

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

# INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE BRECHA E PARÂMETROS REOLÓGICOS NA DEFINIÇÃO DA ZONA DE AUTOSALVAMENTO DE UMA BARRAGEM DE MINERAÇÃO

*Pedro de Carvalho Thá<sup>1</sup> ; André Luiz Tonso Fabiani<sup>2</sup>*

**Abstract:** Following recent tailings dam failures in Brazil, federal and state legislation in has begun to require hypothetical dam breach studies considering the behavior of non-Newtonian fluids for the reservoir's tailings, where applicable. In addition to rheological parameters, there are other aspects related to dam breaches that also influence the extent and arrival time of the breach wave in the potentially affected downstream area, such as failure mode, breach parameters, and reservoir volume. This study evaluates the impact of different failure modes (piping, overtopping, and liquefaction), with variations in breach parameters, as well as variations in rheological parameters on the extent of the self-rescue zone (ZAS) and on hydraulic variables of interest (arrival time, peak arrival time, maximum velocity, and maximum height) for the case of a mining dam. The results indicate that the rheological parameters had a very limited influence on the definition of the ZAS and on the hydraulic variables of interest for the scenarios evaluated. No significant differences were observed between the results for piping and overtopping failure modes, assuming the same exceedance probability for peak flow in the breach hydrograph definitions. A significant influence of the breach hydrographs on hydraulic variables was observed when using exceedance probability criteria for peak flow. The liquefaction failure mode has a significant impact on both the definition of the SRZ and on the hydraulic variables of interest.

**Resumo:** Após as recentes rupturas de barragens de rejeito no Brasil, a legislação federal e estadual em vários estados passou a exigir a realização de estudos de ruptura hipotética de barragens considerando o comportamento de fluidos não Newtonianos para os rejeitos do reservatório, caso aplicável. Além dos parâmetros reológicos, existem outros aspectos relacionados à ruptura de barragens que também influem na extensão e tempo de chegada da onda de ruptura na zona potencialmente afetada a jusante, como modo de falha, parâmetros de brecha e volume do reservatório. Este trabalho avalia o impacto de diferentes modos de falha (piping, galgamento e liquefação), com suas variações de parâmetros de brecha, e de variações nos parâmetros reológicos na extensão da zona de autossalvamento (ZAS) e em variáveis hidráulicas de interesse (tempo de chegada, tempo de chegada do pico, velocidade máxima e altura máxima) para o caso de uma barragem de mineração. Os resultados obtidos indicam que os parâmetros reológicos apresentaram influência bastante reduzida tanto na definição da ZAS quanto nas variáveis hidráulicas de interesse para os casos avaliados. Também não se observou diferenças relevantes entre os resultados dos casos de piping e galgamento, considerando uma mesma probabilidade de excedência para a vazão de pico na definição dos hidrogramas de ruptura. Observou-se influência significativa dos hidrogramas de ruptura nas variáveis hidráulicas quando se utiliza critérios de probabilidade de excedência para a

1) Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico, Bloco V Jardim das Américas – CURITIBA. Telefone:(41) 3361-3210 E-mail: [pedro.tha@gmail.com](mailto:pedro.tha@gmail.com); aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA).

2) Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico, Bloco V Jardim das Américas – CURITIBA. Telefone:(41) 3361-3209 E-mail: [andre.dhs@ufpr.br](mailto:andre.dhs@ufpr.br); Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA).

vazão de pico. O modo de falha liquefação influi significativamente tanto na definição da ZAS quanto nas variáveis hidráulicas de interesse.

**Palavras-Chave** – Ruptura de barragens, fluidos não Newtonianos, ZAS – Zona de Autossalvamento

## INTRODUÇÃO

Após a ruptura da barragem B1 do Córrego do Feijão, que ocorreu em janeiro de 2019, resultando na propagação de aproximadamente 12 Mm<sup>3</sup> de rejeitos no vale a jusante, houve várias alterações nas legislações federal e estaduais referentes à segurança de barragens de mineração. Uma dessas alterações, que consta na resolução 95/2022 da Agência Nacional de Mineração (atualizada pelas resoluções 130/2023 e 175/2024), indica a necessidade de realização de caracterização reológica do material do reservatório das barragens de mineração.

Essa caracterização reológica tem por objetivo permitir a utilização de parâmetros de fluidos não Newtonianos (caso aplicável) no estudo de propagação da onda de ruptura em estudos de ruptura hipotética de barragens.

