
Modelo físico para avaliação de vazões geradas por rompimento de pequenas barragens

PHYSICAL MODEL FOR THE EVALUATION OF FLOW RATES GENERATED BY SMALL DAMS' BREAK

MODELO FÍSICO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS CAUDALES GENERADOS POR LA ROTURA DE PEQUEÑAS PRESAS

Lamartine Gonçalves de Sousa
lamartine.eng@gmail.com

Thiago Augusto Mendes
Instituto Federal de Goiás (IFG)
thiago.mendes@ifg.edu.br

Sávio Aparecido dos Santos Pereira
Universidade Federal de Goiás (UFG)
savioaparecido1@gmail.com

André Augusto Nobrega Dantas
Instituto Federal de Goiás (IFG)
andrenobregadantas@yahoo.com.br

Emiliano Lôbo de Godoi
Universidade Federal de Goiás (UFG)
emiliano@ufg.br

Resumo

Este artigo apresenta os resultados experimentais das vazões geradas por modelagem física de uma pequena barragem de terra submetida ao rompimento por meio de abertura de brecha. A barragem modelada fisicamente situa-se na cidade de Inhumas, estado de Goiás, Brasil, tendo sido usada escala reduzida de 1:500 em sua maior dimensão seguindo a geometria original (dados físicos de projeto da época). As vazões geradas após a simulação de seu rompimento foram obtidas por modelagem numérica por Oliveira, Nunes e Mendes (2019) e comparados com os resultados da modelagem física simulada neste artigo. Os resultados obtidos pelo modelo físico experimental apresentaram vazões pós rompimento 13 vezes maior que a vazão afluente da barragem, mostrando-se ainda menores que as vazões simuladas pela modelagem numérica. Os resultados mostraram que o nível de compactação e os materiais utilizados no modelo físico e o tipo de formação da brecha tem grande impacto na geração das vazões no rompimento da barragem. Com a simulação do rompimento da barragem percebeu-se também grande arraste de materiais sólidos a jusante, o que pode causar deposições de sedimentos e erosões, afetar a qualidade da água, causar assoreamento e diminuição da altura útil da calha do rio, o que mostra a importância desse tipo de estudo para avaliação de impactos ambientais e sociais.

Palavras-chave: Barragem de Terra. Modelação Física. Formação de Brecha.

Abstract

This paper presents the experimental results of the flows rates generated by physical modeling of a small earth dam subjected to dam break by breaching. The physically modeled dam is located in the city of Inhumas, Goiás state, Brazil, and it was used a reduced scale of 1:500 in its largest dimension, following the original geometry (physical design data at the time). The flows generated after the simulation of its rupture were obtained by numerical modeling, according to Oliveira, Nunes e Mendes (2019) and compared with the results of the simulated physical modeling. The results obtained by the physical experimental model showed post-rupture flows 13 times greater than the inflow of the dam, showing to be even lower than the flows simulated by numerical modeling. The results showed that the compaction level, the materials used in the physical model and the type of breach formation have a great impact on the generation of the flows in the dam break. After the simulation dam break, a significant volume of particles was displaced downstream, causing deposition of sediments and erosion, which affect water quality, cause silting and decreasing the river channel area, which shows the importance of this type of study for the evaluation of environmental and social impacts.

Keywords: Earth Dam. Physical Modeling. Breach Formation.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de los caudales generados por modelización física de una pequeña presa de tierra sometida a rotura por brecha. La presa modelada físicamente se localiza en la ciudad de Inhumas, estado de Goiás, Brasil, habiéndose utilizado una escala reducida de 1:500 en su mayor dimensión siguiendo la geometría original (datos de diseño físico de la época). Los flujos generados después de la simulación de su ruptura fueron obtenidos por modelación numérica según Oliveira, Nunes e Mendes (2019) y comparados con los resultados de la modelación física simulada. Los resultados obtenidos por el modelo físico experimental mostraron caudales posteriores a la rotura 13 veces superiores al caudal afluente de la presa, resultando ser incluso inferiores a los caudales simulados por modelización numérica. Los resultados mostraron que el nivel de compactación y los materiales utilizados en el modelo físico y el tipo de formación de la brecha tienen un gran impacto en la generación de los caudales en la rotura de la presa. Con la simulación de rotura de presa también se pudo constatar un gran arrastre de materiales sólidos aguas abajo, lo que puede provocar deposición de sedimentos y erosión, afectar a la calidad del agua, causar aterramiento y disminuir la altura útil del cauce del río, lo que demuestra la importancia de este tipo de estudios para evaluar los impactos ambientales y sociales.

Palabras clave: Presas de tierra. Modelización física. Formación de brechas.

Introdução

Uma barragem pode assumir diversas finalidades como: a) armazenamento de água para abastecimento; b) controle de cheias; c) armazenamento e tratamento de rejeitos de mineração; d) geração de energia e h) navegação e lazer. Frequentemente as barragens podem ter fins múltiplos. Na realização de projetos que envolvam obras de barramentos há necessidade de alta qualidade de execução, tornando-se necessário realizar ensaios e testes com os vários materiais especificados para esse tipo de empreendimento. O estudo de uma barragem pode ser realizado fisicamente,

por meio de modelos reduzidos, ou matematicamente, por meio de modelos associados a *softwares* (LIANG; REINHORN, 2008).

