

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA À EQUAÇÃO DE BRECHA, MALHA NUMÉRICA E AO COEFICIENTE DE MANNING

Júlia Mendonça Cardoso de Mello¹; Julian Cardoso Eleutério²

Palavras-Chave – Estudo de ruptura hipotética, Vargem das Flores, modelagem hidrodinâmica.

INTRODUÇÃO

Atualmente, ao se abordar temas relacionados a barragens com fins de contenção de sedimentos, de rejeitos ou de armazenamento de água, há uma reação imediata em relação a suas possíveis falhas e rupturas. As ondas de cheias causadas pelo rompimento de um barramento geram vazões e velocidades muito superiores às cheias naturais, o que causa grandes impactos tanto para a população a jusante da estrutura quanto para o meio ambiente ali inserido. Segundo Jonkman (2016), as perdas de vida humana associadas aos eventos de inundação decorrentes do rompimento de barragens são as principais consequências desses. Logo, é de suma importância a análise prospectiva, tanto da inundação quanto da vulnerabilidade de populações a jusante dessas estruturas, o que possibilita avaliar alternativas para mitigar o risco de forma a subsidiar tomadas de decisão.

Apesar do amplo conhecimento relacionado à importância do gerenciamento de risco de uma emergência, diversos fatores são dificultadores na fase de antecipação e preparação. Balbi (2008) cita diversos pontos importantes, como a qualidade de levantamentos topográficos e manuais de qualidade para gestão de riscos. Além disso, a comunicação juntamente à população diretamente afetada é delicada, devido a diversos fatores. Sampaio (2016) demonstra, no âmbito de Planos de Ações Emergenciais (PAE), a fragilidade da legislação quanto à responsabilidade de divulgação do plano e de seu treinamento com as comunidades afetadas. Além disso, o autor demonstra as inúmeras incertezas associadas a um estudo de ruptura hipotética, alicerce para a gestão de emergências e análise de vulnerabilidade. Tschiedel (2017) apresenta algumas das incertezas dos dados iniciais do estudo de Dam Break, a saber: levantamento das informações topográficas a jusante do barramento; resolução espacial dos modelos digitais de elevação (MDE); e a evolução da brecha.

Para conhecer bem o risco do evento e seu impacto, é de suma importância a realização de um estudo de ruptura hipotética com base em dados confiáveis, referentes à estrutura, ao material contido nesta, às características do vale e populações a jusante, à base topográfica entre outros. Além de dados de qualidade, metodologias e modelos adequados devem ser empregados, e os efeitos e respostas relacionados à ruptura hipotética devem ser avaliados tecnicamente quanto à representatividade que esses podem ter de eventos que possam ocorrer. Nem sempre dados de qualidade estão disponíveis, e tampouco é bem definido qual é o melhor método disponível, logo é fundamental compreender a sensibilidade de análises de risco a diferentes partes da análise para orientar decisões e aprimoramento de técnicas.

1) Engenheira Civil na Tetra Tech América do Sul, (31) 9 9456-9459 (juliamcmello@gmail.com)

2) Docente do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (EHR) / SMARH / UFMG, (31) 3409-1755 (julian.eleuterio@gmail.com)

Nesse contexto, para este trabalho, opta-se por analisar o impacto da variação de parâmetros iniciais em uma simulação de ruptura hipotética de uma barragem de contenção de água. Para tal, informações da barragem da Represa Vargem das Flores foram utilizadas no contexto de um estudo teórico e hipotético. A represa, também conhecida como Várzea das Flores, pertence ao sistema de abastecimento metropolitano da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), sob responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG). No trabalho é verificada de forma determinística a sensibilidade dos resultados da modelagem à equação de brecha utilizada (Froehlich 2008 e Froehlich 2016), à precisão topográfica (diferenciação da malha entre células de 30 m x 30 m e 15 m x 15 m), ao refinamento da malha numérica (refinamento feito com células de 15 m x 15 m e 5 m x 5 m) e aos coeficientes de rugosidade empregados (distinção entre o uso de um coeficiente de rugosidade médio e coeficientes espacialmente distribuídos com base no uso e ocupação do solo). Os cenários são analisados e comparados em relação a características da propagação da onda no vale a jusante e seus respectivos mapas de inundação. Ressalta-se que o trabalho não busca uma representação precisa do fenômeno, uma vez que são feitas diversas simplificações e utilizadas algumas bases de dados de baixa resolução.

METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa foi desenvolvida em 4 etapas: 1) consolidação dos dados de entrada dos modelos referentes ao estudo de caso; 2) definição dos cenários determinísticos de simulação considerando faixas de variação para os parâmetros iniciais de modelagem; 3) desenvolvimento das brechas e dos hidrogramas da ruptura hipotética da Represa Vargem das Flores; e 4) determinação de coeficientes de Mannig e malhas numéricas, e simulação hidrodinâmica da propagação das ondas hipotéticas referentes aos diferentes cenários para o vale a jusante. Todas as etapas foram desenvolvidas com base em premissas clássicas relacionadas ao desenvolvimento de estudos do tipo *Dam-break*, conforme detalhado na sequência desse artigo.

