CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS ASSOCIADOS À RUPTURA DE BARRAGENS POR MEIO DE IMAGENS ESPAÇO-TEMPORAIS (STI)

João Batista Pereira [1] *& Geraldo de Freitas Maciel* [2]

Palavras-Chave – Ruptura de barragens; Imagens espaço-temporais; Caracterização hidrodinâmica.

INTRODUÇÃO

Rupturas de barragens figuram entre os desastres de maior potencial destrutivo associados à engenharia hidráulica e geotécnica, podendo gerar ondas de cheia e corridas de lama capazes de provocar perdas humanas, danos à infraestrutura e impactos ambientais significativos (Pirulli *et al*., 2017). Eventos recentes, como a ruptura das barragens de Fundão (2015) e Brumadinho (2019) no Brasil, evidenciaram a necessidade de aprimorar ferramentas de análise e monitoramento desses fenômenos, especialmente no que se refere à propagação de escoamentos transientes produzidos pela liberação repentina de grandes volumes de material.

A intensidade e a evolução desses escoamentos dependem diretamente das condições de ruptura da estrutura de contenção (Chácara *et al*., 2021). Entre os fatores mais relevantes destaca-se a formação da brecha, responsável por controlar o hidrograma de ruptura e a propagação da onda a jusante. Diferentes mecanismos de falha podem produzir distintos padrões de liberação de material, influenciando a dinâmica do escoamento e os alcances atingidos pela frente (Kocaman *et al*., 2020).

A caracterização experimental desses fenômenos apresenta desafios devido à rápida evolução temporal das variáveis hidráulicas. Nesse contexto, métodos ópticos não intrusivos têm recebido crescente atenção por permitirem a obtenção de informações hidrodinâmicas sem interferência direta no escoamento. Entre essas abordagens, as imagens espaço-temporais (*Space-Time Images* – STI) destacam-se pela capacidade de representar simultaneamente a evolução espacial e temporal do fenômeno analisado (Pereira e Maciel, 2026). A técnica tem sido empregada na caracterização de escoamentos transientes e apresenta potencial para aplicações em monitoramento hidrodinâmico e análise de desastres ambientais (Yu *et al*., 2026).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação da técnica STI na caracterização do *runout* de escoamentos produzidos por ruptura de barragens em escala laboratorial. Para isso, foram analisados diferentes cenários de liberação de material, contemplando condições de abertura gradual (com estágios) da comporta. A partir das imagens espaço-temporais foi possível acompanhar a evolução da frente do escoamento e discutir a influência da formação da brecha sobre a propagação de frentes viscoplásticas.

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em um aparato de ruptura de barragem (*dam-break*) composto por reservatório de montante e canal retangular inclinado (Figura 1). O sistema possui movimentação automatizada da comporta, permitindo controlar a velocidade e a forma de abertura do reservatório.

Como fluido teste foi empregado gel de Carbopol com concentração mássica de 0,17%, amplamente utilizado como fluido teste representativo de materiais lamosos. As propriedades reológicas do material foram determinadas por reometria rotacional e ajustadas ao modelo de Herschel-Bulkley. Todos os experimentos foram conduzidos em canal inclinado com declividade de 4°, mantendo-se

1) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, FEIS-UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. E-mail: joao.pereira@unesp.br
2) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, FEIS-UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. E-mail: gerado.f.maciel@unesp.br

constantes as características geométricas do aparato e o volume inicial armazenado no reservatório (15 litros). O estudo avaliou a influência da velocidade de abertura da comporta e da liberação do material sobre a evolução temporal do alcance da frente. As configurações experimentais empregadas são apresentadas na Tabela 1.