Para Sampaio *et al.* (2016) o modelo físico reduzido consiste em uma representação à escala do protótipo, logo as características do modelo são semelhantes à situação real, correspondendo a uma réplica em “miniatura” do elemento a ser estudado. Essa representação é uma ferramenta para análise de projetos considerados mais complexos, como o caso de rompimento de barragens, e permitem reproduzir as características e fenômenos físicos dos elementos de estudo, de forma semelhante ao comportamento real, e, dessa forma, complementando os cálculos dos modelos matemáticos necessários para o projeto. De acordo com Kanashiro (2013), a elaboração desse tipo de modelo é baseada na fidedignidade da semelhança, pois a representação de um fenômeno por meio de modelos é baseada em parâmetros de semelhança e, para a correta modelação, é necessário que seja representado o fenômeno em questão, de forma confiável.

Aspectos hidráulicos, como profundidade da água, velocidade máxima e duração da inundação estão naturalmente envolvidos, por meio de combinações adequadas, na formulação de vários critérios de danos e falhas propostos na literatura (ERPICUM *et al.*, 2009). Nesse contexto, com um conjunto de dados de entrada, é possível realizar previsões de comportamento ao acoplar um modelo hidrodinâmico com um modelo físico e analisar as fontes de incertezas associadas aos parâmetros envolvidos (GALLEGOS *et al.*, 2012). De acordo com Aureli *et al.* (2015), os resultados numéricos são comparados com dados de novas experiências físicas, a fim de avaliar a precisão dos modelos matemáticos na reprodução de um processo de rompimento de barragens ocasionado por diferentes causas.

Com relação a modelagem numérica para obtenção das vazões simuladas pós rompimento da barragem, utilizou-se o software *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), que trata a equação básica do balanço hídrico e considera os principais parâmetros que governam o escoamento e é capaz de modelar as chuvas em eventos de cheias aplicadas a esse fenômeno (Thakur *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2019). Também, é um modelo reconhecido por ser eficaz para simular processos hidrológicos que envolvem cálculos de vazões provenientes da ruptura de barragens e tem como aspecto positivo o fato de apresentar poucas



diferenças dos resultados das vazões calculadas quando se compara com modelos hidrodinâmicos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010).

O modelo HEC-HMS permite que o modelador opte por um dos dois métodos existentes de consideração para rompimento de barragens: *overtopping* (galgamento) ou *piping* (erosão interna). Normalmente, o rompimento de barragens por *overtopping* ocorre em um maior número que por *piping* e podem trazer maiores consequências do ponto de vista estrutural, ambiental e social, no caso de barragens de terra (MELLO; SANDRONI; GUIDICINI, 2021). O modo de falha inicia-se quando uma quantidade apreciável de água começa a vazar sobre ou em torno da barragem, erodindo-a. O outro método é projetado para representar falhas causadas dentro da barragem chamada *tubing dam-break*. A falha começa quando a água provoca o arraste de material formando um tubo de forma aproximadamente circular que se expande até ocasionar o rompimento (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010). De acordo com o *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 1973), as três principais causas de ruptura de barragens de aterro são: galgamento (vertedouro inadequado), problemas nas fundações e *piping*.

Com base na Lei Federal Brasileira n. 12.334 (2010), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e a importância de estudos que envolvam modelos reduzidos em barragens, o objetivo dessa pesquisa foi desenvolver e aplicar um modelo físico reduzido de uma pequena barragem de terra para avaliar quantitativamente as vazões geradas decorrentes de seu rompimento.

Metodologia

A barragem modelada fisicamente neste artigo está integrada no lago Lúzio de Freitas Borges, sendo abastecida pelo córrego Goiabeiras, cidade de Inhumas, estado de Goiás, Brasil, que foi simulado numericamente por Oliveira, Nunes e Mendes (2019) para determinação de vazões geradas pelo seu rompimento por meio do modelo hidrológico HEC-HMS (Figura 1). O lago Lúzio de Freitas Borges fica localizado aproximadamente na latitude 16° 22' 10.43" S e longitude 49° 30' 12.58" W, tendo uma área inundada de aproximadamente 68.000 m² e profundidade média de 5,0 m (Figura 1), estando situado dentro do perímetro urbano da cidade de Inhumas (OLIVEIRA; NUNES; MENDES, 2019).