O objetivo da indicação dessa caracterização é buscar maior representatividade para a definição da mancha de inundação e do risco associado. De acordo com a resolução 95/2022 da ANM, a Zona de Autossalvamento (ZAS) é definida como o trecho do vale à jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência. A ZAS é, portanto, do ponto de vista de segurança para vidas humanas, a área da mancha de inundação mais crítica potencialmente afetada pela ruptura de uma barragem.

A definição da ZAS deve ser feita adotando-se a maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 (trinta) minutos ou 10 km (dez quilômetros).

Para que seja possível avaliar a extensão da mancha de ruptura e tempos de chegada da onda de inundação, é necessário que seja realizado estudo de ruptura hipotética. Existem diretrizes técnicas internacionais para a elaboração de estudos de ruptura de barragens, como FEMA (2013) e CDA (2021). Recentemente, foi elaborada uma norma brasileira, a NBR 17188:2024, que apresenta as diretrizes para a elaboração de estudos de ruptura de barragens.

O guia para a elaboração de estudos de ruptura de barragens de rejeito do Canadian Dam Association (CDA, 2021) e a NBR 17188 indicam que os estudos de ruptura de barragens devem avaliar a concentração volumétrica de sólidos do volume potencialmente mobilizável e classificar o fluido como Newtoniano ou Não-Newtoniano. Para fluidos que sejam classificados como Não-Newtonianos, indica-se a realização de ensaios para a caracterização reológica.

Para que seja feita a caracterização reológica do fluido potencialmente propagado em caso de ruptura de barragens de mineração, é necessário coleta do material do reservatório e realização de ensaios de laboratório. Dependendo das condições do reservatório e do estado de compactação dos rejeitos, a coleta de materiais pode se tornar uma atividade bastante complexa e demorada.

Estudo de sensibilidade realizado por Ghahramani *et. al.* (2024), indica que os parâmetros reológicos apresentam influência muito pequena na extensão e dinâmica da onda de ruptura de barragens. Considerando os resultados apresentados por Ghahramani *et. al.* (2024), levanta-se a hipótese de que os parâmetros reológicos podem não ser as variáveis mais importantes na dinâmica

da propagação da onda de ruptura de uma barragem de mineração, especialmente para a avaliação da ZAS. Outras variáveis, como os hidrogramas de ruptura e modos de falha poderiam ser mais importantes e não recebem a devida indicação de importância em documentos normativos.

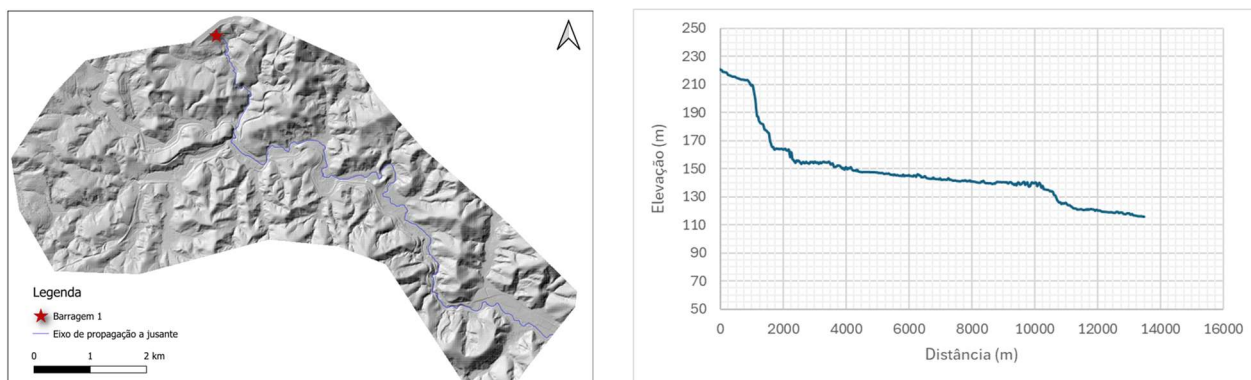
O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência de parâmetros reológicos, parâmetros de brecha e modos de falha (*piping*, galgamento e liquefação) na dinâmica da propagação da onda de ruptura de uma barragem de mineração.

## METODOLOGIA

A barragem objeto do estudo é uma barragem de rejeitos, localizada no quadrilátero-ferrífero, no estado de Minas Gerais. Essa barragem armazena rejeitos de minério de ferro e água para processos industriais. Possui 68 m de altura e armazena tanto rejeitos de minério de ferro quanto água para processos industriais. O volume total até a crista é de 66,7 Mm<sup>3</sup>, sendo 52,2 Mm<sup>3</sup> de rejeitos e 14,4 Mm<sup>3</sup> de água.

