

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

METODOLOGIAS SIMPLIFICADA E COMPUTACIONAL NA PREVISÃO DO ALCANCE DE ONDAS PROVENIENTES DE RUPTURA DE BARRAGENS

*Igor Augusto Barcelos da Silva¹ ; Carlo Lucca Coutinho Ungaretti Rossi²; Rute Ferla³; Marcelo
Giulian Marques⁴ & Mauricio Dai Prá⁵*

RESUMO – Barragens são estruturas de extrema importância na sociedade atual, entretanto, apesar da evolução alcançada pelos estudos de segurança de barragens, a possibilidade de falha nunca é nula. No caso de uma ruptura, os efeitos ocasionados no vale de jusante são, na grande maioria, catastróficos. Dessa forma, é necessário que estudos sejam realizados para a determinação das áreas potencialmente inundáveis para que possam ser tomadas as devidas providências para proteger a população que viria a ser afetada. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo analisar e comparar o alcance máximo da onda de cheia, provocada pelo rompimento de uma barragem hipotética, calculado a partir de simulações hidrodinâmicas e a partir de uma metodologia simplificada de propagação. Foram propagados seis hidrogramas de ruptura por um canal fictício utilizando-se o software HEC-RAS e metodologia simplificada. Os resultados indicam que as metodologias tendem a encontrar resultados próximos para coeficientes de rugosidade de Manning mais elevados e diferem demasiadamente para coeficientes mais baixos.

ABSTRACT– Dams are extremely important structures in today's society, despite the evolution achieved by dam safety studies their possibility of failure is never zero. In case of a rupture, the effects caused in the downstream valley are usually catastrophic. Therefore, it is necessary that studies conducted to determine the potentially floodable areas to be executed based on appropriate data, in order to protect the population that would be affected. In this sense, this work's goal is to analyze and compare the maximum reach of the flood wave, caused by the rupture of a hypothetical dam, obtained from hydrodynamic simulations and from a simplified propagation methodology. Thus, six hydrographs of rupture were propagated through a fictitious channel using the HEC-RAS software and the simplified method presented by Melo (2015). The results indicate that the methods tend to find close results for higher Manning roughness coefficients and differ for lower coefficients.

Palavras-Chave – HEC-RAS, métodos simplificados, alcance da onda de cheia.

1. INTRODUÇÃO

A espécie humana constrói barragens desde o início da civilização e essas estruturas são fundamentais para o desenvolvimento da mesma, uma vez que possuem diversos usos, como, por exemplo, controle de cheias, irrigação, consumo humano, geração de energia, lazer, entre outros. De

1) Graduando de Engenharia Civil da UFRGS. igrbels@googlemail.com

2) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS. rossi.carlolucca@gmail.com

3) Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS. rute.ferla@ufrgs.br

4) Professor da UFRGS. mmarques@iph.ufrgs.br

5) Professor da UFRGS. mauricio.daipra@ufrgs.br

acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (2001), uma barragem segura é aquela cujo desempenho garanta aceitável nível de proteção contra ruptura, ou galgamento sem ruptura, conforme os critérios de segurança dos órgãos responsáveis.

A Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída em 2010 por meio da Lei 12.334, impõe a revisão periódica da segurança das barragens brasileiras e, além disso, obriga a criação do Plano de Segurança de Barragens que, entre outros itens, estabelece a elaboração de Planos de Ação Emergencial (PAE) para barragens de risco considerado elevado segundo critérios dos órgãos fiscalizadores. O PAE é um documento técnico, que deve prever situações que possam pôr em risco tanto a integridade da barragem quanto da área que pode ser afetada no caso de colapso da mesma, e também as ações a serem tomadas nessas situações. Para elaborá-lo são necessárias informações específicas do dano que um rompimento pode causar a jusante do barramento, como, por exemplo, a distância máxima que pode ser afetada por uma onda de cheia proveniente de um rompimento, objeto de estudo deste trabalho.

Estudos a respeito dos impactos de rompimentos de barragens (Dam-Break) são realizados, em geral, por meio de simulações computacionais baseadas, em sua maioria, na modelagem hidráulica e hidrodinâmica das equações de Saint-Venant. Tais análises exigem, em alguns casos, grande quantidade de dados de entrada e tempo de processamento computacional, o que acaba tornando o processo caro e demorado. Tendo isso em vista, o desenvolvimento de metodologias simplificadas torna-se uma alternativa para que estudos semelhantes sejam feitos de maneira mais ágil, com menos dados, entretanto mantendo a qualidade da análise de modo a atingir resultados próximos aos métodos mais complexos. Deste modo, este trabalho visa avaliar os resultados obtidos com o método simplificado denominado *Simplified Dam-Break Flood Modeling* (MELO, 2015) e compará-los com os resultados provenientes de simulações computacionais.

2. ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS

Em geral, as informações necessárias para a realização de estudos de ruptura de barragens dependem das particularidades de cada área. No entanto, destaca-se que para a maioria dos estudos são necessárias informações quanto à rugosidade do vale de jusante, hidrograma de ruptura oriundo da brecha no maciço da barragem, volume do reservatório e topografia do vale de jusante.

As simulações computacionais estão entre as principais alternativas para a realização deste tipo de estudo. O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), por exemplo, é um software muito aceito no meio científico, além de se tratar de um software livre, com design simples, que possui grande quantidade de material disponível para consulta acerca de como utilizá-lo e também permitir a importação de dados de softwares de geoprocessamento. A respeito da análise de rompimento de barragens, o HEC-RAS também é um dos modelos mais utilizados,

podendo, segundo Ferla (2018), ser considerado o atual estado da arte no assunto. Assim, uma vez que se possuam as informações necessárias, podem ser adotadas diferentes estratégias de simulação.

Almeida e Franco (1994 apud COLLISCHONN & TUCCI, 1997) indicam que uma das principais estratégias de simulação consiste na propagação de um hidrograma pelo vale de jusante. O hidrograma de ruptura é obtido a partir de estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento do reservatório, volume do reservatório e forma do hidrograma, e consiste numa descrição cronológica das vazões defluentes de uma brecha em um rompimento. Assim, o hidrograma de ruptura influi diretamente nos tempos de alerta e evacuação de áreas a jusante, níveis de inundação, além de velocidades de escoamento associados. Estes dados são fundamentais para elaborar-se um plano de emergência realista, que proporcione a minimização do número de vítimas, perdas econômicas e de danos do meio ambiente (SALIBA, 2009). Dessa forma, a estimativa do hidrograma de ruptura é fundamental para a elaboração de um PAE.

2.1. Determinação da vazão de pico do hidrograma

Segundo Pierce et al (2010), diversas pesquisas com o objetivo de desenvolver métodos para prever a vazão de pico de um rompimento de barragem já foram feitas. Grande parte dessas pesquisas utilizaram da análise de regressão para relacionar a vazão de pico com a profundidade de água no momento da falha, o volume do reservatório no momento da falha ou um produto da profundidade e do volume. Dentre essas equações, a de Kirkpatrick (1977) corresponde a mais antiga, a de Froehlich (1995) é uma das mais utilizadas e a de Ferla (2018) corresponde a uma das mais recentes. As equações citadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações de vazão de pico.

| Autor (ano) | Equação |
|--------------------|--|
| Kirkpatrick (1977) | $Q_{max} = 1.268 \cdot (H_w + 0.3)^{2.5}$ |
| Froehlich (1995) | $Q_{max} = 0.607 \cdot (V_w^{0.295} \cdot H_w^{1.24})$ |
| Ferla (2018) | $Q_{max} = \frac{H_w^{0.56} \cdot V_w^{0.45}}{3}$ |

Onde: Q_{max} : Vazão de pico do acidente (m^3/s); H_w : Altura de água no momento do rompimento (m); V_w : Volume do reservatório no momento do rompimento (m^3).

2.2. Determinação do tempo pico e tempo de base do hidrograma

Como apontado por Wahl (2004), o tempo de formação da brecha em grandes reservatórios, geralmente, coincide com o tempo de pico do hidrograma de ruptura. O tempo de formação da brecha pode variar dependendo da causa, do material e do tipo da barragem, por exemplo, em

barragens de concreto em arco a brecha se forma de maneira extremamente rápida, o que não ocorre em barragens de terra.

Existem diversas metodologias para a definição do tempo de pico do hidrograma, como por exemplo as equações de Froelich (2008) e a de Bureau of Reclamation (1988). Ambos basearam-se em diversos casos de rompimento de barragens de variados tipos para estabelecer suas equações para a determinação do tempo de formação da brecha, apresentadas nas equações (1) e (2), respectivamente.

$$t_f = 63,2 \sqrt[2]{\frac{V_w}{9,81 H_b^2}} \quad (1)$$

$$t_f = 0,03 \cdot H_b \quad (2)$$

Sendo: t_f : Tempo de formação da brecha, ou tempo de pico (s); V_w : Volume de água no momento do rompimento (m^3); H_b : Altura da barragem (m).