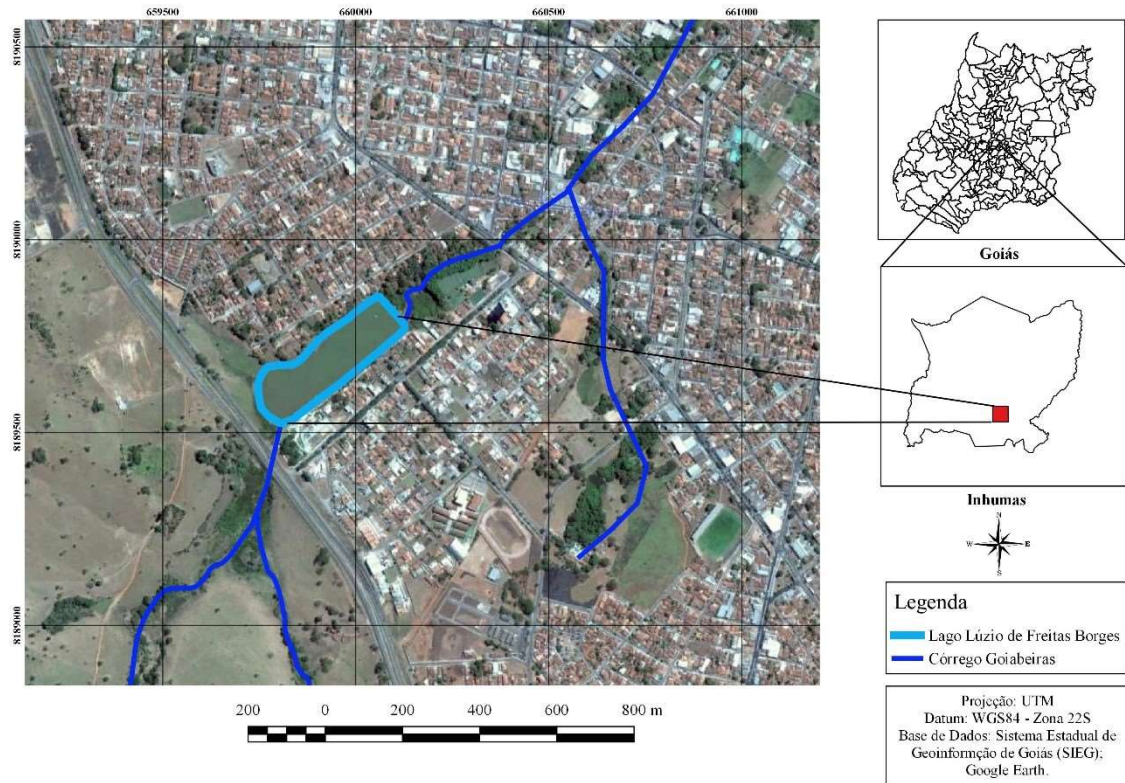


Figura 1 – Localização do lago Lúzio de Freitas Borges (Inhumas – GO)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Inicialmente, foram levantados os parâmetros físicos da barragem utilizando ferramentas de geoprocessamento (ArcGIS), com destaque para a simplificação utilizada na determinação da profundidade, ou seja, foi considerada profundidade constante (média), devido à dificuldade de obtenção e disponibilização dos projetos executivos de construção do lago da época pela prefeitura municipal (Tabela 1).

Tabela 1 – Características físicas da barragem Lúzio de Freitas Borges (Inhumas, Goiás)

Parâmetro	Medida real (m)
Comprimento	410
Largura	114
Comprimento do vertedouro	9
Profundidade	5

Fonte: Oliveira, Nunes e Mendes (2019).

Admitindo as dimensões do barramento (Tabela 1), a barragem foi modelada em escala reduzida (Tabela 2 e Figura 2) com material construtivo (solo) semelhante ao

utilizado na barragem original, ou seja, solo argiloso possuindo massa específica de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$, compactada na energia Proctor normal com teor de umidade de 16,0% e coeficiente de permeabilidade de $7,9 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ e granulometria semelhante, de forma que o modelo físico reproduzisse com maior fidedignidade o comportamento do processo de rompimento.

Tabela 2 – Escalas utilizadas para representar as estruturas elementares do modelo físico

Estrutura	Escala
Comprimento do lago	(1:500)
Largura do lago	(1:250)
Comprimento do vertedouro	(1:200)
Profundidade do lago	(1:25)

Fonte: Elaborada pelos autores.

As escalas utilizadas para confecção do modelo físico (Tabela 2) corresponderam em média uma proporção de 40% nas medidas entre o comprimento e largura da barragem, de modo que a forma retangular do lago não fosse modificada. A adoção de diferentes escalas como as apresentadas na Tabela 2 para a execução das estruturas do modelo físico tem o intuito de tornar possível e exequível (referente à geometria) a construção da barragem em ambiente laboratorial, não tendo sido analisadas outras escalas e variações.

O material do barramento modelado (barragem) utilizado foi solo laterítico argiloso, com a maioria das partículas de 0,005 mm, estrutura pouco permeável (Figura 2a) sob estrutura de vidro temperado, facilitando a construção irregular do interior e entorno. Entretanto, isso não foi suficiente para garantir que o protótipo não apresentasse pequenos vazamentos. Por esse motivo optou-se pelo uso da lona plástica para impermeabilização do interior do protótipo (figuras 2b a 2f) como um complemento para prolongar a vida útil do modelo físico, possibilitando que vários ensaios fossem realizados sem reparações. A lona plástica com espessura de 100 micron apresentou facilidade de manejo, aplicação e garantiu a estanqueidade do modelo físico.

A estrutura hidráulica (Figuras 2b e 2d), composta por um registro gaveta (3/4') e tubo soldável (25 mm) teve boa eficiência realizando a função de entrada d'água

(controle da vazão de entrada). O registro de gaveta é de fácil manejo e o diâmetro do tubo utilizado possibilitou que a água entrasse no reservatório sem causar espirros e ondas ao entrar em contato com a lâmina d'água inferior (nível do reservatório). O vertedouro (Figura 2c) se comportou intacto ao receber uma descarga d'água maior, evidenciando o seu papel e sua importância na transposição de vazões extremas até o momento da abertura total da brecha e rompimento da barragem. A calha Parshall utilizada (Figura 2h) foi instalada conforme prescrições técnicas, sendo bem encaixada no aparato afunilado, muito bem nivelada na cota do pé da barragem, garantindo facilidade ao medir a vazão em tempo real.