A topografia da área de jusante utilizada no estudo foi obtida por aerolevantamento a laser em escala 1:5000. A nuvem de pontos do aerolevantamento foi convertida em um arquivo do tipo *raster* (geotiff) com resolução de 1 m. Essa resolução é compatível com a densidade de pontos do aerolevantamento. A Figura 1 abaixo mostra a topografia da área a jusante considerada no estudo e o perfil pelo eixo de propagação a jusante.

Figura 1 – Topografia do vale a jusante e perfil pelo eixo de propagação a jusante



O estudo realizado avaliou a ruptura da barragem por 3 causas distintas: *piping*, galgamento e liquefação. Galgamento e *piping* são os modos de falha mais frequentes em barragens, segundo ICOLD (2019) e Piciullo *et. al.* (2022) e liquefação é o modo de falha que resulta no hidrograma mais severo a jusante.

Para os modos de falha galgamento e *piping*, os parâmetros de brecha foram avaliados a partir dos parâmetros médios e da variância apresentados por Froehlich (2008). Para cada um desses modos de falha, considerou-se que o início da abertura da brecha ocorreria com o nível de água na cota da crista da barragem, o que corresponde ao máximo volume armazenado. Com as informações apresentadas por Froehlich (2008), para os dois modos de falha, calculou-se a média e o desvio padrão dos parâmetros de brecha, como mostrado na

Tabela 1. Para o modo de falha *piping*, outro parâmetro necessário é a elevação a partir da qual se considera que pode ser iniciado o processo.

Com os parâmetros indicados na Tabela 1, foram realizadas análises probabilísticas no software HEC-HMS, pelo método de Monte Carlo. Foram simuladas 1000 combinações de parâmetros de brecha para cada modo de falha, considerando que os parâmetros apresentam distribuição normal. Para a elevação do *piping*, considerou-se que poderia variar desde o ponto mais baixo da fundação

até 2/3 da altura da barragem. O valor médio considerado foi a elevação média dentro do intervalo entre o ponto mais baixo e o limite de 2/3 da altura da barragem. A frequência acumulada da vazão de pico obtida nas análises probabilísticas é indicada na Figura 2. São indicadas linhas com frequência acumulada de 50%, 84% e 95%. Os parâmetros de brecha que resultaram nas vazões de pico com probabilidade de 50%, 84% e 95% são indicados nas Tabelas 2 e 3. Os hidrogramas de ruptura correspondentes são mostrados na Figura 3.

Tabela 1 – Parâmetros de brecha para galgamento e *piping*

| Modo de falha | Inclinação dos taludes laterais (Z:1V) | Largura da base (m)               | Tempo de formação (horas)         |
|---------------|----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|               | Média/Mínimo/Máximo/Desvio padrão      | Média/Mínimo/Máximo/Desvio padrão | Média/Mínimo/Máximo/Desvio padrão |
| Galgamento    | 1,0/0,19/5,38/1,46                     | 64,5/5,0/272,5/48,2               | 2,42/1,20/5,00/0,64               |
| <i>Piping</i> | 0,7/0,13/3,72/0,91                     | 54,3/5,0/212,4/36,7               | 2,42/1,1/5,2/0,68                 |

Figura 2 – Frequência acumulada e vazão de pico para os modos de falha galgamento e *piping*

