

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

LIMITES E IMPLICAÇÕES DA MODELAGEM DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO NO HEC-RAS: COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES COM FLUIDO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO

Leonardo de Souza Lisboa¹ ; Rodolfo Rosendo de Carvalho² & Giovanni Carvalho Marquesi³

Abstract: The failure of mining tailings dams represents one of the most severe technological disasters, particularly when involving tailings with non-Newtonian flow behavior. This study evaluates the performance of the HEC-RAS model in simulating the breach of four small-scale dams, comparing the hydrodynamic results for two fluid types: water (Newtonian) and mining tailings modeled as a Bingham plastic (non-Newtonian). Simulations were conducted using various solid volume concentrations (Cv), ranging from 20% to 50%, with the latter adopted in the main analysis for representing the upper threshold of debris flow behavior and for producing the most pronounced contrasts relative to water. Only Dam 2 produced physically consistent results, such as increased flow depth and reduced velocity for the tailings, whereas the other dams exhibited inconsistencies, including higher velocities and discharges for the tailings compared to water. These anomalies are attributed to the limitations of HEC-RAS in representing dense, rheologically complex flows, as well as to the model's sensitivity to configuration errors. It is concluded that, although HEC-RAS provides features for non-Newtonian flow simulation, its application to tailings dam breach scenarios requires caution, careful validation of input parameters, and critical interpretation of model outputs, especially when used for safety planning purposes such as defining inundation zones.

Resumo: A ruptura de barragens de mineração constitui um dos desastres tecnológicos mais graves, sobretudo quando envolve rejeitos com comportamento não newtoniano. Este estudo avaliou o desempenho do modelo HEC-RAS em simulações de rompimento de quatro barragens de pequeno porte, comparando os resultados hidrodinâmicos para dois tipos de fluido: água (newtoniano) e rejeito de mineração modelado como fluido de Bingham (não newtoniano). Foram realizados testes com diferentes concentrações volumétricas de sólidos (Cv), variando de 20% a 50%, sendo este último adotado na análise principal por representar o limite superior para caracterização de corrida de lama e por apresentar os maiores contrastes em relação à água. A Barragem 2 foi a única que apresentou resultados condizentes com o comportamento físico esperado, como maior profundidade e menor velocidade para o rejeito, enquanto as demais mostraram inconsistências, incluindo velocidades e vazões superiores para o rejeito. Essas distorções são atribuídas a limitações do HEC-RAS para simular fluidos densos e complexos, bem como à sensibilidade do modelo a configurações inadequadas. Conclui-se que, embora o HEC-RAS ofereça recursos para simulação de fluidos não newtonianos, sua aplicação em barragens com rejeitos exige cautela, validação criteriosa dos dados de entrada e interpretação crítica dos resultados.

Palavras-Chave – Ruptura de barragens, Modelagem hidrodinâmica, Fluido não newtoniano.

1) Afiliação: Engenheiro de Recursos Hídricos na G5 Engenharia, rua Nunes Machado nº 68, Curitiba, (41) 98172-9917, isl@g5engenharia.com.

2) Afiliação: Coordenador de Recursos Hídricos na G5 Engenharia, rua Nunes Machado nº 68, Curitiba, (41) 9849-6966, rrc@g5engenharia.com.br

3) Afiliação: Diretor da G5 Engenharia, rua Nunes Machado nº 68, Curitiba, (41) 99925-2649, giovanni@g5engenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

A ruptura de barragens de mineração configura um dos desastres tecnológicos mais críticos no âmbito da gestão de recursos hídricos, devido aos impactos diretos e indiretos sobre populações, ecossistemas aquáticos e usos múltiplos da água (AZAM; LI, 2010; BOWKER; CHAMBERS, 2015). Esses eventos demandam o desenvolvimento de medidas preventivas eficazes e ferramentas robustas para apoio à tomada de decisão em emergências (COSTA *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a modelagem hidrodinâmica de rompimentos tem se consolidado como instrumento fundamental para o planejamento e resposta a desastres, permitindo a simulação de cenários e avaliação dos riscos associados (ZHANG *et al.*, 2020; SAHOO *et al.*, 2018). Ferramentas computacionais como o HEC-RAS são amplamente empregadas para simulação de fluxos em barragens com acúmulo de água, dada sua robustez e ampla validação (BRUNNER, 2022).

