



## Análise de sensibilidade do coeficiente de Manning na modelagem hidrodinâmica de ondas de cheia em rupturas de barragens

*Daniela Guzzon Sanagiotto<sup>1</sup>, Priscila Maria Kipper<sup>2</sup>, Renato Steinke Junior<sup>3</sup>, Fernando de Oliveira Fraga<sup>4</sup>, Rute Ferla<sup>5</sup>, Eder Daniel Teixeira<sup>6</sup>, José Falcão de Melo<sup>7</sup>, Luiz Augusto Magalhães Endres<sup>8</sup>, Mauricio Dai Prá<sup>9</sup>, Marcelo Giulian Marques<sup>10</sup>, Camila de Souza Dahm Smiderle<sup>11</sup>*

**Resumo:** Neste artigo se avaliou a sensibilidade do coeficiente de rugosidade de Manning na simulação da propagação da onda de cheia resultante do rompimento hipotético de barragens. Foram consideradas três barragens (Salto, Canastra e João Amado) situadas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Foram utilizadas informações de um Modelo Digital de Elevação de acesso livre, elaborado a partir de imagens de satélite (FABDEM). Os coeficientes de Manning utilizados foram iguais a 0,035; 0,045; 0,06 e 0,11  $m^{-1/3}$ .s. Para as simulações numéricas do escoamento, foi utilizado o *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS. As variáveis avaliadas foram vazões, profundidades e velocidades máximas e tempo de pico em seções a jusante do barramento e área total alagada. Os resultados indicaram que a área alagada e as profundidades máximas foram menos impactadas pelas variações no coeficiente de Manning, enquanto as variáveis vazão e velocidade máximas e tempo de pico são mais sensíveis ao coeficiente de rugosidade.

**Abstract:** In this article, the sensitivity of the Manning roughness coefficient was evaluated in the simulation of flood wave propagation resulting from hypothetical dam break. Three dams were considered (Salto, Canastra and João Amado) located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Information from a free access Digital Elevation Model, prepared from satellite images (FABDEM), was used. The Manning coefficients used were equal to 0.035; 0.045; 0.06 and 0.11  $m^{-1/3}$ .s. For numerical simulations of the flow, the hydrodynamic modeling software HEC-RAS was used. The variables evaluated were maximum discharges, depths and velocities and peak time in several sections downstream of the dam and the total flooded area. The results indicated that the flooded area and maximum depths were less impacted by variations in the Manning coefficient, while the variables maximum discharge, maximum velocity and peak time are more sensitive to the roughness coefficient.

**Palavras-Chave:** ruptura de barragens, coeficiente de rugosidade de Manning, análise de sensibilidade.

**Keywords:** dam break, Manning's roughness coefficient, sensitivity analysis.

### INTRODUÇÃO

Na simulação da propagação da onda de cheia de rompimento de barragens uma série de dados de entrada são necessários, como por exemplo: coeficiente de rugosidade de Manning, volume do

1 ) Professora Doutora DHH/IPH/UFRGS; dsanagiotto@ufrgs.br

2 ) Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); priscila\_kipper@hotmail.com

3 ) Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); renato.steinkejunior@gmail.com

4 ) Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); fernando\_oliveira\_fraga@hotmail.com

5 ) Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); rufeferla@hotmail.com

6 ) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; eder.teixeira@ufrgs.br

7 ) Pesquisador Sênior do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC); jfmelo@lnec.pt

8 ) Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS; endres@ufrgs.br

9 ) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; mauricio.daipra@ufrgs.br

10 ) Professor convidado PPG Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); mmarques@iph.ufrgs.br

11 ) Coordenadora de Segurança de Barragens, CSN; camila.dahm@csn.com.br



reservatório, modelo do terreno no vale a jusante, configuração da brecha, entre outros. A combinação de dados de entrada utilizados e equacionamento adotado são objeto de análise quanto às incertezas na representação da propagação da onda de cheia no vale de jusante. Nesse sentido, alguns autores têm realizado análises de sensibilidade para quantificar as diferenças nos resultados a partir de diferentes dados de entrada utilizados.