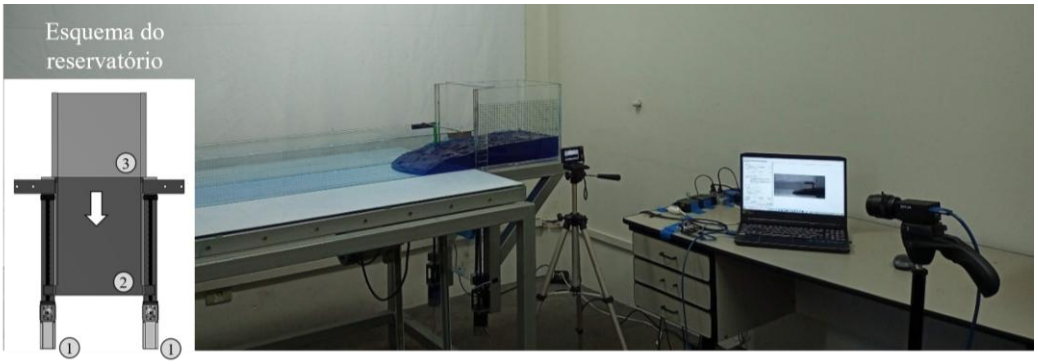


Figura 1. Aparato experimental de dam break: configuração final. Situação na condição de canal e comporta com movimento descendente - (1) motor de passo – responsável pela movimentação da comporta, (2) comporta retangular e (3) reservatório.

Tabela 1. Configurações experimentais analisadas para escoamento dam-break de géis de carbopol C0.17 segundo comporta de movimento descendente (abertura gradual).

Ensaio	Fluido-teste	Configuração aparato	Inclinação (°)	Velocidade comporta (mm/s)	Posição da comporta (estágio de abertura) (mm)*
C1-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 - 0
C2-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 – 75 – 25 - 0
C3-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 – 62,5 – 0
C4-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 – 100 – 75 – 50 – 25 - 0
C5-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 - 0
C6-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 – 75 – 25 - 0
C7-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 – 62,5 – 0
C8-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 – 100 – 75 – 50 – 25 - 0

*As alturas definidas para os estágios de abertura foram fixadas considerando a posição horizontal do canal, de forma que os dados apresentados foram aproximados às condições de horizontalidade pela proximidade com tal situação (baixa inclinação $\theta = 4°$). O nível máximo de fluido foi fixado em $H = 125$ mm , de forma que a comporta se desloca para baixo até atingir $H = 0$ mm, podendo parar em outras posições segundo um tempo de parada de 20 s.

A evolução do escoamento foi registrada por câmera digital posicionada lateralmente ao canal. A determinação do alcance da frente foi realizada por meio da técnica de imagens espaço-temporais (*Space-Time Images* – STI), construída a partir do empilhamento temporal dos níveis de brilho extraídos ao longo de uma linha de referência definida na direção do escoamento. As imagens STI permitiram identificar automaticamente a posição ocupada pela frente ao longo do tempo, possibilitando a obtenção das curvas de alcance (x_F). A utilização dessa abordagem mostrou-se particularmente adequada para a análise dos instantes iniciais da ruptura, período em que a rápida evolução do escoamento dificulta a aplicação de métodos convencionais de rastreamento.

RESULTADOS

Os experimentos foram realizados com gel de Carbopol $C_{0,17\%}$ em canal inclinado de 4°, avaliando-se diferentes velocidades e estágios de abertura da comporta. A Tabela 2 apresenta os parâmetros reológicos e os alcances finais obtidos. De forma geral, os alcances finais permaneceram na mesma ordem de grandeza para todos os cenários analisados. Já as curvas de alcance (x_F) obtidas por meio da técnica STI são apresentadas na Figura 2. Em todos os casos observou-se crescimento do alcance ao longo do tempo. As principais diferenças ocorreram nos instantes iniciais da ruptura, quando a velocidade de abertura da comporta exerce maior influência sobre a propagação da frente.

Tabela 2 - Resultados experimentais de experimentos de *dam-break* realizados com géis de carbopol, sendo τ_0 a tensão limite de escoamento, K_n o índice de consistência, n o índice de escoamento e ρ a massa específica.