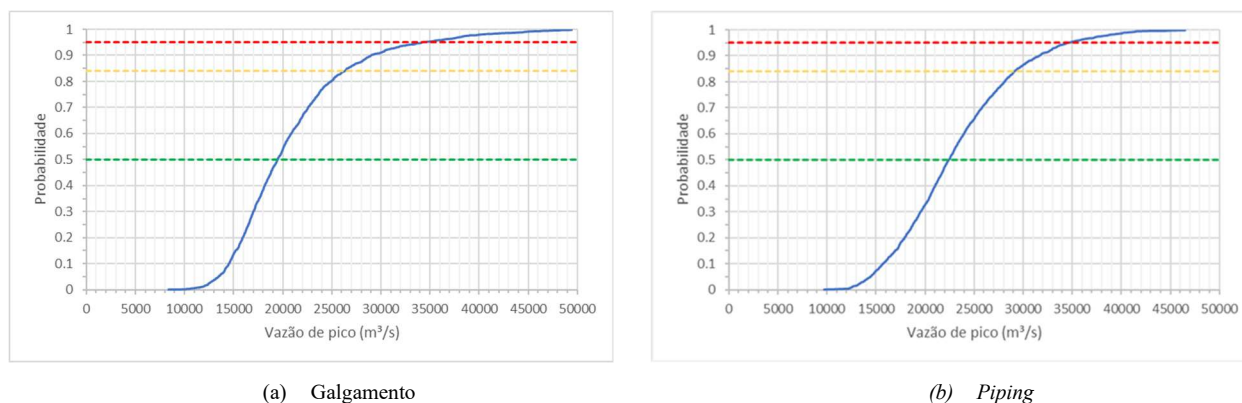


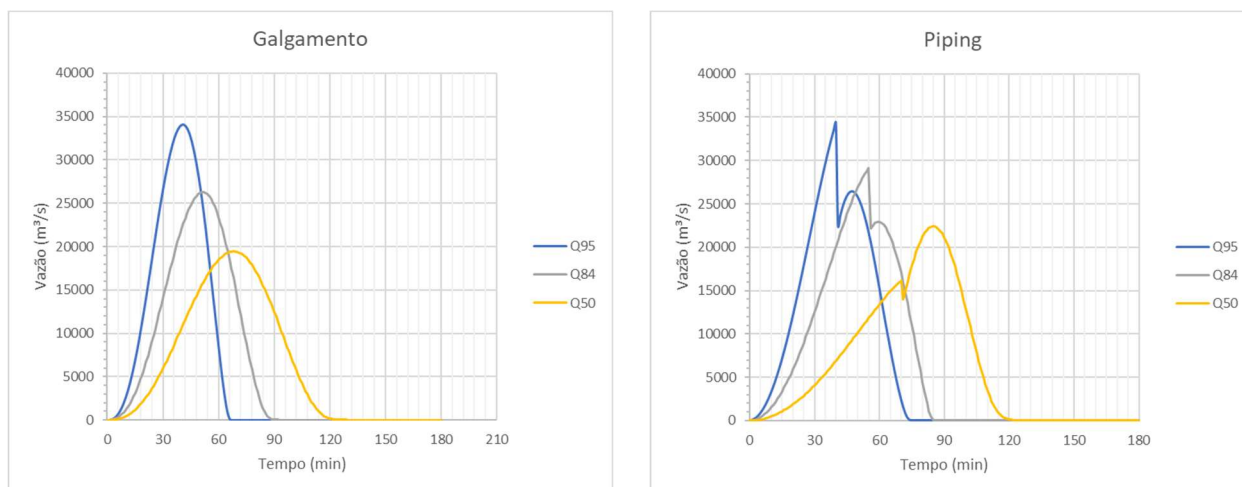
Tabela 2 - Parâmetros de brecha para galgamento

| Frequência acumulada (%) | Vazão de pico (m³/s) | B (m)  | tf (h) | Ze (h:1) | Zd (h:1) |
|--------------------------|----------------------|--------|--------|----------|----------|
| 95                       | 34,092               | 48,713 | 1,092  | 1,024    | 1,008    |
| 84                       | 26,272               | 42,136 | 1,697  | 0,863    | 2,513    |
| 50                       | 19,444               | 32,653 | 2,415  | 1,989    | 1,221    |

Tabela 3 - Parâmetros de brecha para *piping*

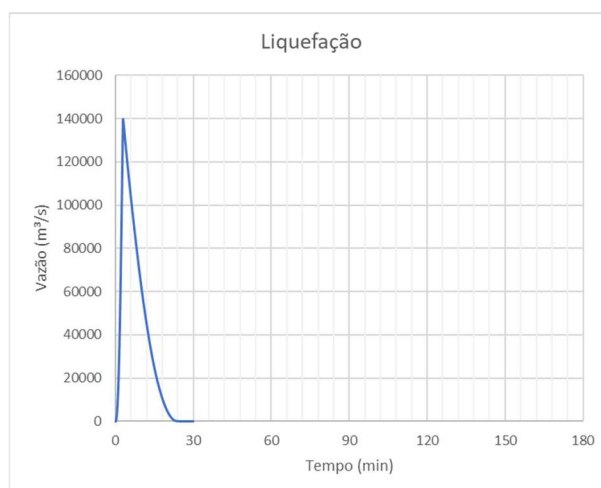
| Frequência acumulada (%) | Vazão de pico (m³/s) | B (m)  | tf (h) | Ze (h:1) | Zd (h:1) | El. Piping (m) |
|--------------------------|----------------------|--------|--------|----------|----------|----------------|
| 95                       | 34,401               | 39,682 | 1,111  | 0,439    | 0,713    | 226,13         |
| 84                       | 29,094               | 46,999 | 1,677  | 0,676    | 0,601    | 241,55         |
| 50                       | 22,413               | 38,276 | 2,46   | 2,066    | 1,884    | 255,14         |