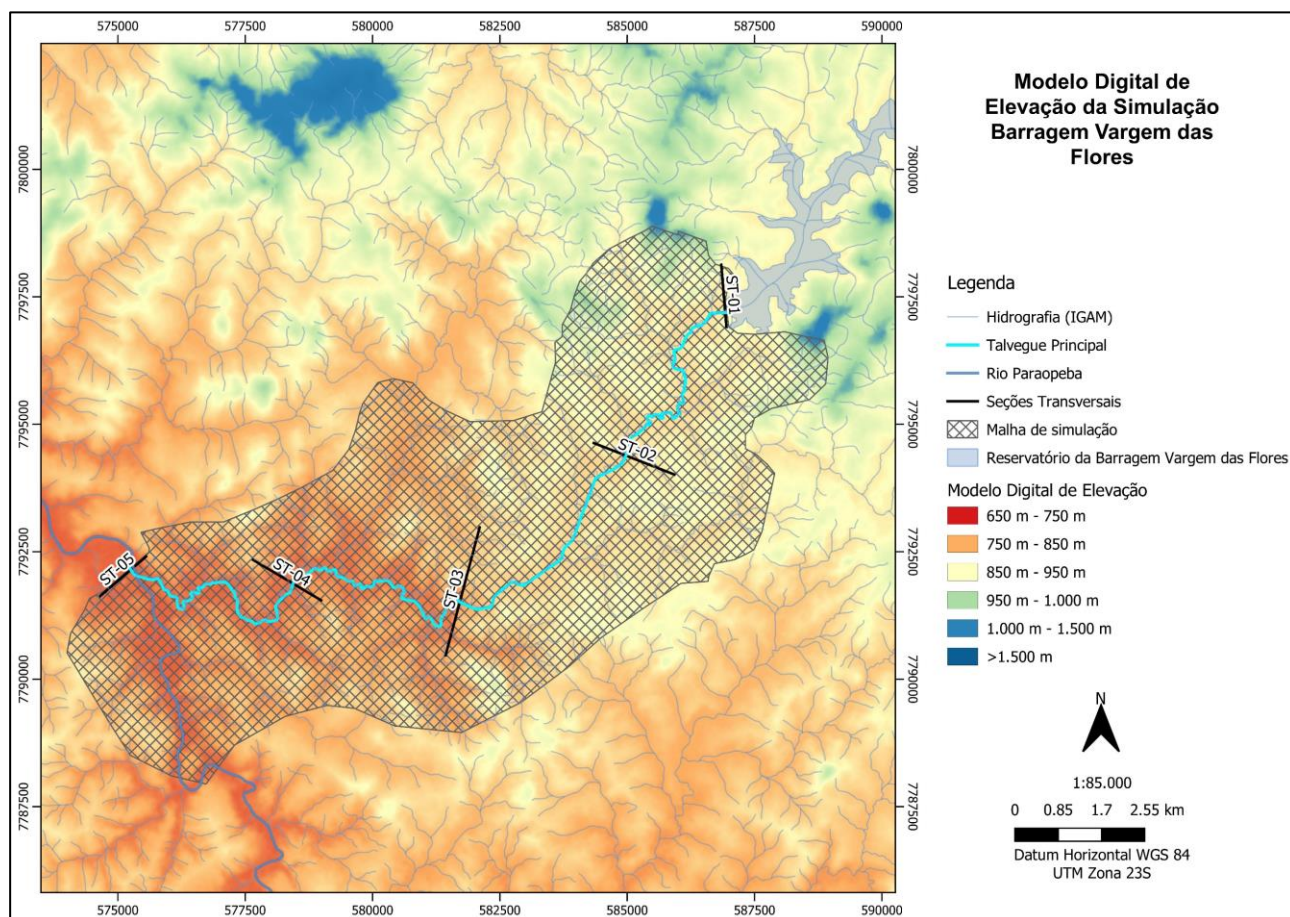
Estudo de caso: dados da Barragem Vargem das Flores (MG)

O presente trabalho foi desenvolvido exclusivamente a partir de dados públicos referentes à Barragem Vargem das Flores (BVF) e simplificações hipotéticas para dados não disponíveis. A BVF situa-se na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), sendo 90% de seu reservatório localizado no município de Contagem (MG) e 10% no município de Betim (MG) (Cândido, 2018). Segundo a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PBH, 2016), a estrutura foi inaugurada em 1973, sendo componente do Sistema Integrado da Bacia do Paraopeba juntamente com as represas Serra Azul e Rio Manso.