Em relação ao coeficiente de Manning, há divergências sobre a sua influência nos resultados de propagação da onda de cheia. Há estudos que concluíram que o coeficiente de Manning é muito relevante na avaliação da atenuação do pico de cheia (Collischonn e Tucci, 1997 e Gallegos *et al.*, 2009). Outras avaliações relatam que em algumas situações os resultados das simulações de propagação de ondas de cheia são mais sensíveis ao valor do coeficiente de Manning utilizado (Tschiedel, 2017). Ainda, há pesquisas de análise de sensibilidade que apontam que o coeficiente de Manning é de pouca relevância para a avaliação da atenuação do pico da vazão (Lima, 2023 e Paiva e Lima, 2024), sendo mais importantes outras variáveis como: vazão inicial, volume do hidrograma, armazenamento na planície de inundação e declividade do rio.

Neste trabalho é realizada uma revisão bibliográfica sobre a análise de sensibilidade do coeficiente de rugosidade de Manning na propagação da onda de cheia da ruptura hipotética de barramento no vale a jusante. Também são apresentados resultados de análise de sensibilidade do coeficiente de Manning obtidos para a simulação de rompimentos hipotéticos de barramentos localizados no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há estudos que relatam que a influência do coeficiente de Manning na propagação da onda de cheia proveniente da ruptura hipotética de barragens só tem menos importância que o efeito do volume do reservatório (Collischonn e Tucci, 1997 e Gallegos *et al.*, 2009). Gallegos *et al.* (2009) realizaram a simulação da propagação da onda de cheia do rompimento de um barramento de duas formas: (1) com diferentes coeficientes de Manning ( $n$ ), representando a diversidade da cobertura do terreno a jusante do barramento, e (2) com um coeficiente de Manning constante, com um valor equivalente obtido considerando a ocupação do terreno. Na simulação com coeficiente de Manning constante, adotou-se  $n = 0,2 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , enquanto na simulação com o coeficiente variável, este assumiu valores entre  $0,013 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (para superfícies de concreto) até  $0,3 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (para edifícios). A simulação com o coeficiente de Manning constante resultou em menor vazão de pico nas seções (cerca de 0,6 do valor de referência) e maior tempo de pico (cerca de 1,85 vezes do valor de referência).

Tschiedel (2017) investigou a incerteza de diversos fatores (coeficiente de Manning, volume do reservatório, forma da brecha e topografia do vale de jusante) na avaliação da vazão de pico, tempo de pico, profundidade e velocidade máximas na propagação da onda de cheia da ruptura hipotética de barramentos. O autor considerou um cenário de referência com um coeficiente de Manning para o canal e um coeficiente de Manning para as planícies de inundação. A partir do cenário de referência foram provocadas perturbações através de fatores de multiplicação entre 0,50 e 2,00 nos coeficientes de Manning do canal e das margens. As simulações da propagação da onda de cheia da ruptura hipotética da barragem da UHE Canastra, considerando as variações do coeficiente de Manning no canal e nas margens, resultou na variação na vazão de pico da ordem de até 300% e defasagens nos tempos de pico de até 32 minutos. Conforme esperado, para maiores coeficientes de Manning foram observados menores vazões de pico e maiores tempos de pico. Tschiedel (2017) também verificou que o coeficiente de Manning tem maior impacto na vazão de pico para as seções mais distantes da seção do barramento. Ainda, esse autor verificou que a estimativa do tempo de pico da onda de cheia é mais relacionada ao coeficiente de Manning e ao MDE do que ao volume do reservatório, sendo que o tempo de pico é mais sensível ao coeficiente de Manning para seções mais distantes da seção do barramento, como também observado para a vazão de pico. De forma contrária, a profundidade



do escoamento é pouco afetada por mudanças de coeficiente de Manning para as seções mais distantes do barramento, sendo as diferenças na profundidade importantes apenas nas primeiras seções. Por fim, em relação à análise das velocidades máximas, estas se mostraram bastante sensíveis ao coeficiente de Manning (variações de 3 a 8 m/s na seção mais a jusante considerada no estudo) e ao MDE utilizado (variações de 1 a 7 m/s em algumas seções).