Figura 3 – Hidrogramas de ruptura para galgamento e *piping*



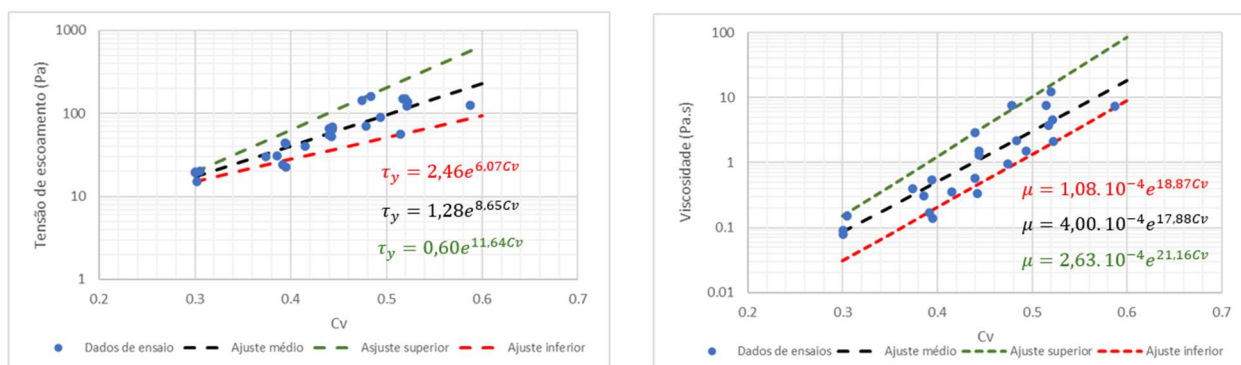
Para o modo de falha liquefação, a legislação vigente no Brasil, mais especificamente a resolução 95/2022, modificada pelas resoluções 130/2023 e 175/2024 da ANM, indica que deve ser considerada a mobilização máxima fisicamente possível do maciço da barragem e dos rejeitos do reservatório. Como a liquefação é um fenômeno de ruptura frágil, não existe metodologia que permita avaliar o tempo de ocorrência. Sendo assim, é prática considerar que o maciço é mobilizado de forma instantânea. Esse fenômeno não pode ser reproduzido de forma adequada no software HEC-HMS, pois a evolução temporal da abertura de brecha é discretizada em passos de tempo mínimos de 1 minuto. Por esse motivo, o hidrograma de ruptura por liquefação foi avaliado com o software HEC-RAS, removendo-se o maciço da barragem instantaneamente e mobilizando-se o volume do reservatório. O hidrograma de ruptura obtido é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Hidrograma de ruptura por liquefação



Os parâmetros reológicos do rejeito foram avaliados através de ensaios de laboratório com reômetro de palheta realizados em amostras coletadas no reservatório. Com os dados experimentais, foram ajustadas 3 curvas para a tensão de escoamento e para a viscosidade dinâmica, sendo uma curva de ajuste médio, um limite superior e um limite inferior. As curvas ajustadas e suas equações são mostradas na Figura 5.

Figura 5 – Curvas de tensão de escoamento e viscosidade dinâmica em função da concentração volumétrica de sólidos



Os valores de coeficiente de Manning considerados no estudo, em função da região do modelo são mostrados na Tabela 4.

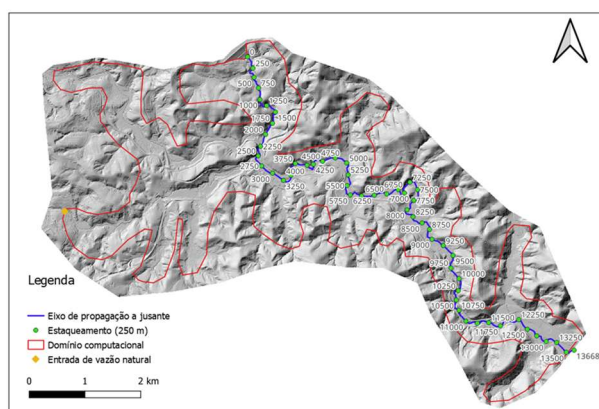
Tabela 4 – Coeficiente de Manning considerado no estudo

| Região             | Valor base | Limite superior |
|--------------------|------------|-----------------|
| Calha fluvial      | 0,025      | 0,035           |
| Vegetação densa    | 0,080      | 0,120           |
| Vegetação rasteira | 0,040      | 0,060           |
| Área urbana        | 0,100      | 0,100           |

A avaliação da propagação da onda de ruptura foi realizada no software Riverflow2D, v8.15.02, utilizando-se o módulo *Mud and Tailings*, que é o módulo que permite a consideração de fluidos não Newtonianos. O domínio computacional foi discretizado com malha triangular de 20 m de tamanho máximo na área mais geral e refinada com tamanho de 3 m ao longo do eixo de propagação, resultando em um total de 156.578 elementos triangulares, com tamanho médio de 15 m. Foi considerada uma vazão natural no curso de água a jusante, com valor de 70 m<sup>3</sup>/s (TR de 100 anos).