No ano de inauguração (1972), consta que a barragem possuía altura de 22 metros, com cota de crista na elevação 838,00 m, com volume de 39.464.375 m³ e área de 4.844.423 m². Curvas cota vs. volume do reservatório foram obtidas para os anos de 1972, 2000 e 2009 (Santos, 2012). Outras fontes trazem informações díspares das apresentadas sem, no entanto, apresentar levantamentos recentes (PBH, 2016; Souza, 2003 *apud* Lima, 2018; Cândido, 2018). Levantamentos técnicos atualizados seriam necessários para se obter informações mais detalhadas, no entanto, conforme já mencionado, não sendo objeto do estudo a representação fidedigna do caso, para o presente trabalho, utilizou-se os dados fornecidos por Santos (2012). Devido à falta de informações acerca da geometria do maciço do barramento, dado fundamental para a formação da brecha de ruptura, definiu-se a geometria da estrutura pelo *Google Earth*, a partir da informação referente à altura da barragem. As inclinações de montante e jusante do dique da barragem foram consideradas iguais, calculadas com base na estimativa do comprimento do ponto central da crista até o pé do barramento (50 metros), resultando em taludes com inclinação de 2,3H:1,0V. A largura da estrutura foi estimada em 8,0 m.

Para representação da topografia do vale a jusante da barragem (Figura 1), foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) Alos Palsar, com resolução horizontal de 12,5 m. A partir deste, foram geradas curvas de elevação com equidistância de 5,0 m. Após a geração das curvas, a calha referente ao talvegue principal de simulação foi corrigida, evitando pontos de menor altitude a montante de elevações maiores, a fim de prevenir a representação errônea de pequenos reservatórios ao longo da calha.

Figura 1 – Representação do MDE utilizado e da abrangência do modelo hidrodinâmico, da barragem até o encontro do talvegue principal com o Rio Paraopeba.



Determinação dos cenários de simulação

Conforme introduzido, devido às incertezas encontradas acerca dos modelos hidráulicos, informações do barramento e até distintas metodologias de cálculo de brecha disponíveis, foram adotadas diferentes premissas para a construção do modelo e da onda de ruptura, a fim de verificar a sensibilidade da propagação da cheia frente às variações apresentadas. Foram assim concebidos 8 cenários determinísticos com base na variação da equação de brecha, da malha numérica e seu refinamento e de coeficientes de Manning (Tabela 1).

Tabela 1 – Cenários determinísticos simulados no contexto da análise de sensibilidade do modelo.

Cenários	Equação de Brecha e Hidrograma	Malha (m)	Refinamento da Malha (m)	Variação da Rugosidade
Cenário 01	Froehlich (2008)	30 x 30	15 x 15	Não
Cenário 02	Froehlich (2016)	30 x 30	15 x 15	Não
Cenário 03	Froehlich (2008)	15 x 15	5 x 5	Não
Cenário 04	Froehlich (2016)	15 x 15	5 x 5	Não
Cenário 05	Froehlich (2008)	30 x 30	15 x 15	Sim
Cenário 06	Froehlich (2016)	30 x 30	15 x 15	Sim
Cenário 07	Froehlich (2008)	15 x 15	5 x 5	Sim
Cenário 08	Froehlich (2016)	15 x 15	5 x 5	Sim

Hidrogramas de ruptura – equações de brecha

A brecha de ruptura foi calculada por duas equações clássicas: Froehlich (2008) e Froehlich (2016), conforme cenários pré-definidos (Tabela 1). Destaca-se que para todos os cenários analisados de ruptura hipotética da barragem, foi considerada a ruptura por galgamento, considerando-se a premissa de obstrução completa do sistema de vertimento. A equação 1 apresenta o cálculo da brecha e da inclinação lateral para Froehlich (2008), e a equação 2 o tempo de formação da brecha.

$$\bar{B} = 0,27 \cdot k_o \cdot V_w^{1/3} \quad (1)$$

Onde:

- ✓ $k_o = \begin{cases} 1,0 & \text{para piping} \\ 1,3 & \text{para galgamento} \end{cases}$
- ✓ V_w é o volume de água acima do ponto inferior da brecha, em m³.
- ✓ $z = \begin{cases} 0,7 & \text{para piping} \\ 1,0 & \text{para galgamento} \end{cases}$

$$t_f = 63,2 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g \cdot H_b^2}} \quad (2)$$

Onde:

- ✓ H_b é dado pela altura total do maciço, em metros;
- ✓ g é a aceleração da gravidade, em m/s².

A equação 3 apresenta o cálculo da brecha e da inclinação lateral para Froehlich (2016), e a equação 4 o tempo de formação da brecha.

$$B_{avg} = 0,23 \cdot k_M \cdot V_w^{1/3} \quad (3)$$

Onde:

- ✓ $k_M = \begin{cases} 1,0 & \text{para piping} \\ 1,5 & \text{para galgamento} \end{cases}$
- ✓ V_w é o volume de água acima do ponto inferior da brecha, em m³.
- ✓ $m = \begin{cases} 0,6 & \text{para piping} \\ 1,0 & \text{para galgamento} \end{cases}$

$$t_f = 60 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g \cdot H_b^2}} \quad (4)$$

Onde:

- ✓ H_b é dado pela altura total do maciço, em metros;
- ✓ g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 .