Figura 2 – Etapas da construção do modelo físico e estruturas elementares da barragem

Legenda: a) molde da barragem em argila; b) vista superior abrangendo todas as estruturas elementares; c) vista frontal, d) componente hidráulico regularizador de vazão; e) vista posterior; f) vista lateral; g) início da brecha; h) calha Parshall $w = 1''$ utilizada para determinar as vazões.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A modelagem física (hidráulica) de uma barragem deve contemplar três principais grupos de avaliação, sendo: a) geométrica, contemplando as grandezas de área e volume; b) cinemática, relacionada à velocidade e vazão e; c) dinâmica, no que se refere às pressões, porém, neste estudo não foi avaliada a característica dinâmica, ou seja, as variações de pressão na barragem, antes ou após o seu rompimento. Todos os elementos construtivos do modelo físico (materiais e etapas) são ilustrados no fluxograma da Figura 3.

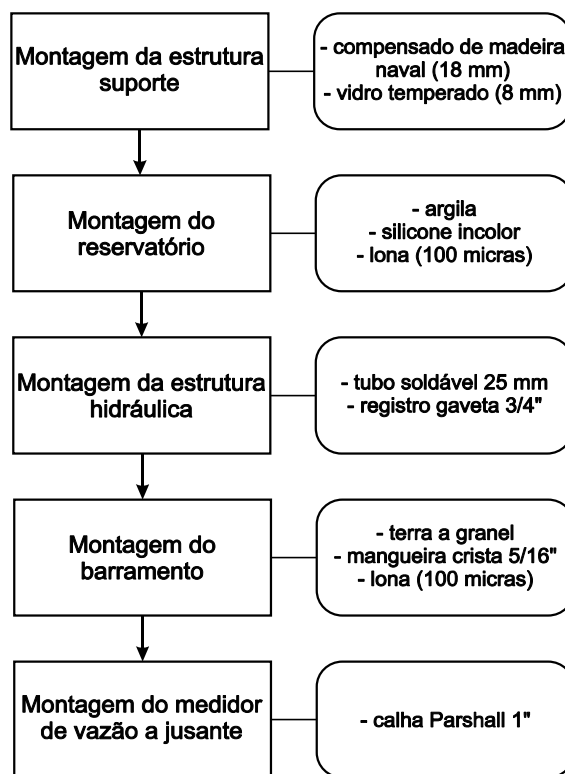


Figura 3 – Etapas construtivas e materiais utilizados no modelo físico

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com relação à vazão do córrego Goiabeiras (dado de entrada necessário para a modelagem física), Oliveira, Nunes e Mendes (2019) estimaram e utilizaram o valor de $1,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Assim, adotou-se como vazão de entrada para o modelo físico a vazão de $1,04 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ou seja, vazão de entrada 10.000 vezes menor que sugerem Oliveira, Nunes e Mendes (2019). Deve-se esclarecer que a redução no valor da vazão de entrada se deve principalmente à capacidade real disponível de vazão experimental para ser utilizada no desenvolvimento do modelo físico e compatibilização com as escalas atribuídas na construção das estruturas elementares da barragem (Tabela 2).

A determinação e avaliação da vazão média de entrada da barragem, foi realizada a partir da medição do volume (por meio de recipiente graduado de precisão) e do tempo (cronômetro) em 13 testes para a correta calibração.

O método utilizado para a abertura da brecha não seguiu método consagrado existente na literatura, sendo realizado conforme limitações do protótipo (GEE, 2010) e tempo de formação de brecha prescritos por ANA (2016). Segundo ANA (2016), uma brecha é caracterizada por três parâmetros: configuração geométrica, dimensões (nomeadamente, a largura) e tempo de formação, fatores que, no seu conjunto, influenciam as vazões geradas, os níveis e os tempos de chegada da onda de inundação às diferentes zonas da área de inundação.

A simulação do rompimento da barragem foi concebida a partir de uma formação de brecha provocada manualmente por um aparato de superfície estreita e fina em formato de espeto, formando 90° com a crista da barragem (Figura 2g), com intuito de não influenciar o tamanho, forma e tempo de formação da brecha, permitindo que o fluxo da água (vazão) por si só agravasse sua abertura e provocasse o rompimento da barragem de forma mais natural possível conforme preconiza ANA (2016).

As simulações foram registradas em duas câmeras de alta definição com resolução de (24.2 megapixel, para determinação do tempo de enchimento, formação da brecha e de rompimento. O posicionamento das duas câmeras em relação a barragem (modelo físico) está apresentado na Figura 4, e possibilitou uma visão geral do instante em que o reservatório se enche até o momento em que a vazão de saída se estabiliza pós rompimento.