Para facilitar a avaliação dos resultados, foram locados pontos a cada 250 m ao longo do eixo de propagação a jusante. A Figura 6 mostra a extensão do domínio computacional e os pontos de avaliação dos resultados.

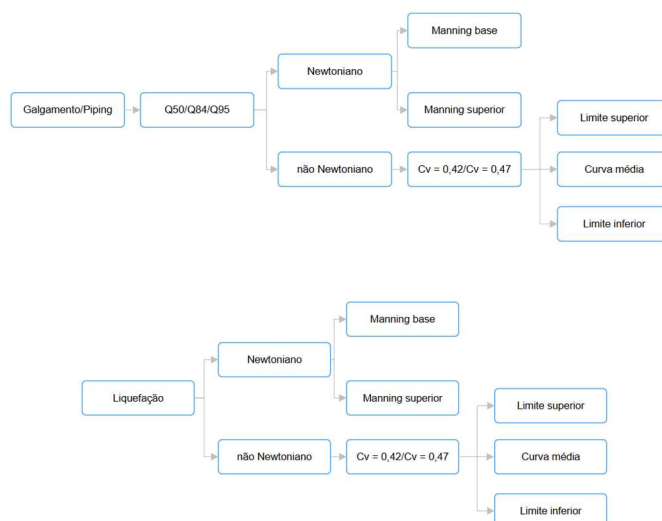
Figura 6 – Domínio computacional da área de estudo



Para a avaliação da influência de cada um dos parâmetros avaliados na onda de propagação, foram realizadas um total de 56 simulações numéricas. Para cada modo de falha, e hidrograma, avaliou-se um caso base, que considera o coeficiente da Manning base e o fluido como Newtoniano (água). Variou-se esse caso base considerando a concentração volumétrica de sólidos inferior do

reservatório ( $C_v = 0,42$ ) e os parâmetros reológicos referentes à curva inferior, média e superior. Posteriormente, considerou-se a concentração volumétrica de sólidos superior do reservatório ( $C_v = 0,47$ ), com as curvas inferior, média e superior dos parâmetros reológicos. A Figura 7 ilustra as análises realizadas. Todas as análises de fluido não Newtoniano foram realizadas com os coeficientes de Manning do caso base.

Figura 7 – Fluxograma das análises realizadas



## RESULTADOS

A avaliação dos resultados foi feita inicialmente analisando-se, para um mesmo modo de falha, e mesmo hidrograma, qual a variação percentual no tempo de chegada da onda com relação ao caso tomado como sendo o caso base, que é o caso de fluido Newtoniano. Essa avaliação foi feita com os resultados em cada uma das estacas espaçadas a cada 250 m ao longo do eixo de propagação a jusante. Para exemplificar a avaliação, a Tabela 5 mostra o tempo de chegada, em minutos, da onda de ruptura, na estaca localizada a 250 m a jusante do pé da barragem, para o modo de falha galgamento, para o hidrograma de brecha referente à vazão de pico com frequência acumulada de 50%.

O tempo de chega do caso base foi de 6,28 minutos. O máximo tempo de chegada foi de 6,95 minutos, que corresponde ao caso de  $C_v = 0,47$ , com parâmetros da curva de limite superior. O mínimo tempo de chegada (excluindo-se o caso base) foi de 6,61 minutos. A variação percentual, entre os valores máximos e mínimos observados, em relação ao caso base, foi de  $(6,95-6,61)/6,28 = 5,4\%$ . Essa avaliação permite identificar qual a influência dos parâmetros reológicos para um mesmo hidrograma.

Tabela 5 – Tempo de chegada (minutos) para modo de falha galgamento, com vazão de pico com frequência acumulada de 50%

| Estaca | Galgamento                           |                                          |                                       |                                          |                                          |                                       |                                          |                                          |
|--------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|        | Q50<br>Newtoniano<br>Manning<br>base | Q50 $C_v =$<br>0,42<br>Curva<br>Inferior | Q50 $C_v =$<br>0,42<br>Curva<br>Média | Q50 $C_v =$<br>0,42<br>Curva<br>Superior | Q50 $C_v =$<br>0,47<br>Curva<br>Inferior | Q50 $C_v =$<br>0,47<br>Curva<br>Média | Q50 $C_v =$<br>0,47<br>Curva<br>Superior | Q50<br>Newtoniano<br>Manning<br>Superior |
| 250    | 6,28                                 | 6,61                                     | 6,67                                  | 6,75                                     | 6,61                                     | 6,73                                  | 6,95                                     | 6,68                                     |