Os hidrogramas de ruptura foram estimados a partir do software HEC-HMS 4.3, levando em conta a curva cota vs. volume do reservatório datada do ano de 1972, ano de inauguração da barragem, oriunda de Santos (2012).

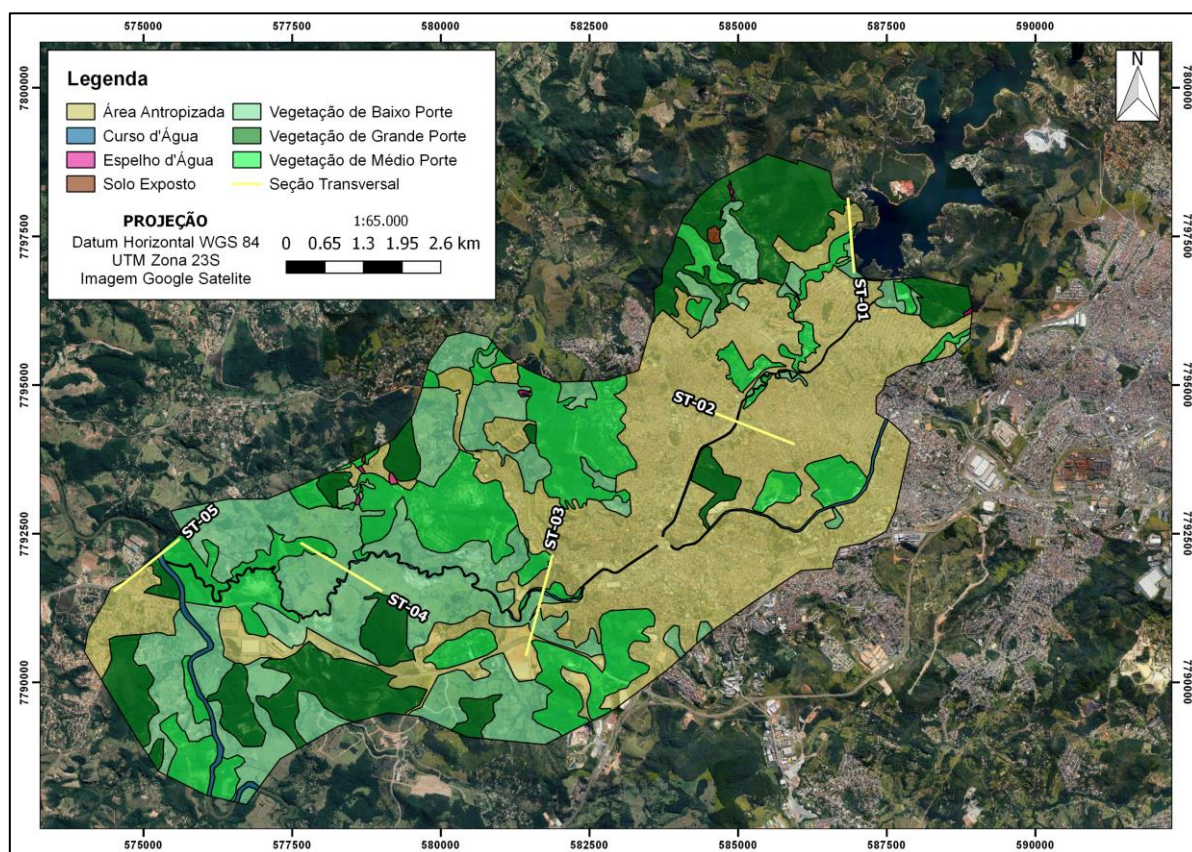
Modelagem e mapeamento da inundação – Manning e malha numérica

A propagação dos hidrogramas de ruptura ao longo da calha principal foi realizada com o auxílio do *software* HEC-RAS 5.0.7, modelo integrado 1D/2D, no qual utilizam as equações de escoamento do modelo 1D para o cálculo de nível de água e velocidade ao longo da calha, juntamente ao modelo 2D para a simulação do escoamento nas zonas inundáveis. A área de abrangência do modelo e as seções utilizadas para análise dos resultados das simulações estão dispostas na Figura 1.