Ensaio	x_F (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s^n)	n	ρ
C1-CI-4	1246,89	28,66	6,33	0,45	1010,72
C2-CI-4	1210,19	30,09	5,80	0,46	1010,86
C3-CI-4	1201,21	27,91	7,42	0,42	1008,53
C4-CI-4	1242,09	27,13	7,86	0,42	1009,58
C5-CI-4	1210,05	26,57	7,96	0,41	1010,10
C6-CI-4	1294,88	29,67	6,59	0,45	1011,30
C7-CI-4	1263,21	27,58	7,77	0,42	1008,71
C8-CI-4	1271,30	29,24	7,00	0,44	1010,85

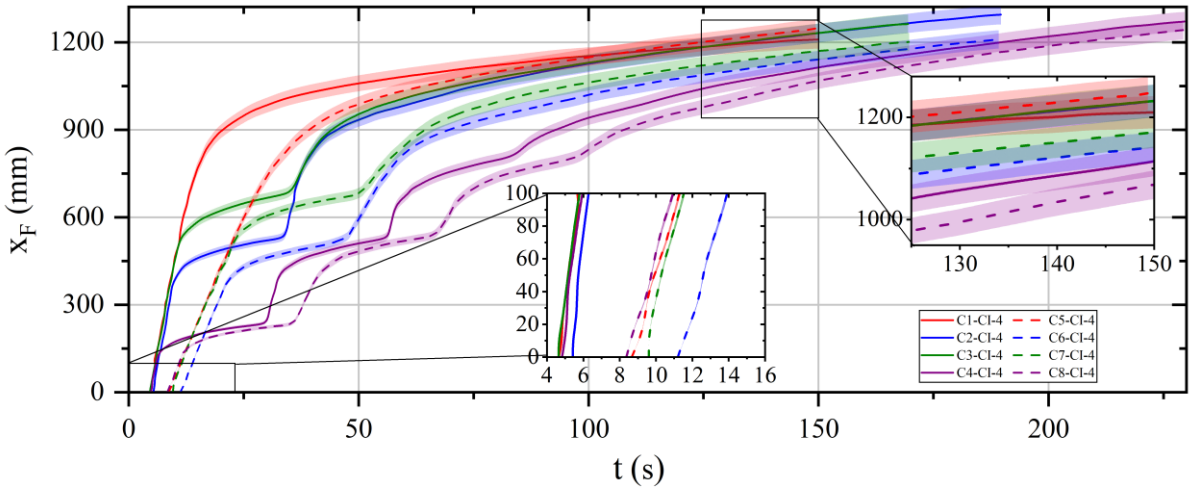


Figura 2. Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a géis de carbopol $C_{0,17}$ segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilha - velocidade mínima) evoluindo em canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.

As condições de abertura mais rápidas produziram maiores alcances para um mesmo instante de tempo, evidenciando maiores taxas iniciais de avanço da frente. Por outro lado, menores velocidades e a imposição de estágios de abertura resultaram em crescimento mais gradual do *runout*. Entretanto, à medida que o escoamento evolui, observa-se uma tendência de convergência entre as curvas, indicando que os diferentes mecanismos de liberação influenciam principalmente a resposta transitória inicial do escoamento.

Um comportamento interessante a ser discutido é quando se realiza o confronto das curvas de alcance, segundo diferentes estágios de abertura. Nota-se que na condição de canal inclinado, para ambas as velocidades de abertura de comporta e todos os estágios de liberação de material, os alcances, para tempos $t > 150$ s estão tendendo a uma mesma ordem de grandeza, evidenciando que o alcance final, em caso de canal inclinado, é influenciado pelas propriedades reológicas, sendo que a configuração de liberação de material (gradual e sequencial) influencia diretamente as taxas de avanço da frente viscoplástica, não tendo forte efeito sobre a distância final percorrida.

A Figura 3 apresenta os hidrogramas de ruptura obtidos para os diferentes cenários de abertura. Observa-se que a introdução de estágios de abertura promove amortecimento dos hidrogramas, reduzindo os picos de vazão e distribuindo a liberação do material ao longo do tempo. Esse comportamento explica as diferenças observadas nas curvas de alcance durante os instantes iniciais da ruptura, uma vez que menores picos de vazão tendem a produzir avanços mais graduais da frente.