Entretanto, a aplicação dessas ferramentas em barragens de rejeitos apresenta desafios, pois os rejeitos minerais frequentemente exibem comportamento de fluidos não newtonianos – materiais cuja viscosidade varia em função da taxa de deformação, ao contrário dos fluidos newtonianos, como a água, cuja viscosidade é constante (BARNES *et al.*, 1989). Dentre os modelos reológicos mais comuns, destaca-se o de Bingham, que representa um fluido que só escoar quando a tensão de cisalhamento supera um valor limite (CHENG, 1986).

A simplificação do escoamento desses materiais como fluido newtoniano pode comprometer a precisão das previsões de mancha de inundação, profundidade e velocidade do fluxo (GUO *et al.*, 2021). Embora versões recentes do HEC-RAS incluam opções para modelagem de fluidos não newtonianos, a confiabilidade desses recursos ainda carece de avaliações detalhadas na literatura, especialmente para rejeitos específicos como os de mineração de urânio, cujas propriedades físico-químicas podem influenciar significativamente o comportamento do fluxo (LIU *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2023).

Dessa forma, é fundamental analisar o desempenho do modelo frente a diferentes parâmetros físicos e validar os resultados com dados empíricos ou estudos de caso. Este estudo apresenta uma análise comparativa de simulações de ruptura de barragens de pequeno porte utilizando o HEC-RAS, considerando dois tipos de fluidos: água (comportamento newtoniano) e rejeitos de mineração modelados segundo o comportamento não newtoniano de Bingham. As simulações variam os coeficientes volumétricos dos rejeitos, e os resultados são avaliados em termos de mancha de inundação, profundidade, vazão e velocidade do escoamento, das quais discute-se a aplicabilidade e limitações do HEC-RAS para modelagem de rejeitos, contribuindo para a escolha adequada de ferramentas de simulação em cenários de alto risco (BRUNNER, 2022; CHENG *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2020).

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização das Barragens

O estudo foi realizado em quatro tanques dispostos em paralelo, utilizados para a disposição de rejeitos de mineração de urânio.

As barragens estão inseridas em um terreno com acentuado desnível topográfico e apresentam diferentes geometrias e capacidades volumétricas, conforme apresentado na Tabela 1. Os valores apresentados são oriundos de um levantamento topobatimétrico da área de estudo processadas no programa Qgis.

Tabela 1 – Dados morfométricos das estruturas de contenção de rejeitos

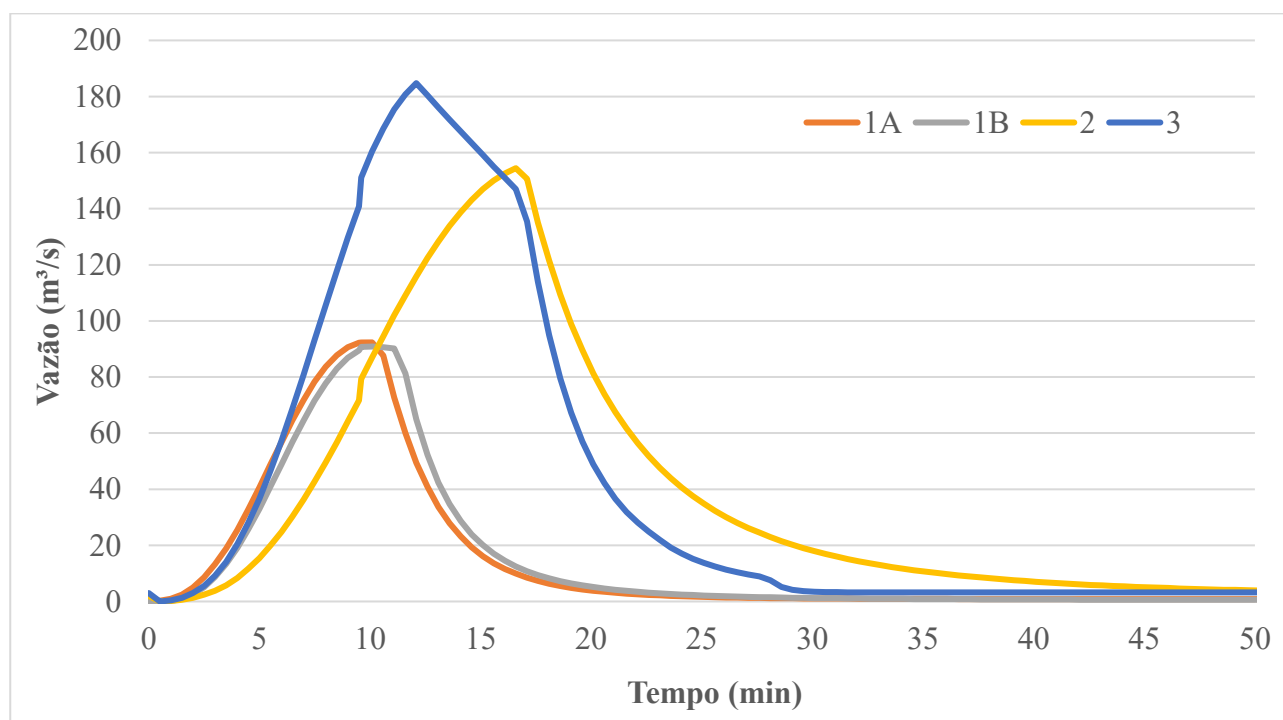
Barragem	Dimensões aproximadas		Área (m ²)	Volume (m ³)	Área de Drenagem (m ²)
	Largura (m)	Comprimento (m)			
1A	75	115	8.531	43.214	23.730
1B	70	115	8.267	46.660	15.980
2	140	115	21.775	113.304	54.380
3	150	115	18.550	125.648	99.560