Conforme já apresentado (Tabela 1), adotou-se duas distintas malhas para a simulação da onda de ruptura: 30 m x 30 m para planície com refinamento no talvegue principal de 15 m x 15 m; e 15 m x 15 m na planície com refinamento de 5 m x 5 m no talvegue. Destaca-se que os limites geométricos de ambas as malhas foram os mesmos (Figura 1). O talvegue principal, utilizado para refinamento da malha citada anteriormente, foi definido com base em arquivos shapes de origem do Instituto Mineiro de Gestão de águas (IGAM). Verificou-se que, devido à canalização do talvegue em diversos pontos, ou para manutenção deste dentro da calha principal delimitada pela topografia de base pública, o talvegue foi corrigido manualmente por meio do *software* Quantum Gis (QGis), utilizando imagens de satélite do *Basemap* disponível no programa. Definidas as malhas de simulação e talvegue principal, foram determinadas as condições de contorno de montante e jusante da simulação. A montante, utilizou-se os hidrogramas de ruptura calculados segundo premissas e cenários apresentados, e para jusante, adotou-se a premissa de ocorrência de profundidade normal para declividade de 0,5%, tendo como base a declividade de fundo da calha principal (Figura 1).

A definição da rugosidade de Manning para a área a jusante do barramento foi realizada com base na análise de classes de uso e ocupação do solo, determinadas por meio de classificação visual de imagens de satélite disponibilizadas pelo QGis por meio do plugin QuickMapServices (Figura 2). Os valores da rugosidade de Manning foram extraídos de CHOW (1959) e categorizados em: área antropizada ($n=0,100$), vegetação de grande porte ($n=0,080$), vegetação de médio porte ($n=0,065$), vegetação de baixo porte ($n=0,050$), solo exposto ($n=0,045$), espelho d'água e curso d'água ($n=0,040$). Ressalta-se que para fins de comparação, um cenário alternativo considerou a premissa de um coeficiente de Manning médio único para toda a área, de valor $n = 0,06$, fundamentando os cenários onde não são consideradas variações na rugosidade (Tabela 1).

Figura 2 – Coeficientes de Manning determinados com base no uso e ocupação do solo utilizando o QGis.



RESULTADOS

As geometrias geradas para a brecha de ruptura encontram-se na Tabela 2. Já os hidrogramas de ruptura desenvolvidos estão apresentados na Figura 3 e sua propagação a jusante na Figura 4.

Tabela 2 – Resultados referentes as brechas de ruptura calculadas

Input	Froehlich (2008)	Froehlich (2016)
	Resultado	Resultado
Topo da brecha (m)	838,00	838,00
Fundo da brecha (m)	816,00	816,00
N.A. máximo (m)	838,00	838,00
H_b (m)	22,0	22,0
H_w (m)	22,0	22,0
V_m (m ³)	39.464.375	39.464.375
k_0 / km	1,30	1,50
z / m	1,00	1,00
B / B_{avg} (m)	107,1	117,5
B_b (m)	85,1	95,5
B_t (m)	129,1	139,5
t_f (horas)	1,60	1,52

Figura 3 – Hidrogramas de ruptura gerados para a simulação hidráulica.