Tschiedel (2017) ainda realizou uma análise de sensibilidade considerando o rompimento hipotético de um outro barramento com vale de jusante menos inclinado do que o existente a jusante da UHE Canastra. Tschiedel (2017) concluiu que para seções distantes de barramentos localizados em vales encaixados e declivosos o coeficiente de Manning tem alta relevância para a avaliação da vazão de pico e tempo de pico. O mesmo autor verificou que a influência do coeficiente de Manning utilizado é média próximo de barramentos em vales encaixados e declivosos e baixa para vales abertos e de baixa declividade.

Cunha *et al.* (2023) realizaram análises de sensibilidade do coeficiente de Manning na modelagem de ruptura hipotética de barramentos. Os autores verificaram variações de até 45% e 25% nas velocidades e profundidades máximas, respectivamente, em função da variabilidade do coeficiente de Manning para um mesmo tipo de cobertura do solo em uma mesma configuração topográfica do vale de jusante. Os autores concluíram que quanto mais rugosa a cobertura de solo, maior é a sensibilidade das profundidades máximas e delimitação da mancha de inundação e menor é a sensibilidade das velocidades máximas à variação do coeficiente de rugosidade de Manning.

Lima (2023) e Paiva & Lima (2024) realizaram estudos de rompimento de barragens em cascata. Em uma etapa inicial foi realizada uma análise de sensibilidade dos fatores determinantes na atenuação do pico de cheia. Os fatores analisados foram largura do rio, vazões de cheia e de pico de cheia, volume de hidrograma, declividade do rio, armazenamento na planície de inundação, coeficiente de Manning e assimetria do hidrograma. Em relação ao coeficiente de Manning, Lima (2023) e Paiva & Lima (2024) consideraram como cenário de referência um valor de  $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , característico de rios naturais e, avaliaram a sensibilidade das simulações para  $n = 0,015 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , para canais construídos e  $n = 0,08 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  para rios de alta rugosidade. Para as áreas de várzea, Lima (2023) considerou altos valores de coeficiente de Manning ( $50 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ) para representar o armazenamento nessas regiões. A análise de sensibilidade de Lima (2023) e Paiva & Lima (2024), em relação ao fator coeficiente de Manning, mostrou que a vazão de pico relativa,  $Q(x)/Q_0$ , onde  $Q(x)$  é a vazão de pico a uma distância  $x$  do barramento e  $Q_0$  é a vazão de pico na seção do barramento, foi menos sensível à variação do coeficiente de Manning nas seções próximas dos barramentos. De forma geral, para maiores distâncias do barramento, a vazão de pico relativa variou em até  $\pm 20\%$  em relação ao valor de referência. Por exemplo, a uma distância de 50 km do barramento,  $Q(x)/Q_0$  variou de aproximadamente 0,37 para  $n = 0,08 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  a 0,73 para  $n = 0,015 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  e foi de aproximadamente 0,55 para a rugosidade de referência ( $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ).

Enquanto para Collischonn e Tucci (1997) e Gallegos *et al.* (2009), o coeficiente de Manning é o segundo colocado, tendo menos influência apenas que o volume do reservatório, no estudo de Lima (2023) e Paiva & Lima (2024) o coeficiente de Manning foi o quinto elemento na ordem de impacto de sua alteração sobre a atenuação do pico de cheia.