Embora sejam chamadas de tanques, trata-se de estruturas de grande porte, atualmente com seus volumes máximos de rejeito preenchidos. Três das quatro barragens encontram-se com os rejeitos em estado adensado e praticamente seco, o que motivou a consideração de simulações com escoamento não newtoniano, representando o possível comportamento de uma corrida de lama induzida por precipitação extrema.

2.2. Estudo hidrológico e definição do hidrograma de ruptura

A equação IDF obtida com base em série histórica de uma estação pluviométrica localizada na área de estudo (LISBOA *et al.*), estimou-se a vazão afluente a cada barragem, apresentadas na Figura 1, pelo método racional (TUCCI, 2001), com base na respectiva área de drenagem. Em seguida foram definidos os hidrogramas de ruptura das barragens utilizando a metodologia empírica de Froehlich (1995), que fornece tempo de formação da brecha e dimensões médias da ruptura em função do volume armazenado e da altura da barragem.

Figura 1 – Hidrograma de ruptura das barragens em estudo



2.3. Configuração do modelo HEC-RAS

Para cada barragem, foi criado um projeto de simulação com escoamento não permanente (modelo *unsteady flow*) no HEC-RAS, com elementos em uma e duas dimensões:

- Topografia e geometria: foram importados modelos digitais de elevação (MDE) da área, com definição das superfícies de armazenamento (reservatórios) e dos canais de escoamento formados na eventual inundação em direção ao córrego existente;
- Condições de contorno: foi inserida uma linha de entrada de fluxo logo a jusante da barragem (no programa, identificada como *SA/2D inflow area*), onde foi aplicado o hidrograma de ruptura; na saída da área modelada, no barramento do córrego receptor, foi imposta a condição de profundidade normal (*Normal Depth*), representando o nível d'água máximo normal;
- Malha e passo de tempo: foi adotado refinamento na malha bidimensional e definição do passo de tempo com base no Critério de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), de forma a garantir a estabilidade e a acurácia da simulação hidrodinâmica, considerando a velocidade de propagação da onda de inundação e o tamanho das células da malha, conforme orientações presentes na literatura técnica (USACE, 2021).

A simulação foi conduzida por 36 horas, sendo: as primeiras 6 horas com vazão afluente crescente (representando a elevação do nível do reservatório devido a uma chuva extrema); seguidas de 6 horas com a vazão estabilizada, até o momento da ruptura; e mais 24 horas para o esvaziamento total do reservatório e propagação da onda de inundação.

2.4. Simulação hidrodinâmica dos fluidos

A simulação do escoamento foi realizada com dois tipos de fluido. Para o caso da água, assumiu-se o comportamento newtoniano, utilizando-se a configuração padrão do HEC-RAS. Já para o rejeito de mineração, optou-se pela modelagem como fluido não newtoniano do tipo Bingham, devido à sua simplicidade e à disponibilidade de parâmetros na literatura.

O modelo de Bingham requer apenas três parâmetros: tensão de escoamento, viscosidade dinâmica e concentração volumétrica de sólidos (C_v). Os dois primeiros foram fixados com base em valores médios extraídos de estudos específicos sobre rejeitos de urânio, conforme sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros reológicos de rejeitos de urânio utilizados na modelagem

Parâmetro	Valor	Referência
C_v (%)	25,48 – 31,25	Melo e Elutério (2023)
	48 - 55	Fitton e Seddon (2012)
Viscosidade (Pa.s)	0,002 - 100	Melo e Elutério (2023)
	0,004452 - 0,011251	Fitton e Seddon (2012)
Tensão de escoamento (Pa)	2,769 – 9,411	Melo e Elutério (2023)
	0,652 - 2,267	Fitton e Seddon (2012)

Adicionalmente, foram realizados testes de sensibilidade com diferentes valores de C_v (20%, 30%, 40%, 45% e 50%), todos compatíveis com a faixa típica de uma corrida de lama, conforme a classificação proposta por O'Brien e Julien (1985).