3. RUGOSIDADE DOS CANAIS

De acordo com Lyra et al. (2010), pela teoria do escoamento em canais abertos, o coeficiente de rugosidade de Manning é um dos principais parâmetros para a avaliação da propagação de uma vazão sobre uma superfície. Uma das dificuldades para a aplicação da equação de Manning é a definição do seu coeficiente de rugosidade em rios e canais. Conforme indicado por CHOW (1959), por exemplo, a definição do coeficiente de Manning é particularmente sensível de acordo com as características dos rios.

4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE PROPAGAÇÃO

Em função da crescente necessidade pela quantificação dos efeitos da ruptura de barragens em prazos cada vez mais curtos, diversas metodologias simplificadas vêm sendo desenvolvidas. Segundo Ferla (2018), o interesse pelo desenvolvimento de métodos simplificados para determinação de características envolvendo rompimento de barragens já é conhecido há, pelo menos, 40 anos.

Melo (2015) destaca que a utilização de abordagens simplificadas de métodos de rompimento de barragens ocorre devido à falta de informações necessárias quando da utilização de abordagens sofisticadas, como, por exemplo, dados de terreno, formas de falha no maciço da barragem, dados hidráulicos e hidrológicos, entre outros.

4.1. Método *Simplified Dam-Break Flood Modeling* (MELO, 2015)

O método simplificado para análise de ondas de cheia oriundas do rompimento de barragens organizado e descrito por Melo (2015), desenvolvido pela equipe do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foi subdividido em três etapas, sendo estas baseadas, também, em estudos de outros pesquisadores. Estas etapas, sucintamente, são:

- Propagação da vazão máxima do rompimento: dá-se pela resolução de uma das possíveis equações simplificadas para determinação da vazão de pico;
- Propagação da vazão máxima a jusante: para esta etapa o autor desenvolveu as equações 3, 4, 5 e 6 (apresentadas abaixo) baseadas em regressões a partir de dados de rupturas existentes

Para $V_r \leq 1000 \text{ hm}^3$:

$$D_{max} = 8,870 * 10^{-8} V_r^3 - 2,648 * 10^{-1} V_r + 6,737 \quad (3)$$

Para $V_r > 1000 \text{ hm}^3$:

$$D_{max} = 100 \text{ km} \quad (4)$$

Para $V_r > 6,2 \text{ hm}^3$:

$$\frac{Q_x}{Q_{max}} = 10^{-0,01243x} \quad (5)$$

Para $V_r \leq 6,2 \text{ hm}^3$:

$$\frac{Q_x}{Q_{max}} = a \cdot e^{b \cdot x} \quad (6)$$

$$a = 0,002 \ln(V_r) + 0,9626 \quad (7)$$

$$b = -0,20047(V_r + 25000)^{-0,5979} \quad (8)$$

Sendo: D_{max} : máxima distância a jusante da barragem afetada pelo rompimento (km); V_r : volume do reservatório (hm^3); Q_x : vazão observada na seção em questão (m^3/s); Q_{max} : vazão máxima na primeira seção analisada (m^3/s); x : distância da seção em questão até a primeira seção analisada, ou seção do hidrograma de entrada (km para a Equação A e m para a Equação B); V_r : volume do reservatório (m^3).

- Determinação das profundidades máximas atingidas: Possível por processos iterativos utilizando-se a equação de Manning.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Objeto de Estudo

Para a realização do presente estudo supõe-se o rompimento de uma barragem hipotética de 100.000.000 m³ de volume de reservatório e 30 m de altura. A partir da ruptura dessa estrutura, foram avaliados os efeitos da variação do coeficiente de rugosidade de Manning na propagação de 6 hidrogramas de ruptura em um canal fictício com 300 km de comprimento e uma declividade de 0,0005 m/m. O canal em estudo possui 3.000 seções trapezoidais, distanciadas de 100 m uma da outra, com 6.000 m² de área transversal (conforme a Figura 1). Os coeficientes de Manning avaliados correspondem a 0,015 (valor normal para concreto desempenado), 0,035 (valor normal para canal com pedras e vegetação baixa), 0,07 (valor normal para cursos de água lentos com encostas arbustivas), 0,085 (valor intermediário para encostas bem vegetadas) e 0,1 (valor normal para encostas bem vegetadas), de acordo com Chow (1959).