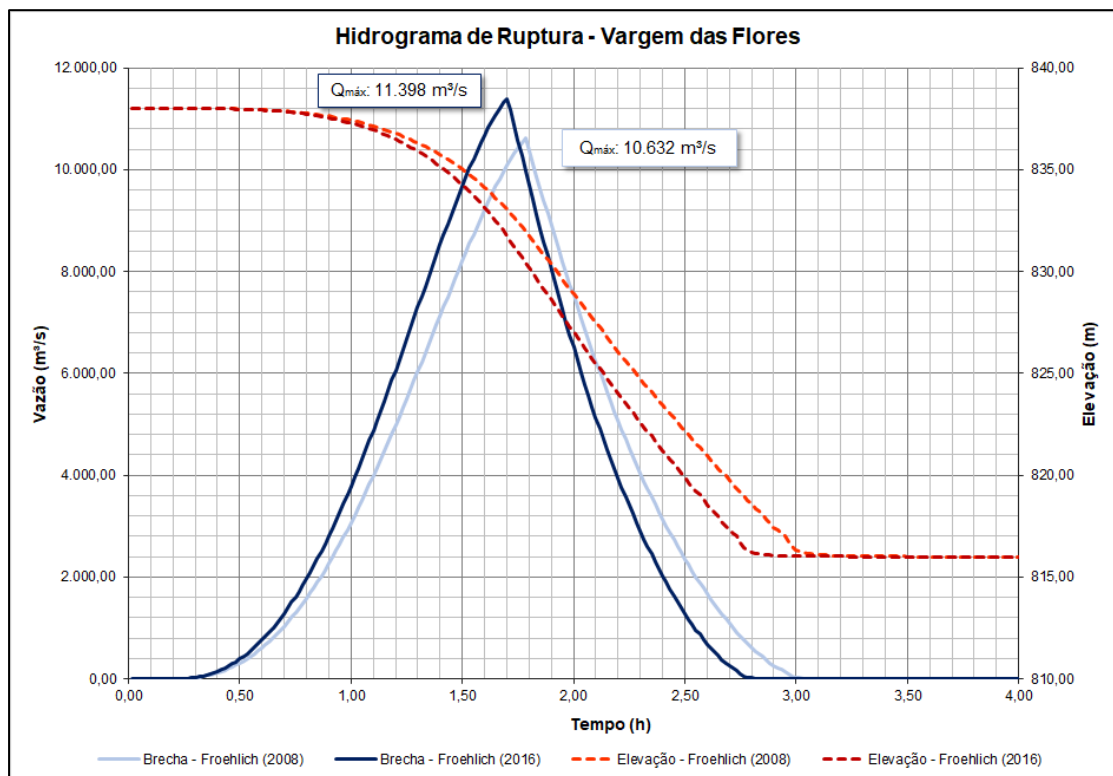
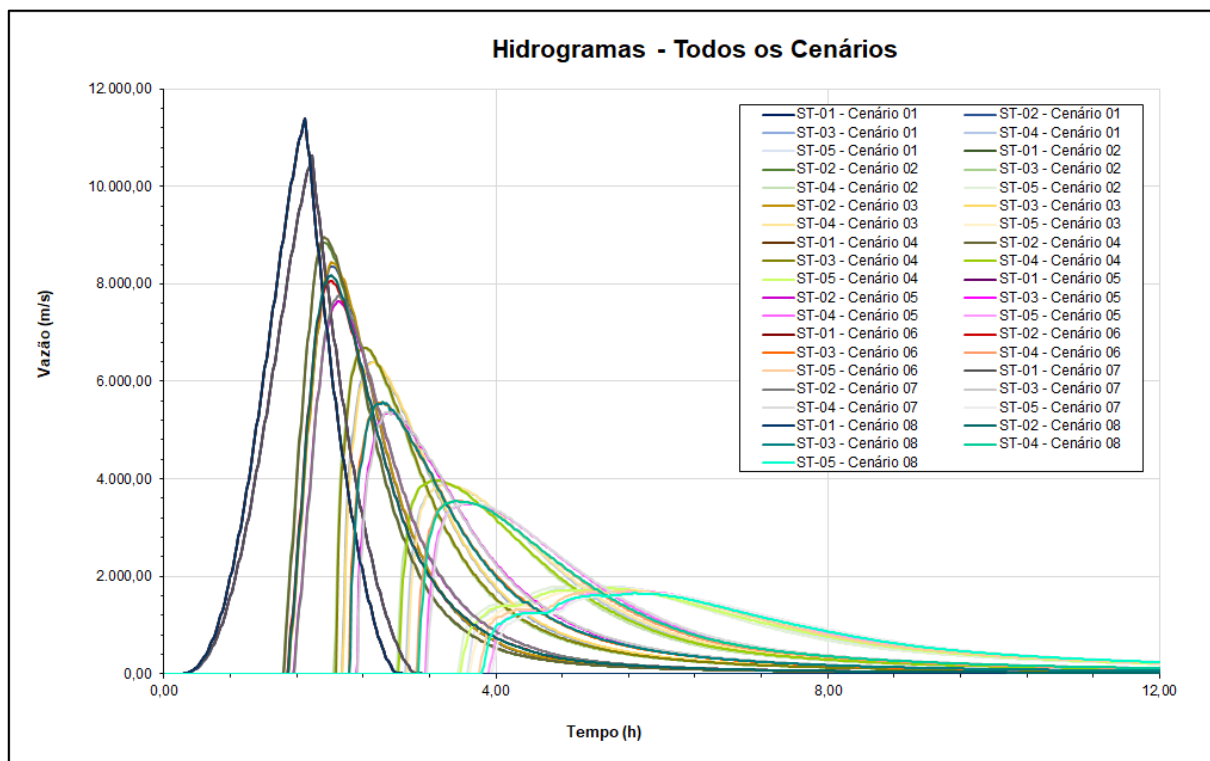


Figura 4 – Hidrogramas de vazão de pico para todos os cenários simulados e suas seções transversais.



Observa-se que a metodologia proposta por Froehlich (2016) gerou um hidrograma de ruptura no qual a vazão de pico é, aproximadamente, 7,2 % maior do que a metodologia de 2008 (Froehlich, 2008), com tempos de pico da vazão reduzidos em 5,0 %. Percebe-se, pela Figura 4 que as vazões de pico em cada seção e em todos os cenários seguiram o mesmo comportamento, com a redução do tempo de da vazão de pico e aumento das vazões. Os resultados de profundidade máxima são apresentados na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, e na Figura 5.

Tabela 3 – Resultados referentes as profundidades encontradas em cada cenário (em m).