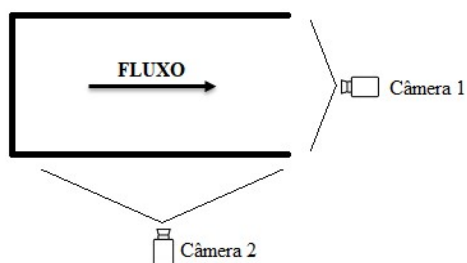


Figura 4 – Posicionamento das câmeras filmadoras para monitoramento dos processos de formação da brecha e vazões geradas com o rompimento do modelo físico

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para determinar as vazões de rompimento foram realizadas três simulações em condições idênticas (repetições), utilizando para todas as simulações uma calha Parshall $w = 1$ ", sendo w a largura da "garganta" da calha, que possibilitou a medição da vazão ($m^3 s^{-1}$) em tempo real sem a necessidade de cálculos adicionais para comparação com os dados de Oliveira, Nunes e Mendes (2019). Outros estudos experimentais relacionados ao rompimento de barragens desenvolvidos em calhas relatam a possibilidade do controle de variáveis relevantes, como: velocidade e vazão pós-rompimento, material carregado da barragem (protótipo), amplitude e altura máxima da onda e tempos de formação de brecha, rompimento e simulação total (HELLER, 2007; HELLER; HAGER, 2010).

Resultados

Na Tabela 3 são apresentadas as dimensões adotadas para cada elemento do modelo físico (barragem de terra) e sua comparação com as dimensões físicas reais do lago Lúzio de Freitas Borges, abastecido pelo córrego Goiabeiras, conforme adotados por Oliveira, Nunes e Mendes (2019).

Tabela 3 – Tamanho e conversão das medidas utilizadas para cada estrutura do modelo físico.

Estrutura elementar	Medida Real (m)	Escala	Medida utilizada no modelo físico (m)
Comprimento da barragem	410	(1:500)	0,82
Largura da barragem	114	(1:250)	0,46
Comprimento do vertedouro	9,0	(1:200)	0,045
Profundidade do lago	5,0	(1:15)	0,33
Altura da barragem	5,5	(1:15)	0,35

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com relação aos níveis de compactação do solo utilizados para modelar a barragem (para os diferentes cenários de rompimento), estes mostraram significativa correlação com a geração de vazões pós-rompimento, onde o barramento executado com maior nível de compactação, ou seja, compactado na energia modificada e não na Proctor normal (Simulações 1 e 3 apresentados na

Tabela 4) geraram menores vazões de rompimento e tempo de pico, além de, menor intensidade na velocidade de abertura da brecha e conseqüentemente, rompimento do barramento de forma gradual e não brusca.

Embora o desenvolvimento de mecanismos de rutura de uma barragem esteja atrelado a vários fatores geotécnicos intrínsecos do material utilizado (granulometria, densidade, expansibilidade, umidade ótima, índice de suporte e tipo de compactação aplicada), neste estudo foi dada atenção especial a este último, já que se considera uma variável essencial no estudo do efeito da presença de vazios na matriz do solo que compõem a barragem modelada.

Durante as simulações de rompimento do modelo físico, todos os dados pertinentes ao tempo, vazões e formação da brecha estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 5. Percebe-se que o tempo de ruptura da brecha é compatível com os tempos descritos em ANA (2016) desde que consideradas as escalas utilizadas. Ainda sobre o tempo de formação de brechas durante as simulações com o modelo físico produzido (Tabela 4), estes foram compatíveis e próximos aos valores médios encontrados Campos *et al.* (2020) em seu estudo sobre rompimento de barragens em cascatas, considerando o tempo total de simulação (t_s) que foram de 0,57 a 0,70 horas, ou seja, 2.052 a 2.520 segundos, porém, utilizaram como material construtivo do modelo físico, mistura de água, cimento e borracha (RCWM) em substituição ao solo e maior escala, com aproximadamente, 19 cm de altura, 81 cm de largura e comprimento do canal de 1,0 m.

Tabela 4 – Dados de monitoramento e vazões geradas durante a simulação.

Simulação	Dados monitorados				Vazões Geradas ($m^3 s^{-1}$)		σ	CV (%)
	t_e (s)	t_r (s)	t_s (s)	L_B (m)	sem rompimento	com rompimento		
1	1.542	668	2.210	0,0985		$8,33 \times 10^{-4}$		
2	1.561	540	2.101	0,1200	$6,94 \times 10^{-5}$	$9,58 \times 10^{-4}$	$6,26 \times 10^{-5}$	7,0
3	1.550	638	2.188	0,1050		$8,89 \times 10^{-4}$		

$$Q_{meds/romp} = 6,94 \times 10^{-5} m^3 s^{-1}$$

$$Q_{medc/romp} = 8,95 \times 10^{-4} m^3 s^{-1}$$

Legenda: t_e é o tempo de enchimento do reservatório; t_r é o tempo de rompimento; t_s é o tempo de simulação ($t_e + t_r$); L_B é a largura final da brecha; σ é o desvio padrão das vazões geradas; CV é o coeficiente de variação das vazões geradas; $Q_{meds/romp}$ é a vazão média gerada sem rompimento; e $Q_{medc/romp}$ é a vazão média gerada com rompimento.

Fonte: Elaborada pelos autores.