Os impactos da onda de cheia foram delimitados pela vazão de um período de retorno de 100 anos (TR 100), ou seja, o alcance da onda se dá no ponto de encontro entre a sua curva de vazão com a reta correspondente a vazão do período de retorno de 100 anos para o rio.

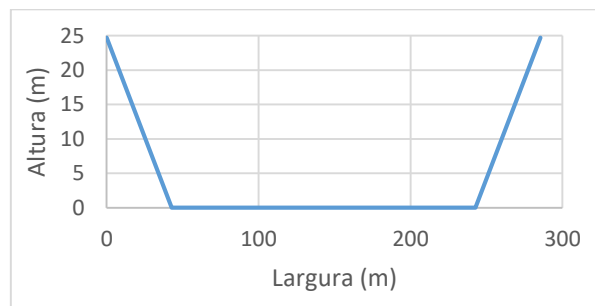


Figura 1 - Seção transversal do canal estudado.

5.2. Simulação de Ruptura

As simulações de ruptura serão realizadas com o software HEC-RAS assim, foram propagados 6 hidrogramas de ruptura pelo canal descrito. Estes hidrogramas possuem as seguintes características:

- Tempo de pico: calculado pelos métodos de Froehlich (2008) e Bureau of Reclamation (1988);
- Vazão de Pico: foram selecionadas as metodologias de Kirkpatrick (1977), Froehlich (1995) e Ferla (2018) por se tratarem da metodologia mais antiga, mais utilizada e uma das mais recentes, respectivamente;
- Forma do hidrograma: optou-se por um hidrograma de formato triangular em função de sua simplicidade de elaboração. O tempo de base do hidrograma foi determinado

em função do tempo de pico e do tempo necessário para um tempo de recessão definido até o esvaziamento do reservatório. A Tabela 2 apresenta resumidamente as características dos hidrogramas.

Para evitar a ocorrência de instabilidades no modelo do software HEC-RAS, é indicado que, antes e depois da passagem do hidrograma de ruptura, haja uma vazão de base passando pelo canal. A vazão escolhida para este papel foi a Q_{95} calculada com base nos dados da estação fluviométrica da estação Passo Barra do Guaiaveira (28° 44' 21.12" S; 51° 25' 30.00" W), localizada ao longo do Rio Turvo, na bacia do Rio Taquari, Rio Grande do Sul. Tal estação foi escolhida por possuir extenso registro de vazões, com dados que datam desde o ano de 1956. Essa vazão de referência seguiu sendo aplicada até que o hidrograma atingisse 3 dias (72 horas).

Tabela 2 - Dados dos Hidrogramas de Ruptura.

| Hidrograma | Metodologia de tempo de pico | Tempo de pico (min) | Metodologia de vazão pico | Vazão de Pico (m ³ /s) |
|------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| A | Froehlich (2008) | 112 | Ferla (2018) | 8.914 |
| B | | | Froehlich (1995) | 9.437 |
| C | | | Kirkpatrick (1977) | 6.408 |
| D | Bureau of Reclamation (1988) | 59 | Ferla (2018) | 8.914 |
| E | | | Froehlich (1995) | 9.437 |
| F | | | Kirkpatrick (1977) | 6.408 |

5.3. Método Simplificado

A metodologia simplificada apresentada por Melo (2015) foi escolhida para ser analisada no presente trabalho devido ao fato de ser uma das metodologias mais recentes para analisar os efeitos da ruptura de barragens e, também, por já vir sendo utilizada pela ANA (Agência Nacional de Águas) para a determinação do DPA (Dano Potencial Associado) das barragens brasileiras.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras de 2 a 7 apresentam a variação da vazão em função da distância e o alcance da onda de cheia em relação à vazão do TR 100 do curso de água. Como é possível observar nos gráficos, o método de Melo (2015) tende a subestimar, de uma maneira geral, as distâncias máximas alcançadas por uma onda de cheia proveniente de um rompimento, em relação ao software HEC-RAS. A Tabela 3 exhibe, de maneira esquemática, os valores do alcance das ondas dos hidrogramas de A a F para os diferentes coeficientes de rugosidade de Manning em relação ao período de retorno de 100 anos ao lado do alcance calculado pelo método de Melo (2015), e a Tabela 4 exhibe as variações do alcance da onda de cheia entre os diferentes hidrogramas e coeficientes de Manning.