A adoção do modelo de Bingham se deve à sua compatibilidade com os dados disponíveis. Modelos mais complexos, como Herschel-Bulkley ou O'Brien & Julien, exigiriam parâmetros

adicionais, como o índice de consistência, o expoente de comportamento ou coeficientes empíricos como α , obtidos por meio de ensaios reológicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

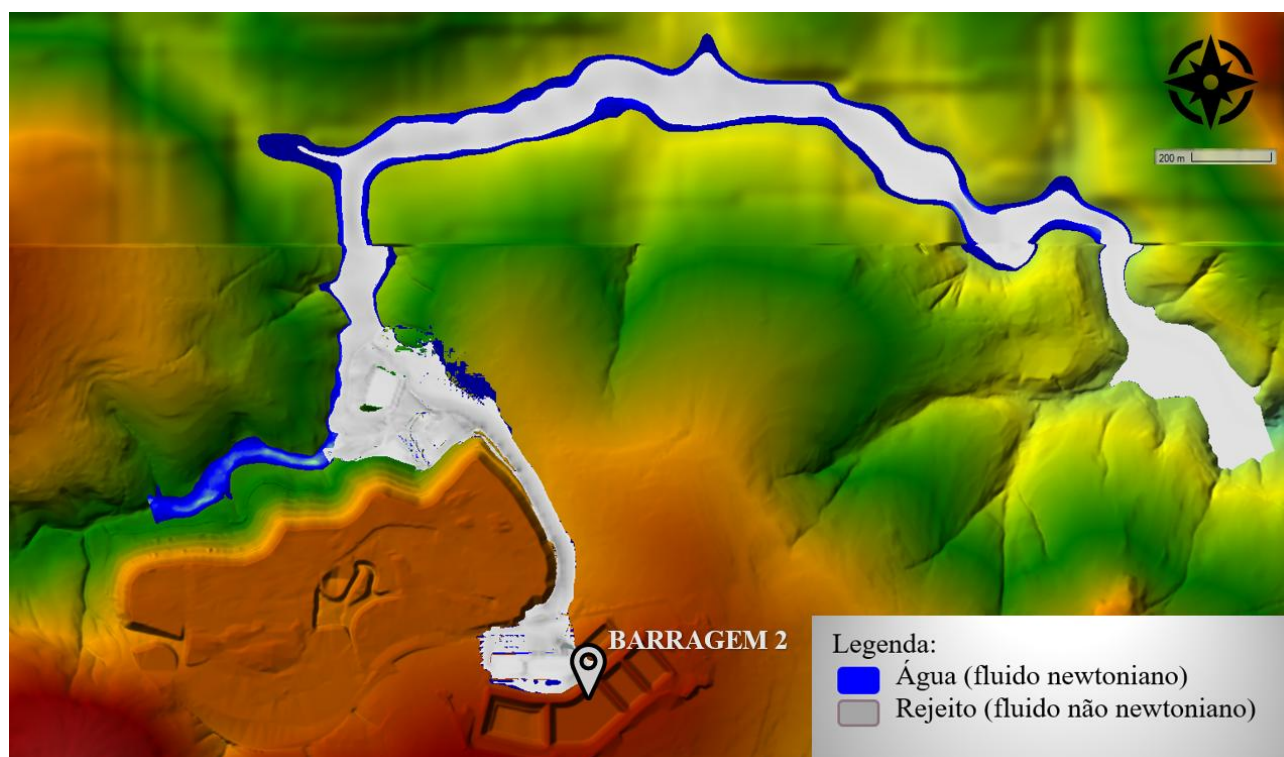
As simulações de ruptura foram realizadas para as quatro barragens avaliadas. Entretanto, apenas os resultados da Barragem 2 apresentaram coerência hidrodinâmica compatível com o comportamento físico esperado, principalmente em relação à influência do tipo de fluido sobre a velocidade de escoamento e a profundidade da lâmina. Nas barragens 1A, 1B e 3, observaram-se inconsistências, como vazões e velocidades mais elevadas nos cenários com rejeito em comparação àqueles com água, resultado que contraria a tendência natural de fluidos mais densos e viscosos apresentarem escoamentos mais lentos e menos vigorosos. Essas limitações são discutidas posteriormente, considerando tanto os limites do modelo adotado quanto a aplicabilidade do HEC-RAS para simulações com fluidos não newtonianos.