Seção	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04	Cenário 05	Cenário 06	Cenário 07	Cenário 08
ST-01	5,64	5,80	5,60	5,78	5,51	5,72	5,47	5,65
ST-02	10,93	11,18	10,95	11,21	11,83	12,07	11,86	12,07
ST-03	3,71	3,75	2,79	2,86	2,86	3,42	2,57	2,62
ST-04	7,93	7,99	7,96	8,02	7,25	7,29	7,30	7,33
ST-05	4,33	4,34	4,32	4,33	4,10	4,05	3,89	3,89

Tabela 4 – Resultados referentes as velocidades encontradas em cada cenário (em m/s).

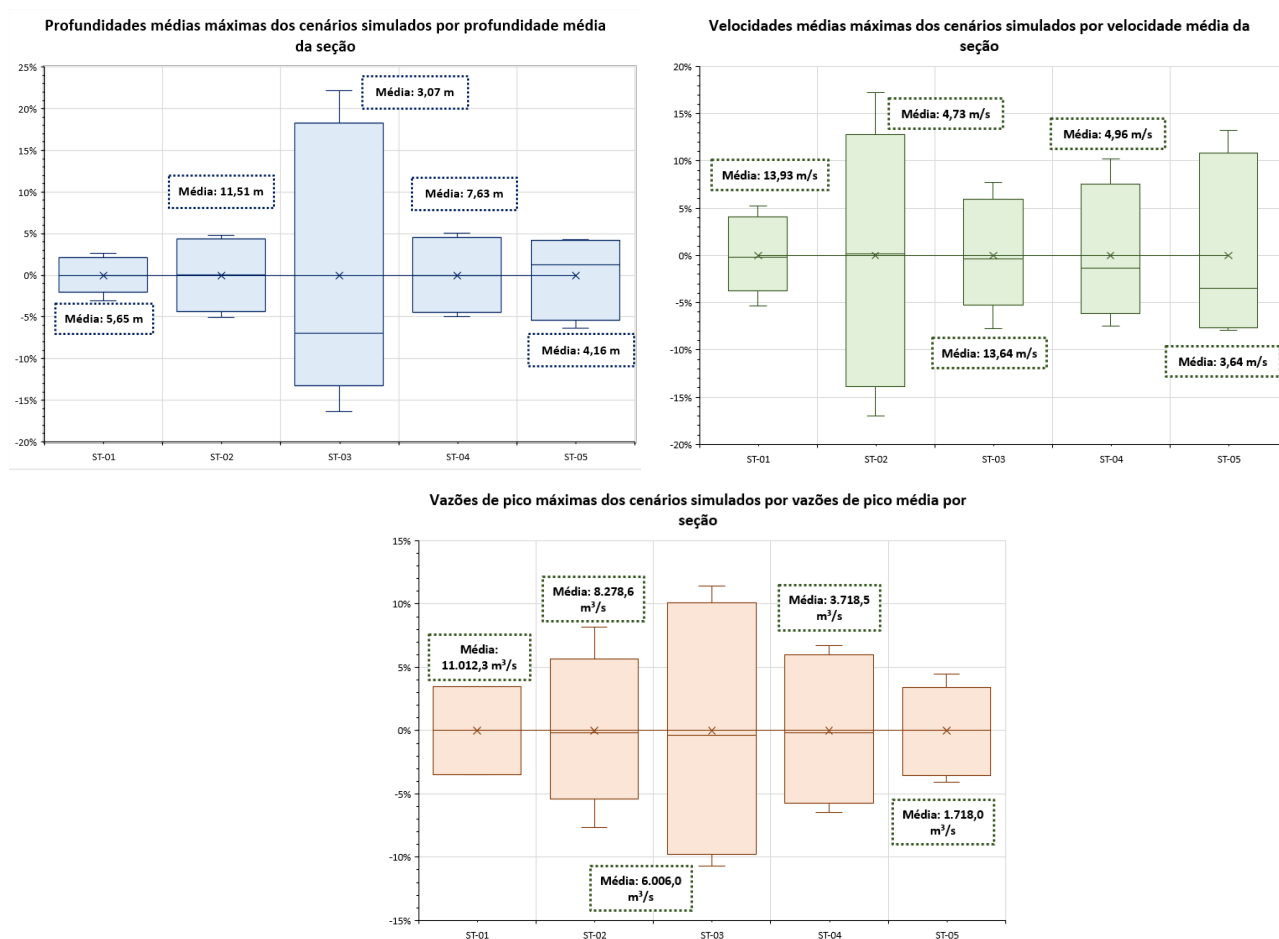
Seção	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04	Cenário 05	Cenário 06	Cenário 07	Cenário 08
ST-01	13,56	13,67	13,19	13,36	14,56	14,67	14,13	14,31
ST-02	5,08	5,22	5,37	5,55	3,93	3,99	4,31	4,40
ST-03	13,36	13,45	12,58	12,79	14,64	14,70	13,72	13,90
ST-04	4,59	4,64	4,73	4,78	5,01	5,05	5,44	5,47
ST-05	3,37	3,38	3,36	3,36	3,66	3,77	4,13	4,13

Tabela 5 – Resultados referentes as vazões de pico encontradas em cada cenário (em m³/s).