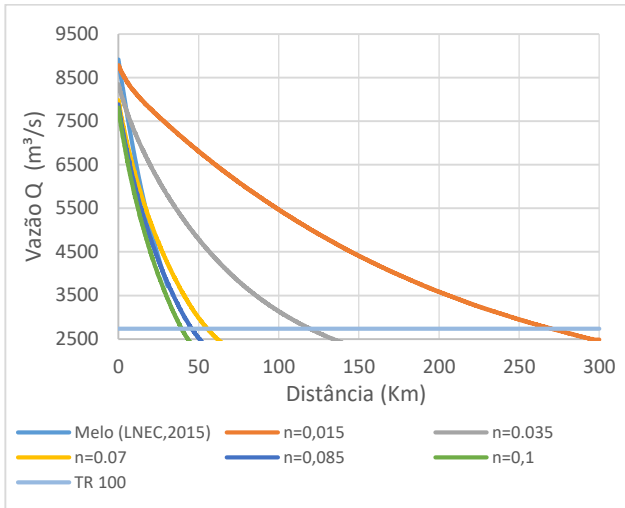


Figura 2 - Alcance das ondas de cheia oriundas do hidrograma A.

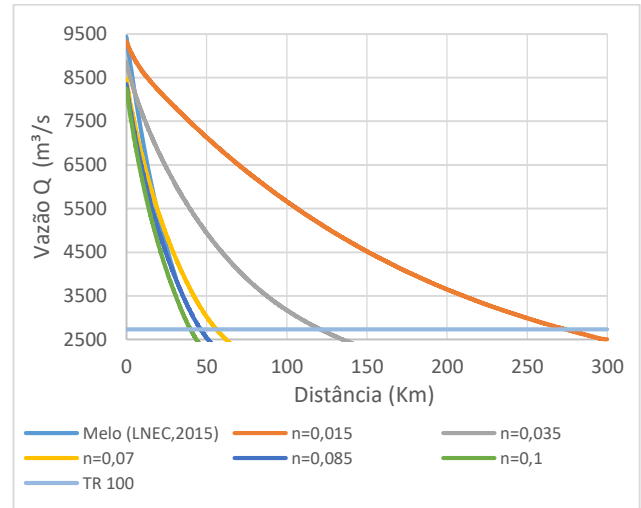


Figura 3 - Alcance das ondas de cheia oriundas do hidrograma B.

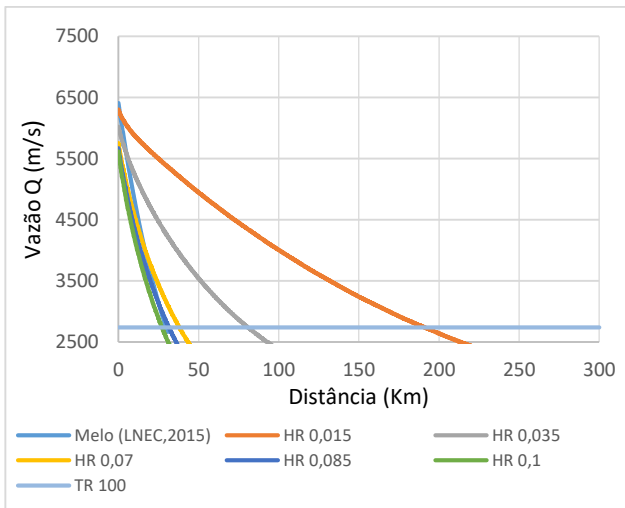


Figura 4 - Alcance das ondas de cheia oriundas do hidrograma C.

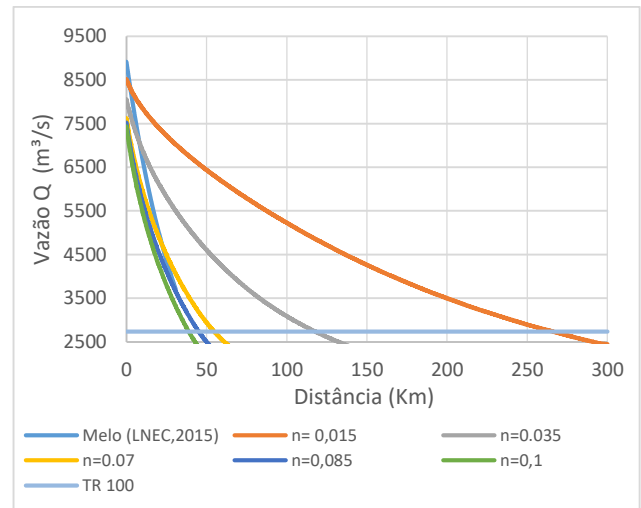


Figura 5 - Alcance das ondas de cheia oriundas do hidrograma D.