Diante disso, a análise apresentada neste trabalho concentra-se nos resultados da Barragem 2, abrangendo: a mancha de inundação simulada; a comparação dos parâmetros hidrodinâmicos (profundidade, velocidade e vazão) para os diferentes fluidos; e a avaliação do tempo de chegada da onda de cheia em uma seção anterior à confluência com o córrego existente no local, restringindo-se ao comportamento do escoamento antes da mistura entre fluidos newtoniano e não newtoniano.

No que se refere aos resultados das simulações com fluido não newtoniano, optou-se por apresentar apenas o cenário com concentração volumétrica de sólidos (C_v) igual a 50%, por ter sido aquele que apresentou maior discrepância em relação ao escoamento com água. Além disso, esse valor representa o limite superior para a caracterização de uma corrida de lama, conforme proposto por O'Brien e Julien (1985). Os demais cenários testados, com C_v variando entre 20% e 45%, resultaram em diferenças pouco significativas nos parâmetros hidrodinâmicos simulados. Esse comportamento está em consonância com os achados de Rocha *et al.* (2023), que também identificaram baixa sensibilidade do escoamento a variações moderadas nos parâmetros reológicos em trechos iniciais de propagação do fluxo de rejeitos.

A Figura 2 apresenta a comparação da mancha de inundação resultante da ruptura da Barragem 2 nos cenários com fluido newtoniano (água) e fluido não newtoniano (rejeito com C_v de 50%).

Figura 2 – Mancha de inundação da Barragem 2



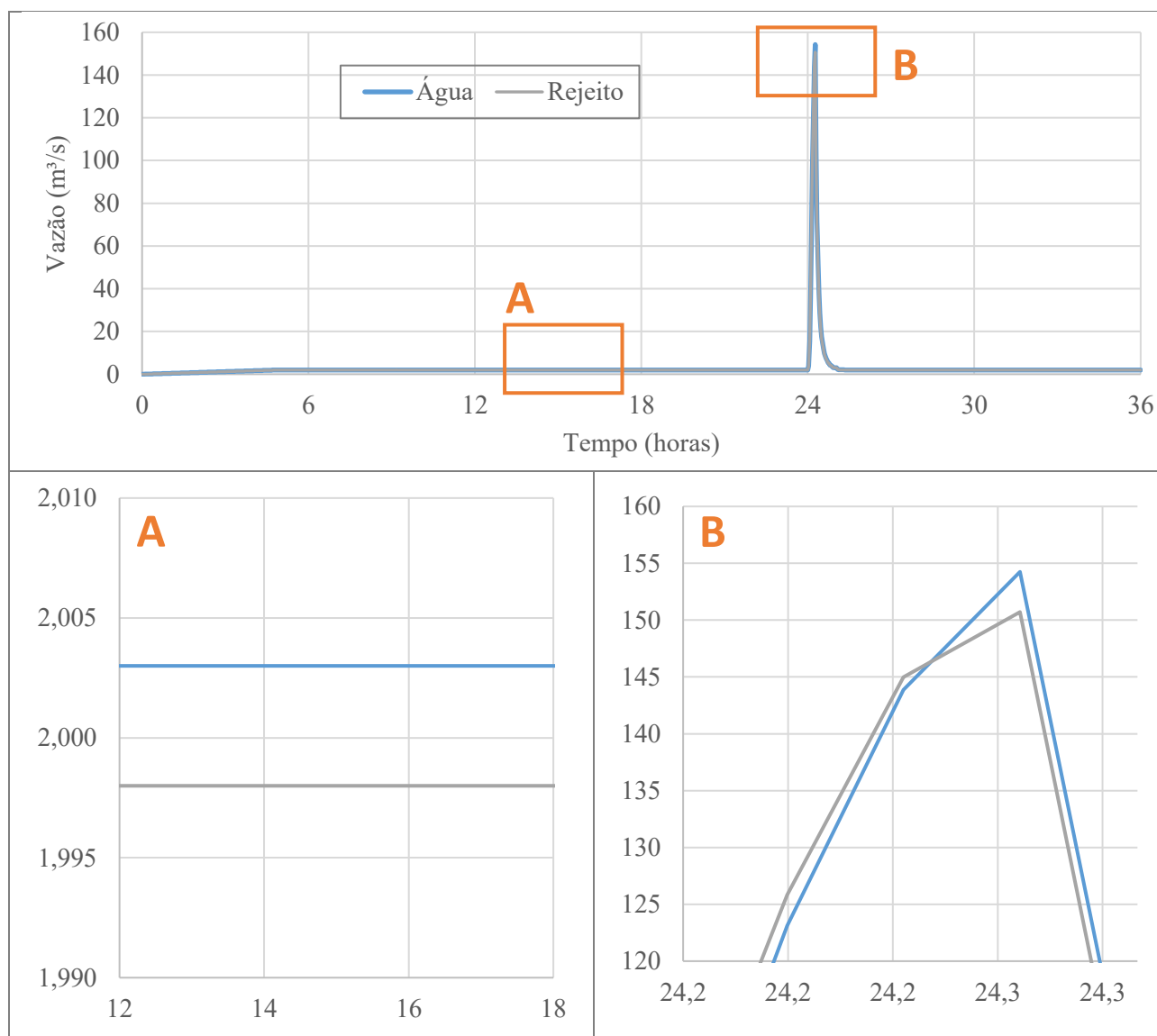
Observa-se que a mancha de inundação simulada com água (fluido newtoniano) apresenta área total de 89,9 km², enquanto a mancha resultante da simulação com rejeito (fluido não newtoniano, $C_v = 50\%$) corresponde a 73,6 km², resultando em uma diferença absoluta de 16,3 km² e uma diferença percentual de 18,1%. Essa variação, embora existente, é pequena e condiz com o comportamento físico esperado, considerando que fluidos mais viscosos e densos, como os rejeitos simulados, tendem a apresentar menor mobilidade e menor espalhamento lateral.