Seção	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04	Cenário 05	Cenário 06	Cenário 07	Cenário 08
ST-01	10.629,0	11.395,1	10.628,8	11.395,3	10.630,2	11.395,1	10.629,3	11.395,3
ST-02	8.355,7	8.848,0	8.438,4	8.953,7	7.646,6	8.061,7	7.756,2	8.168,6
ST-03	6.396,5	6.684,3	6.400,1	6.693,7	5.362,4	5.568,8	5.370,6	5.571,9
ST-04	3.878,4	3.959,5	3.885,5	3.969,1	3.476,9	3.546,2	3.492,7	3.539,3
ST-05	1.786,2	1.794,4	1.738,7	1.748,2	1.683,4	1.697,4	1.648,0	1.647,6

A partir da análise das profundidades, velocidades máximas e vazões de pico de cada cenário e cada seção, verificou-se que o fator que mais influenciou os resultados foi a mudança de rugosidade ao longo do terreno. A mudança de refinamento da malha também gerou impactos significativos em todos os cenários. A malha de 15 m x 15 m gerou menores vazões, menores profundidades, porém maiores velocidades de escoamento. Além disso, quando associado à mudança de rugosidade, as diferenças foram acentuadas. No entanto, a área inundada e consequente lateralidade da mancha não foram significativamente alteradas. Apenas 1% da área foi sub ou superestimada em função dos cenários propostos.

Figura 5 – Variação percentual da (a) profundidade média máxima; (b) velocidade média máxima e (c) vazão de pico média máxima, nas seções transversais analisadas.



CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O estudo realizado demonstrou que o parâmetro que gerou maior mudança nos resultados foi a mudança do coeficiente de rugosidade ao longo do terreno. Porém, existem diversas lacunas e imprecisões neste tipo de estudo, ainda mais com dados públicos de natureza imprecisa. As incertezas metodológicas associadas ao estudo de *Dam Break* podem, possivelmente, ocasionar em impactos na propagação da onda de ruptura e suas características.

Pode-se observar que o trabalho apresentado traz elementos que podem subsidiar a construção de cenários para testes de sensibilidade, relacionando os principais parâmetros do modelo computacional àqueles com maiores incertezas à disponibilidade e confiabilidade de dados. Além disso, considera-se que a análise determinística possibilita a comparação de resultados, porém não pode ser considerada suficiente para a avaliação completa das incertezas relacionadas aos parâmetros iniciais. Recomenda-se, para estudos futuros, a fusão destes com testes probabilísticos.

É importante destacar que os resultados aqui apresentados têm caráter exclusivamente exploratório e não representam a realidade da Barragem Vargem das Flores, devido a ser alicerçado em dados simples e com lacunas. Em estudos futuros, necessita-se de inputs da estrutura mais detalhados e a utilização de metodologias robustas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPQ, à FAPEMIG e à UFMG pelo amparo concedido para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema.

REFERÊNCIAS

- BALBI, D. A. F. (2008). *Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti - MG*. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CÂNDIDO, E. G. S. (2018). *Modelagem hidrogeológica aplicada à análise de transporte de contaminantes: estudo prospectivo da propagação de contaminação em aquífero livre poroso*. 2018. 153 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- FROEHLICH, D. C. (2008). *Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties*. v. 134, n. 10, p. 1532–1535, 2008.
- FROEHLICH, D. C. (2016). *Empirical model of embankment dam breaching*. River Flow - Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2016, n. November, p. 1821–1829, 2016.
- JONKMAN, S.N. et al. (2016). *Loss of life estimation - Review, developments and challenges*. in 3rd European Conference on Flood Risk Management, 2016, Lyon, França.
- LIMA, A. O. (2018). *Dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a área de proteção ambiental vargem das flores e alterações na qualidade da água do reservatório*. 2018. 83 p. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Bambuí, MG, Bambuí, 2018.
- REFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. (2016). *Plano municipal de saneamento de belo horizonte 2016/2019*. Belo Horizonte, Novembro 2016.
- SAMPAIO, J. A. L. (2016). *As deficiências do plano de ação emergencial das barragens no Brasil*. IMED, Belo Horizonte, 2016.
- SANTOS, S. P. (2012). *Morfometria, compartimentação e hidrodinâmica de um reservatório periurbano tropical: prognósticos sobre o tempo de vida útil do reservatório de vargem das flores, minas gerais – brasil*. 2012.
- TSCHIEDEL, A. F. (2017). *Aviação de fontes de incerteza em estudos de rompimento de barragens*. 207. 138 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- USACE. (2014). *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*. Us Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (Hec), n. August, p. 74, 2014.
- VIANINI NETO, L. (2016). *Estudo de ruptura da barragem da pampulha, em belo horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais*. 2016. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.