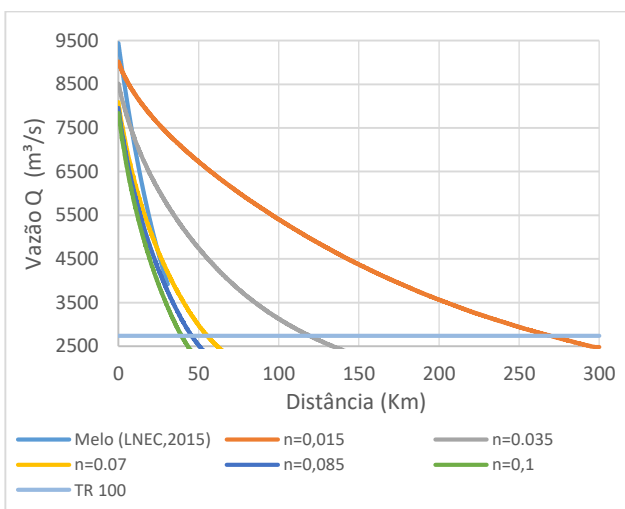


Figura 6 - Alcance das ondas de cheia oriundas do hidrograma E.

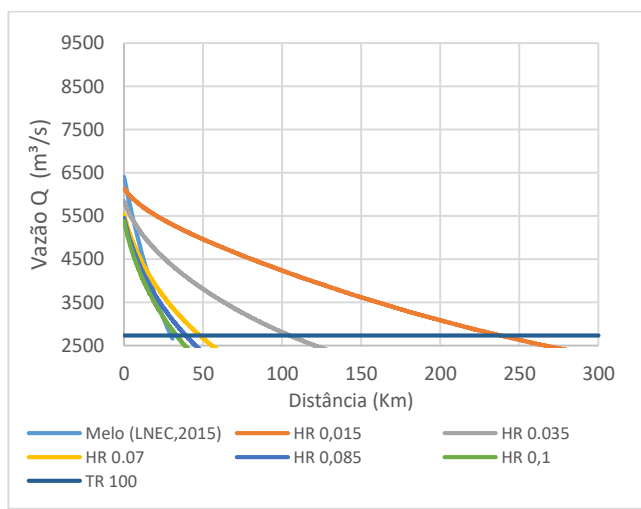


Figura 7 - Alcance das ondas de cheia oriundas do hidrograma F.

Tabela 3 – Valores do Alcance da Onda de Cheia.

| Hidrograma | Alcance da onda de cheia (km) | | | | | Melo (2015) |
|------------|-------------------------------|---------|--------|---------|-------|-------------|
| | n=0,015 | n=0,035 | n=0,07 | n=0,085 | n=0,1 | |
| A | 267,3 | 120 | 53,6 | 31,3 | 36,4 | 30,7 |
| B | 271 | 121,5 | 54,5 | 41,7 | 36,5 | |
| C | 187,8 | 82,7 | 32,9 | 26 | 21,4 | |
| D | 263,1 | 117,9 | 52,4 | 40 | 34,6 | |
| E | 267,1 | 119,6 | 53,4 | 40,8 | 35,5 | |
| F | 272,5 | 103,5 | 42,5 | 26,6 | 27,5 | |

Tabela 4 - Variações Relativas do Alcance da Onda de Cheia.

| Hidrograma | n=0,015 | n=0,035 | n=0,07 | n=0,085 | n=0,1 | Média |
|------------|---------|---------|--------|---------|-------|-------|
| A-B/B | -1% | -1% | -2% | -25% | 0% | -6% |
| (B-C)/B | -31% | -32% | -40% | -38% | -41% | -36% |
| D-E/E | -1% | -1% | -2% | -2% | -3% | -2% |
| (F-E)/E | 2% | -13% | -20% | -35% | -23% | -18% |

Como pode ser observado nas Figuras de 2 a 7 e na Tabela 3, para os mesmos hidrogramas, coeficientes de Manning mais altos como 0,1 e 0,085 resultam em valores próximos em ambas as metodologias. Em contrapartida, para coeficientes de rugosidade de Manning mais baixos como 0,015 e 0,035, as diferenças são demasiadamente elevadas.