A ligeira ampliação da mancha associada à água reflete sua menor resistência ao escoamento, favorecendo maior velocidade e alcance. Já no caso do rejeito, a presença de tensão de escoamento e maior viscosidade limita a propagação, concentrando o fluxo em um canal mais estreito e com menor extensão lateral. Esse comportamento está em conformidade com o observado por outros autores (PINHEIRO *et al.*, 2014), que destacam que as diferenças hidrodinâmicas entre fluidos com distintas concentrações volumétricas de sólidos tendem a ser discretas, especialmente nos trechos iniciais do escoamento e quando os demais parâmetros reológicos são mantidos constantes. Dessa forma, embora o tipo de fluido influencie a morfologia da mancha, seu impacto sobre a área total inundada mostrou-se relativamente limitado no contexto analisado.

3.1. Parâmetros hidrodinâmicos da Barragem 2

A Figura 3 apresenta os hidrogramas simulados para a água (fluido newtoniano) e para o rejeito (fluido não newtoniano com $C_v = 50\%$), incluindo dois trechos ampliados: o intervalo anterior à ruptura (área A) e o pico da onda de cheia (área B). Em ambos os casos, nota-se que os valores de vazão da água superam os do rejeito, ainda que com diferenças muito discretas, motivo pelo qual foi necessária a ampliação dos gráficos para permitir uma análise comparativa mais precisa.

Figura 3 – Hidrograma de ruptura da barragem 2 para água (fluido newtoniano) e rejeito (fluido não newtoniano)



No entanto, observa-se um comportamento peculiar no intervalo imediatamente anterior ao pico (início da área B), quando a vazão do rejeito se apresenta ligeiramente superior à da água. Uma possível explicação para esse fenômeno está relacionada à dinâmica do escoamento: como a água possui menor viscosidade e, portanto, maior velocidade, tende a escoar mais rapidamente, o que pode resultar em uma seção transversal mais estreita da onda em formação. Por outro lado, o rejeito, devido à sua maior viscosidade e resistência ao escoamento, forma uma onda mais lenta, porém com maior espessura (profundidade), o que pode aumentar temporariamente a área molhada e, consequentemente, a vazão naquele instante. Embora essa hipótese esteja alinhada com princípios hidrodinâmicos básicos, como a proporcionalidade entre área de seção e vazão, trata-se de uma inferência ainda dependente de validação empírica ou modelagens mais avançadas, sendo aqui apresentada como uma interpretação plausível para o comportamento observado.

A Tabela 3 resume os valores obtidos para profundidade, velocidade e vazão de pico na seção localizada 25 metros a jusante da barragem, considerada representativa por apresentar o maior contraste entre os diferentes cenários simulados. Para ambos os fluidos e nos três parâmetros avaliados, os valores máximos ocorreram no mesmo tempo, 16 min após o rompimento.

