modelo do HEC-HMS, que assume um crescimento acelerado imediato.

Os resultados permitem indicar, entre os cenários avaliados, quais abordagens se mostraram mais coerentes fisicamente, mas não definem uma forma única e universal de evolução da brecha.

Tanto o tempo de formação quanto a geometria da brecha são estimados por relações empíricas, enquanto sua progressão temporal permanece como uma hipótese de modelagem, razão pela qual análises de sensibilidade continuam sendo indispensáveis.

Conclui-se que a definição da curva de progressão da brecha é um fator crítico na modelagem de ruptura, impactando diretamente a avaliação do risco hidrodinâmico e a eficácia dos Planos de Ação de Emergência (PAE). Recomenda-se que estudos de ruptura incorporem análises de sensibilidade sobre a evolução temporal da brecha, priorizando modelos que representem a dinâmica real do reservatório para garantir maior robustez técnica na delimitação das áreas de risco conforme as exigências da Resolução ANM nº 220/2025.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação desta análise para diferentes condições de barramento, geometrias de reservatório e do vale a jusante, bem como a investigação da ruptura considerando materiais com diferentes propriedades reológicas (como rejeitos de mineração). Adicionalmente, sugere-se a aplicação de modelos numéricos que simulem explicitamente os processos de erosão do maciço e o transporte de sedimentos, permitindo uma comparação mais profunda com as abordagens baseadas em curvas empíricas de progressão temporal testadas neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Itajubá, especialmente o Programa de Pós Graduação em Engenharia Hídrica pelo apoio acadêmico e por fomentar a pesquisa e a inovação, criando um ambiente propício ao desenvolvimento de trabalhos como este, essenciais para o avanço do conhecimento científico.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Mineração. (2025). Resolução nº 220, de 16 de outubro de 2025. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração. *Diário Oficial da União*. Publicada em 17 de out. de 2025.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *Barragens: Ruptura hipotética: Diretrizes* (NBR 17188).
- COLLISCHONN, W., & TUCCI, C. E. M. (1997). Análise de rompimento hipotético da barragem de Ernestina. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2(2), 191-206.
- Colorado Department of Natural Resources. (2010). *Guidelines for dam breach analysis*. Division of Water Resources.
- FROEHLICH, D. C. (2016). Empirical model of embankment dam breaching. Em G. Constantinescu, M. Garcia, & D. Hanes (Eds.), *River Flow 2016* (pp. 1965-1971). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315644479-285>
- PRAŠTALO, P., ULJAREVIĆ, M., & VUKOMANOVIĆ, R. (2024). Effect of breach parameters and progression curves on dam failure hydrograph. *Civil Engineering Journal*, 10(2), 456-467. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-02-08>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2023). *HEC-HMS: Hydrologic Modeling System* (Versão 4.11) [Software de computador]. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2023). *HEC-RAS: River Analysis System* (Versão 6.4.1) [Software de computador]. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.