As vazões de pico calculadas por Ferla (2018) e por Kirkpatrick (1977), como pode ser observado na Tabela 2 são, relativamente, 6% e 32% menores que as calculadas por Froehlich (1995), respectivamente. Percebe-se que esta diferença se transfere para o alcance das ondas de cheia cujos hidrogramas possuem tempo de pico calculado por Froehlich (2008), uma vez que os hidrogramas A e C (vazões de pico calculadas por Ferla e Kirkpatrick), apresentaram, em média, alcances respectivamente 6% e 36% menores que B, como exibido na Tabela 4, indicando uma relação diretamente proporcional entre as vazões máximas e as diferenças entre os alcances da onda de cheia.

No entanto, para os hidrogramas cujo tempo de pico foi calculado por Bureau of Reclamation (1988), que corresponde a cerca de 47% do tempo obtido por Froehlich (2008), os alcances apresentaram um comportamento diferente. Os hidrogramas D e F alcançaram, em média, distâncias 2% e 18% menores que E, respectivamente, como exibido na Tabela 4. Percebe-se que a diferença entre os alcances foi reduzida, aproximadamente, na mesma proporção que a redução no tempo de pico dos hidrogramas. Este aspecto, também indica uma relação direta entre diferença média entre os alcances de onda obtidos por diferentes hidrogramas e os tempos de pico dos mesmos.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o alcance da onda de cheia proveniente da ruptura hipotética de uma barragem através da comparação dos resultados entre simulações computacionais e metodologias simplificadas. Para isso, foram propagados seis hidrogramas diferentes por cinco canais fictícios de mesmo comprimento, mas rugosidades distintas.

Os resultados obtidos indicam que as diferenças entre as vazões de pico transferem-se para os respectivos alcances das ondas de cheia da mesma forma que os tempos de pico do hidrograma de ruptura. Constatou-se que em ambos os casos existe uma relação direta entre a diferença média dos alcances de onda obtidos por diferentes hidrogramas e suas vazões máximas e tempos de pico.

Quanto à influência da rugosidade dos canais, observou-se uma proximidade entre as simulações hidrodinâmicas e as metodologias simplificadas para valores de coeficientes de Manning mais elevados. Tendo em vista os resultados obtidos, é recomendado que o método simplificado de Melo (2015) seja usado para canais que possuam características mais rugosas, evitando assim que o alcance dos efeitos negativos de uma onda de cheia proveniente de uma ruptura sejam subestimados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOW, V. T. (1959). *“Open-channel Hydraulics: International Student Ed.”*.
- COLLISCHONN, W. & TUCCI, C. E. M. (1997). *“Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Volume 2. n. 2 Jul/Dez. p. 191-206.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (1999). *“Guia básico de segurança de barragens”*. São Paulo, SP, NRSP-CBDB, 77.
- FERLA, R. (2018). *“Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens”*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- FROELICH, D. C. (1995). *“Peak outflow from breached embankment dam”*. Journal of water Resources Planning and management, 121(1), 90-97.
- LYRA, G. B., CECÍLIO, R. A., ZANETTI, S. S., & LYRA, G. B. (2010). *“Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu”*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(4), 343-350.
- MELO, J. F. (2015) – *“Dam-Break Flood Risk Assessment”*. Second International Dam World Conference. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.
- PIERCE, M. W., THORNTON, C. I., & ABT, S. R. (2009). *“Predicting peak outflow from breached embankment dams”*. Journal of Hydrologic Engineering, 15(5), 338-349.
- SALIBA, A. P. M. (2009). *“Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens de solo compactado”*. Belo Horizonte. Tese de Doutorado.
- U.S. BUREAU OF RECLAMATION. (1988). *“Downstream hazard classification guidelines”*. ACER Technical Memorandum No.11.
- WAHL, T. L. (2004). *“Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters”*. Journal of hydraulic engineering, 130(5), p. 389-397.
- KIRKPATRICK, G. W. (1977). *“Evaluation guidelines for spillway adequacy.”* In Evaluation of Dam Safety; Proceedings of the Engineering Foundation Conference.
- FROELICH, D. C. (2008). *“Embankment dam breach parameters and their uncertainties.”* Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721.