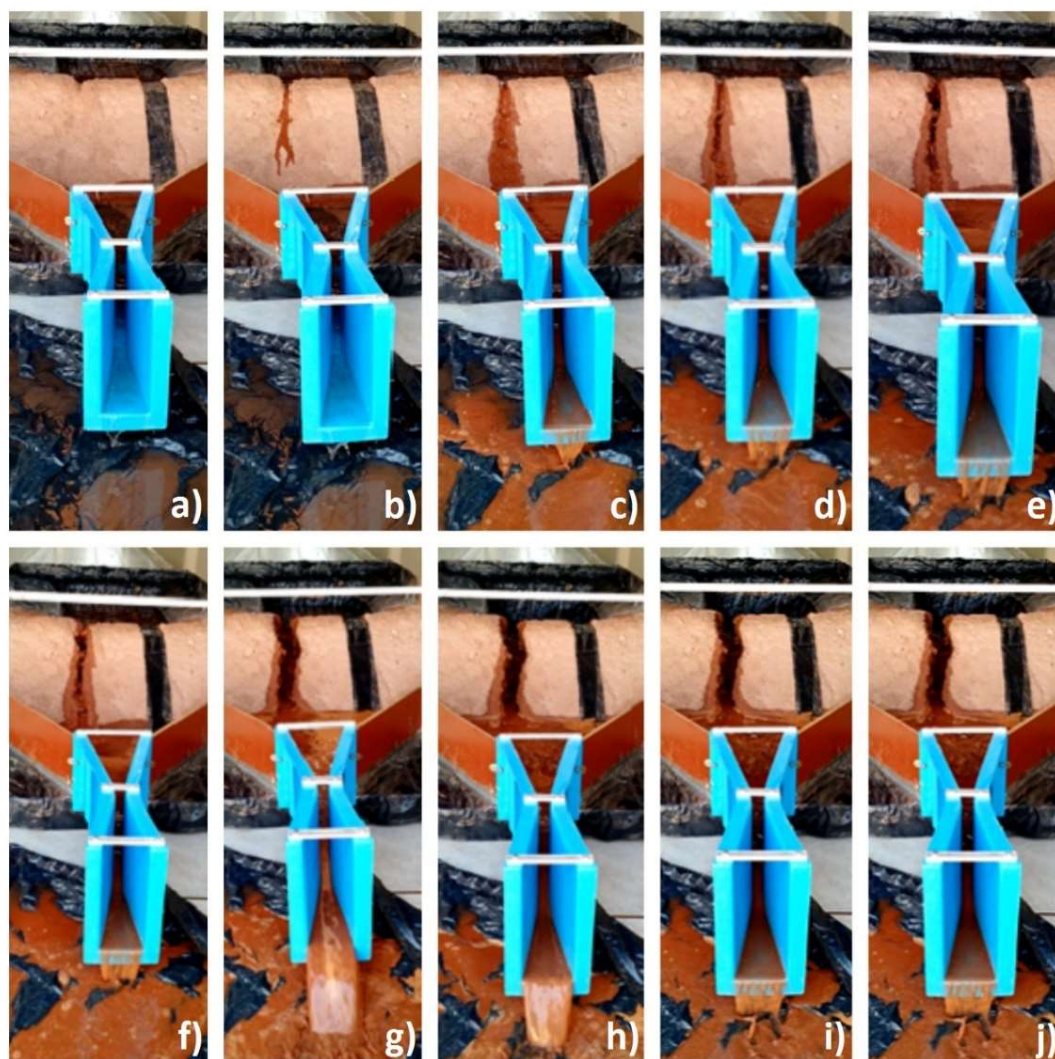


Figura 5 – Monitoramento do processo de formação e desenvolvimento da brecha do modelo físico reduzido por meio da Câmera 1

Legenda: a) t = 00:00 min; b) t = 00:51 min; c) t = 01:51 min; d) t = 02:58 min; e) t = 04:55 min; f) t = 06:05 min; g) t = 07:08 min; h) t = 08:08 min; i) t = 09:21 min; j) t = 11:00 min.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Conforme dados da Tabela 5, utilizou-se mesma escala (1:10.000) para proporcionalidade das vazões simuladas pelo modelo físico no intuito de compará-las com as vazões geradas por Oliveira, Nunes e Mendes (2019) a partir do *software* HEC-HMS. Ressalta-se que, a maior vazão medida pós rompimento da barragem se deu entre os tempos de sete a nove minutos (figuras de 5j a 5i).

Tabela 5 – Comparativo das vazões antes e após rompimento da barragem: a) Oliveira, Nunes e Mendes (2019) e b) modelo físico

	Vazão sem rompimento ($m^3 s^{-1}$)		Vazão com rompimento ($m^3 s^{-1}$)		Comparativo Diferença de vazões $\left(\frac{c'_{romp.}}{s'_{romp.}}\right) = x\text{vezes}$
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	
a)	1,04	3,1*exutório	1,04	106,9	34 vezes maior
b)	1,04	0,69	1,04	8,95	13 vezes maior

Fonte: Elaborada pelos autores.