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros hidrodinâmicos na seção 25 metros a jusante da Barragem 2

Tipo de Fluido	Profundidade máxima (m)	Velocidade máxima (m/s)	Vazão máxima (m³/s)
Água (newtoniano)	0,99	2,0	154
Rejeito (não newtoniano)	0,91	1,8	151

Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstram um comportamento hidrodinâmico coerente com as propriedades físicas dos fluidos simulados. O rejeito (fluido não newtoniano) apresentou menor velocidade máxima (1,8 m/s) e profundidade ligeiramente inferior (0,91 m) em comparação à água (2,0 m/s e 0,99 m), resultando também em uma leve redução da vazão de pico (151 m³/s contra 154 m³/s). Essas diferenças, embora sutis, são consistentes com os efeitos da maior viscosidade e da tensão de escoamento do rejeito, que tendem a reduzir a mobilidade do fluido e atenuar sua propagação.

3.2. Debilidades da Modelagem

As simulações realizadas para as barragens 1A, 1B e 3 apresentaram resultados aparentemente coerentes quando analisadas em escala geral, tanto no que se refere às manchas de inundação quanto aos hidrogramas. De fato, como demonstrado nas Figuras 3 e 4, devido às características físicas dessas estruturas, como o reduzido volume de reservação, a baixa altura dos barramentos e a localização fora do leito principal do curso d'água, não se verificaram diferenças significativas entre os cenários com água e com rejeito nos mapas de inundação nem nos hidrogramas principais. No entanto, análises mais refinadas e ampliações dos resultados numéricos revelaram discrepâncias importantes em pontos específicos, como variações mínimas, porém sistemáticas, nas velocidades e vazões. Embora essas variações não comprometam a definição de áreas de mancha ou zonas de autossalvamento (ZAS), sua análise se mostra relevante do ponto de vista científico, especialmente para compreender o desempenho da modelagem reológica e as limitações associadas ao uso do HEC-RAS para fluidos não newtonianos.

Nos cenários simulados para essas três barragens, verificou-se que em determinados trechos o rejeito apresentava vazões e velocidades superiores às da água, o que contraria o comportamento físico esperado para fluidos com maior viscosidade e tensão de escoamento. Como os parâmetros reológicos foram fixados com base em literatura técnica especializada e as configurações do modelo seguiram as recomendações do manual do HEC-RAS, essas inconsistências são atribuídas, majoritariamente, a limitações da ferramenta na representação de escoamentos densos com comportamento não newtoniano. Assim, os resultados servem como alerta e base técnica para futuros estudos que venham a adotar essa metodologia, seja para garantir a obtenção de simulações fisicamente plausíveis, seja para identificar fatores que possam gerar distorções nos resultados.

4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que, embora o HEC-RAS ofereça recursos para a modelagem de fluidos não newtonianos, sua aplicação na simulação de rupturas de barragens com rejeitos deve ser feita com cautela. As simulações realizadas para a Barragem 2 apresentaram resultados hidrodinamicamente coerentes com os princípios físicos esperados, com pequenas variações entre os cenários com água e rejeito, notadas principalmente em análises ampliadas dos dados. Por outro lado, as barragens 1A, 1B e 3 apresentaram inconsistências nos resultados, com

discrepâncias entre a natureza do fluido e os valores obtidos de velocidade e vazão. Essas inconsistências, embora imperceptíveis nas manchas de inundação e nos hidrogramas em escala geral, tornam-se relevantes ao se analisar valores pontuais, que podem influenciar decisões importantes como a definição de zonas de autossalvamento (ZAS). Assim, mesmo em casos em que a diferença visual dos resultados seja pequena, a análise aprofundada justifica-se no contexto técnico-científico, contribuindo para a avaliação da aplicabilidade e das limitações do HEC-RAS em simulações com rejeitos de mineração.

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas, recomenda-se cautela na aplicação do HEC-RAS para simulações de ruptura de barragens contendo rejeitos. A escolha do modelo reológico deve considerar a disponibilidade e a confiabilidade dos parâmetros físicos do fluido, priorizando, sempre que possível, dados experimentais ou literatura específica para o tipo de rejeito estudado. Embora o modelo de Bingham seja amplamente utilizado devido à sua simplicidade e menor número de parâmetros exigidos, ele pode não representar adequadamente certos materiais com comportamento não linear, sendo, nesses casos, mais apropriado o uso de modelos como Herschel-Bulkley ou O'Brien. Também se recomenda realizar testes de sensibilidade com diferentes valores de concentração volumétrica de sólidos (C_v), mesmo quando os resultados parecem apresentar baixa variação, pois essas análises são fundamentais para compreender o comportamento do sistema e para subsidiar decisões em contextos de risco.