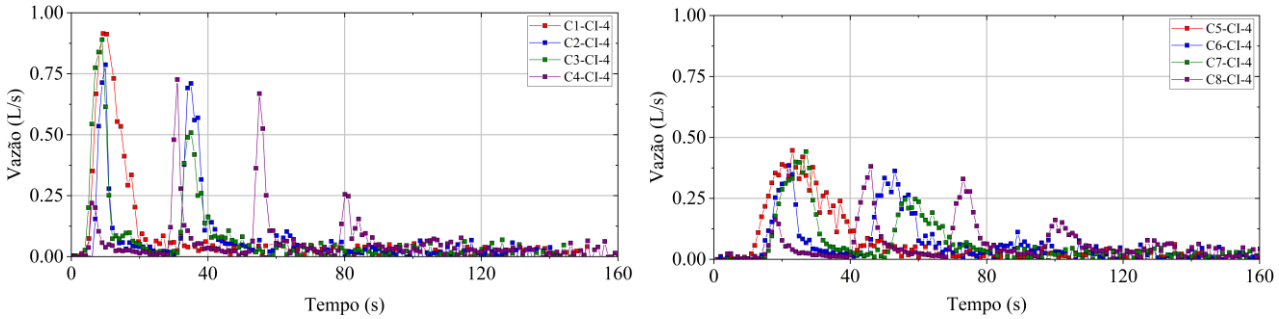


Figura 3. Hidrogramas de dam-break de géis de carbopol de concentração C0,17, com diferentes estágios de abertura, segundo as velocidades de comporta: (a) $V_{máx}$ e (b) V_{min}.

Sob a ótica da ruptura de barragens, os resultados indicam que diferentes mecanismos de formação da brecha podem alterar significativamente a propagação inicial da onda gerada pela ruptura, mesmo quando os alcances observados nos estágios finais permanecem semelhantes. Além disso, a técnica STI mostrou-se eficiente para o rastreamento automático da frente do escoamento, permitindo a obtenção de curvas de alcance com elevada resolução temporal e sem interferência no escoamento.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência da velocidade de liberação do material sobre a evolução temporal do alcance de escoamentos viscoplásticos produzidos por ruptura de barragem, bem como verificar a aplicabilidade da técnica STI para o rastreamento de frentes em condições transientes. Os principais achados são:

- A técnica STI permitiu o rastreamento contínuo da frente do escoamento viscoplástico ao longo de toda a evolução do experimento.
- Diferenças na velocidade de abertura da comporta influenciaram a evolução temporal do *runout* durante os instantes iniciais da ruptura.
- As maiores discrepâncias entre os cenários ocorreram logo após a liberação do material, indicando forte influência da formação da brecha na resposta transitória inicial do escoamento.
- Apesar das diferenças iniciais observadas, os experimentos apresentaram alcances semelhantes nos estágios posteriores da propagação.

As análises foram restritas ao gel de Carbopol 0,17% em canal inclinado de 4° e limitadas à avaliação temporal do *runout*.

REFERÊNCIAS

CHÁCARA, C.; PIRULLI, M.; SCAVIA, M. (2021). "*Rheology of mine tailings deposits for dam break analyses*". REM - Revista Escola de Minas, v. 74, n. 3, p. 303-313.

KOCAMAN, S. et al. (2020). "*Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel*". Water, v. 12, n. 4.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. (2026). "*Application of space-time image analysis for measuring viscoplastic fluid flow in open channel*". Measurement Science and Technology, v. 37, n. 10, p. 105301.

PIRULLI, M. et al. (2017). "*The failure of the Stava Valley tailings dams (Northern Italy): numerical analysis of the flow dynamics and rheological properties*". Geoenvironmental Disasters, v. 4, n. 1.

YU, N. et al. (2026). "*Robust river surface velocity measurement based on adaptive masked FFT-STIV*". Flow Measurement and Instrumentation, p. 103367.