Posteriormente, para avaliar a influência dos diferentes hidrogramas de ruptura, comparou-se os resultados do tempo de chegada da onda, nas mesmas estacas, entre os resultados dos diferentes modos de falha e diferentes hidrogramas para o caso de modo de falha galgamento, com vazão com probabilidade de 50%, selecionado como o caso de referência. A comparação foi feita sempre para o caso de fluido Newtoniano, com coeficiente de rugosidade de Manning base. A avaliação foi feita também em termos percentuais, em termos da variação com relação ao caso base.

As variações máximas do tempo de chegada, para um mesmo modo de falha e hidrograma, são mostradas na

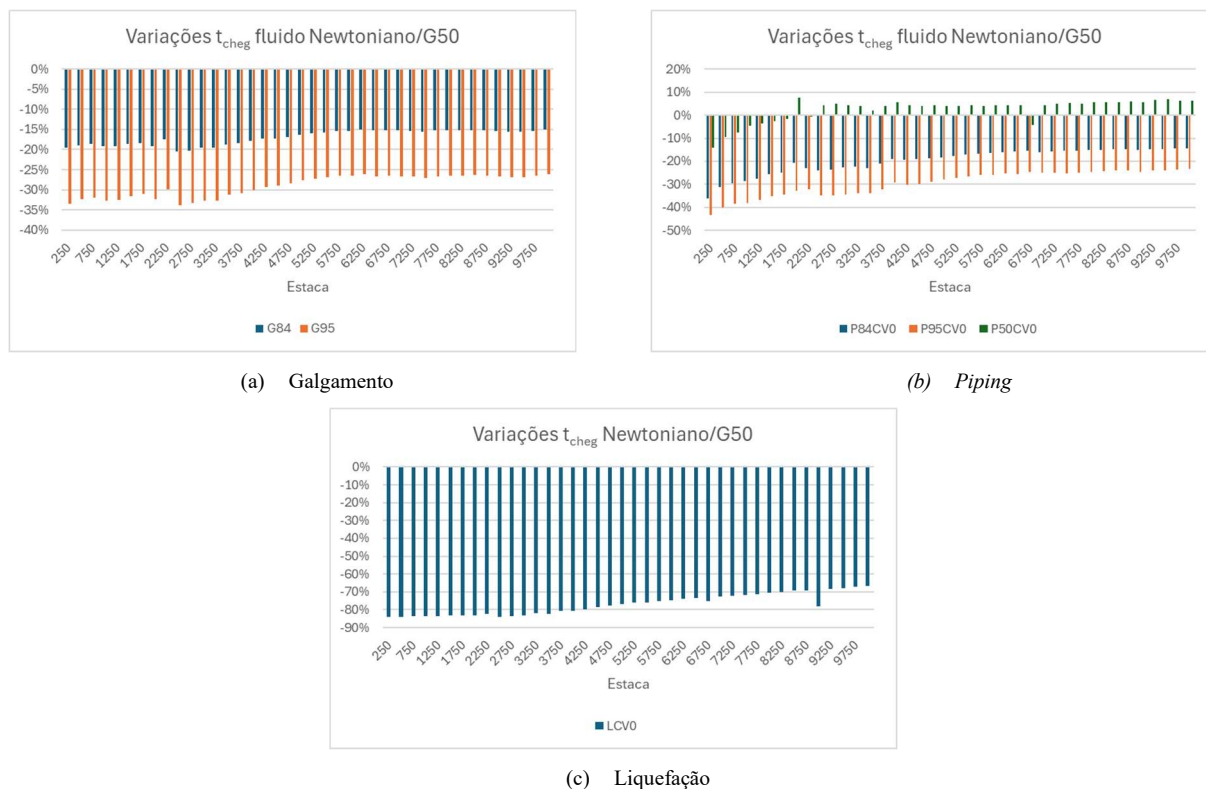
Figura 8. Percebe-se que, para os modos de falha galgamento e *piping*, para todos os hidrogramas avaliados, as variações do tempo de chegada foram, no geral, inferiores a 4%. Para o modo de falha liquefação, a variação foi ainda menor, sendo, em geral, inferior a 1%.

As variações percentuais do tempo de chegada, para diferentes modos de falha e hidrogramas, em relação ao caso de galgamento, com vazão com probabilidade de 50% são mostradas na Figura 9. Observa-se que, hidrogramas com maiores vazões de pico resultam em substancial redução no tempo de chegada da onda de ruptura.