Dessa forma, evidencia-se geração de vazões de rompimento menores no modelo físico proposto quando comparadas com modelo hidrológico de rompimento proposto por Oliveira, Nunes e Mendes (2019) em cerca de aproximadamente 21 vezes. Logo, a diferença entre as vazões geradas pelo modelo físico comparadas com Oliveira, Nunes e Mendes (2019) podem estar relacionadas a fatores diferentemente assumidos na execução e tipos de materiais utilizados na modelagem do barramento (modelo físico), tempo de formação da brecha, tipo de rompimento (*overtopping* ou *overtop breach*), cota do vertedouro utilizada e modelo chuva-vazão no software HEC-HMS (modelo numérico).

Xu e Zhang (2009) conduziram análise quantitativa do processo de rompimento de uma barragem avaliando parâmetros como geometria e duração da ruptura e taxa de saída de pico, tendo como principal objetivo o desenvolvimento de fórmulas empíricas robustas com significado físico para avaliar o rompimento de barragens a partir de 182 casos para represas superiores a 15 m. Utilizaram modelo de regressão não linear para avaliar relações empíricas entre cinco parâmetros: profundidade, largura máxima e média, taxa de saída de pico e tempo de falha da barragem. Ainda foram selecionadas cinco variáveis de controle da barragem: altura, coeficiente de forma do reservatório, tipo, modo de falha e erodibilidade.

Como resultados, Xu e Zhang (2009) avaliaram a importância relativa de cada variável de controle, sendo que a erodibilidade da barragem (característica do material utilizado no modelo físico) foi considerada o fator mais importante, sendo capaz de influenciar os outros cinco parâmetros analisados, mostrando que os resultados encontrados neste trabalho estão em consonância técnica experimental.

Ainda relatam que, o coeficiente de forma do reservatório e o modo de falha também desempenharam um papel importante no modelo de previsão, parâmetros que também foram considerados, incorporados e avaliados no modelo físico e numérico desenvolvidos neste artigo.

Ferreira e Andrzejewski (2015) utilizaram equações empíricas aplicadas em uma barragem com características representativas de projetos na região amazônica, ou seja, barragem de terra, reservatório volumoso e vazão afluyente alta. Os resultados mais relevantes do modelo *breach* foram geometria da brecha, a sua evolução temporal e o hidrograma defluente gerado pelo rompimento, sendo os mesmos parâmetros utilizados no modelo físico apresentado. Entre os resultados apresentados pelo modelo *breach* (brechas), as vazões de pico, nos casos de pico e galgamento, foram bastante superiores em relação às fórmulas empíricas.

De acordo com Ferreira e Andrzejewski (2015), o pico de vazão estimado no *breach*, para os casos do *piping*, foi 1,4 vezes o maior valor estimado pelas fórmulas empíricas, e para os casos de galgamento, 3,4 vezes o maior valor, ambos valores contradizentes com os resultados encontrados nesta pesquisa, justificados pelo diferente fator escala e material utilizados, além do modelo e equações utilizadas (Tabela 5). Para o caso de galgamento, o tempo de formação de brecha foi 7,7 vezes o maior valor estimado pelas fórmulas empíricas, resultados estes, alinhados com os encontrados nesta pesquisa, ou seja, com maiores magnitudes (Tabelas 4 e 5).

Ainda sobre a influência de parâmetros definidores da brecha de ruptura em barragens de terra, Gomes *et al.* (2015) analisaram os seguintes parâmetros: cota de base, declividade da parede lateral e evolução temporal da brecha, constatando que a largura da base inferior da brecha não impactou significativamente nas variáveis analisadas. O aumento da declividade das paredes laterais provocou o aumento da vazão de pico a jusante da barragem devido à maior área da brecha final.

Já Pereira *et al.* (2017), compararam modelos simplificados com o modelo HEC-RAS aplicado em áreas de inundação após simulação de rompimento de algumas barragens situadas no Estado de Minas Gerais. Como resultado, os modelos simplificados estimaram maior vazão máxima gerada em função da altura da barragem e conseqüentemente, apresentaram maior área de inundação do que o modelo HEC-RAS.

Diante dessas análises, observa-se que dependendo da escolha do modelo e método de análise de ruptura de barragem, os resultados estimados podem ser bastante variados. Várias técnicas estão disponíveis para estimar o rompimento de barragens e subsequente falha de barragens. Essas técnicas são predominantemente empíricas, baseadas em relações de ajuste de parâmetros chave como profundidade da barragem, volume do reservatório e observações históricas das dimensões, formas e tempo de formação de brechas.

Conclusões

Diante das simulações realizadas a partir do modelo físico reduzido (rompimento da barragem por formação de brecha), conclui-se que:

- (1) A vazão de rompimento da barragem de terra lago Lúzio de Freitas Borges, foi 13 vezes maior em relação à vazão de entrada, evidenciando que estruturas de macrodrenagem a jusante do barramento não dimensionadas para esta vazão podem sofrer inúmeros danos afetando de forma significativa o meio ambiente, trânsito, a qualidade das águas superficiais e subterrâneas e principalmente, a sociedade (risco de morte);
- (2) O rompimento da barragem não foi do tipo brusco, fato que possivelmente contribuiu para que a vazão de rompimento não chegasse a um valor tão elevado como o de Oliveira, Nunes e Mendes (2019);
- (3) A importância desse tipo de estudo (modelo físico) apresenta como aspecto positivo, capacidade de complementar e subsidiar tecnicamente concepções de novas barragens, pois, além de gerar dados de vazões, também permite estudar o comportamento das estruturas hidráulicas envolvidas e materiais utilizados, possíveis falhas de projeção e eventuais fenômenos naturais extremos, como chuvas de maior intensidade, enchentes e rompimentos de barragens em cascata, como já proposto como tema de interesse por Campos *et al.* (2020) em suas considerações finais;
- (4) Após o rompimento da barragem e estabilização da vazão, também foi possível observar que o rompimento proporcionou um carreamento substancial de sólidos, fato este que, se fosse real, causaria impactos significativos a jusante,

como: diminuição da altura útil do canal, erosões ao longo do curso d'água, obstrução das estruturas hidráulicas e alteração temporária da cor e turbidez da água, enchentes e outros danos ambientais e sociais;