Além disso, é essencial que os usuários verifiquem atentamente a inserção dos dados no modelo, evitando erros como a utilização incorreta da unidade do C_v (por exemplo, fração decimal em vez de porcentagem) e a configuração inadequada do método de bulking, que pode comprometer os volumes simulados. O uso de malhas pouco refinadas e de passos de tempo mal configurados também pode introduzir artefatos nos resultados, especialmente em cenários com múltiplos compartimentos ou relevo acidentado. Por fim, destaca-se que mesmo simulações que resultem em diferenças visuais discretas podem conter variações hidrodinâmicas significativas em valores pontuais, com impacto direto em definições como a Zona de Autossalvamento (ZAS), o que reforça a necessidade de uma análise crítica dos resultados e do reconhecimento das limitações da ferramenta, sobretudo quando aplicada à modelagem de fluidos não newtonianos em barragens de maior porte, especialmente em termos de volume e altura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à G5 Engenharia pelo respaldo técnico e institucional oferecido durante o desenvolvimento deste estudo, bem como pelo incentivo a publicação e à participação em eventos técnicos e acadêmicos.

REFERÊNCIAS

- AZAM, S.; LI, Q. (2010). “*Tailings dam failures: a review of the last one hundred years*”. Geotechnical News, v. 28, n. 4, pp. 50–53.
- BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M. (2015). “*The risk, public liability, and economics of tailings storage facility failures*”. Natural Resources Research, v. 24, n. 4, pp. 437–454.
- BRUNNER, G. W. (2022). *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.

- CHENG, Y.; LI, X.; WANG, J. (2017). “Numerical simulation of non-Newtonian fluid flow in tailings dam break scenarios”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 143, n. 5, 04017010.
- COSTA, J. F. *et al.* (2021). “Emergency management and risk assessment of mining dam failures: a review”. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 12, pp. 14845–14860.
- FITTON, T.G.; SEDDON, K.D. (2012) “Relating Atterberg limits to rheology”. In: JEWELL, R.J.; FOURIE, A.B.; PATERSON, A. (eds.). *Proceedings of the 15th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2012. p. 271–284.
- GUO, H. *et al.* (2021). “Modeling tailings dam break flows with non-Newtonian rheology: challenges and perspectives”. *Environmental Modelling & Software*, v. 137, 104974.
- GUO *et al.* (2021). “Numerical simulation of tailings flow based on non-Newtonian fluid theory”. *Advances in Civil Engineering*, v. 2021, p. 1–13.
- LIU. *et al.* (2022). “Rheological characterization and numerical modeling of uranium mining tailings flow”. *Journal of Hazardous Materials*, v. 424, 127384.
- MELO, M.; ELEUTÉRIO, J. (2023). “Probabilistic analysis of floods from tailings dam failures: a method to analyze the impact of rheological parameters on the HEC-RAS Bingham and Herschel-Bulkley models”. *Water*, v. 15, p. 2866.
- PINHEIRO *et al.* (2014). “Estudo fluidodinâmico do escoamento e análise da queda de pressão de fluidos não-newtonianos em seções anulares”. *Blucher Engineering Proceedings*, v.1, n. 2.
- ROCHA *et al.* (2023). “O avanço dos estudos de ruptura hipotética das barragens de mineração no Brasil” in *Anais do XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Foz do Iguaçu, 2023.
- SAHOO *et al.* (2018). “Dam-break flood simulation using hydrodynamic modeling and GIS: A case study”. *Journal of Hydrology*, v. 566, pp. 668–681.
- SAHOO, B. *et al.* (2018). “Advances in dam break flow modeling: a review”. *Water*, v. 10, 1397.
- SILVA, R. A. *et al.* (2023). “Assessment of hydrodynamic models for uranium tailings dam break scenarios”. *Journal of Environmental Management*, v. 324, 116449.
- SINGH, R. *et al.* (2019). “Rheological properties of mining tailings and their impact on dam break flow modeling”. *Powder Technology*, v. 349, pp. 1–11.
- TUCCI, C. E. M. (2001). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 943 p.
- ZHANG, L. *et al.* (2020). “Hydrodynamic modeling of tailings dam failure using advanced computational tools”. *Computers & Geosciences*, v. 135, 104383.
- ZHANG *et al.* (2020). “Numerical simulation of tailings dam break and flood routing using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method”. *International Journal of Sediment Research*, v. 35, n. 2, pp. 165–174.