Figura 8 – Variação máximas do tempo de chegada para diferentes modos de falha



Figura 9 – Variações do tempo de chegada para o caso de fluido Newtoniano, em relação ao caso de galgamento, vazão de 50% de probabilidade



## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que, para um mesmo modo de falha e hidrograma de ruptura, a variação de parâmetros reológicos, dentro dos limites máximo e mínimo específicos para a barragem avaliada, tiveram influência bastante limitada nos tempos de chegada ao longo de 10 km do eixo de propagação a jusante. Em geral, a variação nos tempos de chegada foi inferior a 4% para os modos de falha galgamento e *piping*, e inferior a 1% para liquefação.

Essa pequena variação da influência dos parâmetros reológicos é decorrente do fato de que a parcela de resistência adicional decorrente da viscosidade e da tensão de escoamento ser apenas uma pequena parcela da resistência dada pela rugosidade (coeficiente de Manning). E esse aumento na resistência é praticamente igual ao aumento de solicitação que ocorre pelo aumento do peso do fluido não Newtoniano. Ou seja, quase todo o ganho de resistência é perdido pelo aumento do peso, que também aumenta a solicitação.

Em termos de comparação entre galgamento e *piping*, para uma mesma probabilidade de excedência de vazão, não se observou diferenças significantes entre esses dois modos de falha. A diferença significativa ocorre para o modo de falha liquefação, que resulta em vazão de pico muito superior aos demais modos de falha, com uma duração total muito menor. Esse hidrograma bastante concentrado do modo de falha liquefação resulta ainda, em influência muito menor dos parâmetros reológicos, pois a velocidade de propagação da onda é bastante alta, o que potencializa ainda mais a influência do coeficiente de Manning.

Os resultados obtidos estão em concordância com os indicados por Ghahramani *et al* (2024), que indicam que os fatores que mais influenciam nos resultados de propagação de onda de ruptura de

barragens de rejeito são o volume mobilizado e a largura da brecha, que são variáveis diretamente relacionadas ao hidrograma de ruptura. Segundo esses autores, os parâmetros reológicos apresentam influência muito pequena.

Avaliando-se especificamente a influência dos parâmetros avaliados na definição da ZAS, que, segundo legislação é definida pela extensão de 10 km a jusante, ou pelo tempo de chegada da onda em 30 min, o que resultar na maior extensão, todas as variações observadas para os modos de falha *piping* e galgamento resultaram em tempos de chegada em 30 minutos inferiores a 10 km. Para liquefação, o tempo de chegada de 30 minutos ocorreu em distâncias próximas a 12,5 km, para as variações de parâmetros consideradas no estudo.

Isso significa que, somente a consideração de modo de falha liquefação resultou em alterações na definição da ZAS.

Apesar de não terem sido apresentados, também foram avaliados os impactos das variações nos parâmetros de brecha e reológicos nas variáveis tempo para o pico de onda, velocidade máxima e altura máxima da onda. Para tempo de chegada do pico de onda e altura máxima, os parâmetros reológicos também tiveram pequena influência, quando considerado o mesmo hidrograma e mesmo modo de falha, resultando em variações no geral inferiores a 5%. Para a velocidade máxima, as variações chegaram até a 20% em determinados trechos do vale a jusante.

Os resultados obtidos para a barragem avaliada indicaram que, para a avaliação dos impactos potenciais a jusante, é mais relevante uma avaliação criteriosa de modos de falha e variações no hidrograma de ruptura do modo de falha selecionado, do que a caracterização reológica dos rejeitos.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução Nº 95 de 7 de Fevereiro de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, 16/02/2022, Edição: 33, Seção: 1, Página: 49.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13028 – Mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). Technical Bulletin: Tailings Dam Breach Analysis. CDA, 2021.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT Agency (FEMA). FEMA P-946. Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures. FEMA, 2013
- FROEHLICH, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 234(22), 2708–2722.
- GHAHRAMANI, N., ADRIA, D. A. M., RANA, N. M., LLANO-SERNA, M., MCDUGALL, S., EVANS, S. G., & TAKE, W. A. (2024). Analysis of uncertainty and sensitivity in Tailings Dam Breach-Runout Numerical Modelling. *Mine Water and the Environment*, 43(1), 87–103.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Bulletin 188 Preprint – Dam Failures, Statistical Analysis. ICOLD, 2019.
- PICIULLO, L., STORRØSTEN, E. B., LIU, Z., NADIM, F., & LACASSE, S. (2022). A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 106657.