- (5) Destaca-se como aspecto que ainda merece maiores investigações, o emprego de materiais diferentes aos utilizados no barramento original (por dificuldade de aquisição e modelagem) e não avaliação completa do fator escala, necessitando de maiores estudos no que diz respeito a composição estrutural do material utilizado (solo), grau de compactação e variações nas escalas dos elementos construtivos do modelo físico.

Por fim, constata-se que o modelo físico se demonstrou eficiente para simulações de rompimento de barragem, no que tange a geração de vazões de rompimento. Apesar dos poucos recursos tecnológicos, o modelo mostrou-se inicialmente promissor para contemplação de barragens. A compreensão do comportamento do rompimento de barragens pelo modelo físico permite evitar no decorrer do planejamento, projeto, execução e operação da barragem, impactos ao meio ambiente e prejuízos ao patrimônio público e privado.

Referências

ANA (Agência Nacional de Águas). *Manual do empreendedor sobre segurança de barragens*: volume IV: guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE. Brasília: ANA, 2016.

AURELI, F. *et al.* Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure. *Advances in Water Resources*, v. 76, p. 29-42, 2015.

BRASIL. *Lei Federal 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm Acesso em: 16 mar. 2017.



CAMPOS, R. G. D. *et al.* Breach parameters for cascade dams' breaks using physical, empirical and numerical modeling. *Brazilian Journal of Water Resources – RBRH*, v. 25, e30, 2020.

ERPICUM, S. *et al.* Dam-break flow numerical modeling considering structural impacts on buildings. *In: IAHR CONGRESS, 33., 2009, Vancouver. Proceedings [...]*. Vancouver: IAHR, 2009. p. 3951–8.

FERREIRA, A. L. M; ANDRZEJEWSKI, E. A. Comparação de métodos de cálculo da ruptura de uma barragem. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., 2015, Foz do Iguaçu. Anais [...]*. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015. p.1–12.

GALLEGOS, H. A.; SCHUBERT, J. E.; SANDERS, B. F. Structural damage prediction in a high-velocity urban dam-break flood: Field-scale assessment of predictive skill. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 38, n. 10, p. 1249–1262, 2012.

GEE, D. M. Use of breach process models to estimate HEC-RAS dam breach parameters. *In: JOINT FEDERAL INTERAGENCY CONFERENCE, 2., 2010, Las Vegas. Proceedings [...]*. Las Vegas, 2010. Não paginado.

GOMES, J. *et al.* Investigação da influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem sobre o hidrograma de cheia a jusante. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., 2015, Foz do Iguaçu. Anais [...]*. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015. p.1–20.

MELLO, F. M. DE; SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. *Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil*. Rio de Janeiro: CBDB, 2021.

HELLER, V. *Landslide generated impulse waves–Prediction of near field characteristics*. Thesis (PhD in Sciences) – ETH Zurich, Zurich, 2007.

HELLER D.; HAGER W. H. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 136, n. 3, p.145–155, 2010.

ICOLD (International Commission on Large Dams). *Lesson from dams incidents*. Paris: CIGB, 1973.

KANASHIRO, W. H. Técnicas de laboratório para estudo em modelos reduzidos in Comitê Brasileiro de Barragens. *In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 29., 2013, Porto de Galinhas. Anais [...]*. Rio de Janeiro: CBDB, 2013. p. 2.



LIANG, Z.; REINHORN, A. M. *Modeling and similitude*. Lecture notes of Department of Civil, Structural and Environmental Engineering of University at Buffalo, Buffalo New York, 2008.

OLIVEIRA, J. F.; NUNES, E. D.; MENDES, T. A. Uma análise da aplicação do modelo HEC-HMS na determinação de vazões de rompimento de pequenos barramentos: o caso do reservatório Lúzio de Freitas em Inhumas, GO. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 793-813, 2019.

PEREIRA, C. E. *et al.* Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. *Revista Recursos Hídricos*, v. 38, n. 1, p.75-90, mar. 2017.

SAMPAIO, T. V. *et al.* Realidade aumentada em modelos físicos de rompimento de barragens: Um estudo do padrão de escoamento no caso Bento Rodrigues em Mariana/MG. *In*. SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE, 13., 2016. *Anais* [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2016. p.1-7.

THAKUR, B. *et al.* Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in Precipitation Runoff Modelling and Evaluating Flood Plain Inundation Map. *In*. World Environmental and Water Resources Congress, 2017, Sacramento. *Proceedings* [...]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2017. p. 240-251.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-HMS User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Davis, 2010.