Ao comparar as conclusões obtidas por Lima (2023) e Tschiedel (2017) parece, inicialmente, existir uma divergência sobre o efeito do coeficiente de Manning na propagação das ondas de cheia provenientes de rupturas hipotéticas de barramentos. No entanto, cabe ressaltar que nas simulações de Lima (2023) e Paiva & Lima (2024), a análise de sensibilidade para o coeficiente de Manning foi feita para um cenário com uma declividade de referência (1m/km), não sendo possível avaliar se o coeficiente de Manning pode ser mais ou menos relevante em função da declividade do vale de jusante, como investigado por Tschiedel (2017). Outra diferença importante entre esses dois trabalhos está associada à forma como o coeficiente de Manning foi considerado na planície de inundação. Para



Tschiedel (2017) foram considerados valores distintos para o canal e a margem e, a estes, foram aplicados fatores de multiplicação entre 0,5 e 2,0. Para Lima (2023) foram variados apenas os coeficientes de Manning do canal e para as planícies de inundação foi considerado um valor muito elevado de coeficiente de Manning ( $50 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}$ ) para representar áreas de armazenamento.

## MÉTODOS

As simulações de rompimento hipotético de barragens foram realizadas para três barragens: Salto, Canastra e João Amado, localizadas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A Tabela 1 apresenta as principais características dos barramentos analisados.

Para a análise da influência do coeficiente de Manning na modelagem da propagação do escoamento resultante da ruptura hipotética no vale de jusante dos barramentos, foram utilizados diferentes valores para este coeficiente ( $n = 0,035; 0,045; 0,06$  e  $0,11 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ). Foi considerado o coeficiente de Manning de referência igual a 0,06 e os outros 3 obtidos por fatores de multiplicação de 0,58; 0,75 e 1,83. Em cada simulação, atribuiu-se o mesmo valor do coeficiente de Manning para a calha do rio e para as margens, ao longo de todo o trecho estudado.

Para a simulação da ruptura hipotética dos barramentos, foi utilizado o *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS (versão 6.1), desenvolvido pelo USACE, no módulo bidimensional. A malha utilizada nas proximidades do rio foi de 10 m X 10 m e nas regiões mais afastadas do rio de 100 m X 100 m. O Modelo Digital de Elevação utilizado foi o *Forest and Buildings removed Copernicus DEM (FABDEM)*, com resolução espacial de 30 m (mais detalhes em Kipper *et al.*, 2023).

Tabela 1 – Principais características das barragens analisadas.

Característica / Barragem	Salto	Canastra	João Amado
Localização	Rio Caí, no município de São Francisco de Paula	Rio Santa Maria, no município de Canela	Rio Guarita, no município de Coronel Bicaco
Tipo	Gravidade	Ambursen	Gravidade
Material	Concreto	Concreto	Concreto
Comprimento (m)	600	179	188,8
Altura máxima (m)	10	26	11,5
Volume útil ( $\text{hm}^3$ )	10,3	0,242	10,6
Volume total ( $\text{hm}^3$ )	14,0	0,425	22,0
Comprimento do vertedouro (m)	330	Vertedouro tulipa – raio = 5,75 m	50
Barragem a jusante	Toca	Laranjeiras	Guarita
Distância até o reservatório a jusante (km)	11,7	9,4	47,0

Para a condição de contorno de montante das simulações considerou-se o hidrograma de ruptura disponibilizado para a equipe do projeto pela CEEE-G. As vazões máximas dos hidrogramas de ruptura utilizados são:  $Q = 6.118 \text{ m}^3/\text{s}$  para a Barragem do Salto,  $Q = 1.367 \text{ m}^3/\text{s}$  para a Barragem de Canastra e  $Q = 2.650 \text{ m}^3/\text{s}$  para a Barragem João Amado. Para a condição de contorno de jusante foi considerada a profundidade normal do escoamento, já que a simulação a jusante termina a montante do reservatório da barragem imediatamente a jusante.

Dos resultados obtidos nas simulações foram analisados: máximos valores de vazões, profundidades e velocidades ao longo do trecho de jusante do barramento, tempo de pico e área alagada.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentados os resultados das vazões máximas, profundidades máximas, velocidades máximas e tempo de pico ao longo do trecho de jusante dos barramentos Salto, Canastra e João Amado, respectivamente, obtidos nas simulações considerando os diferentes coeficientes de Manning.

A análise da vazão máxima mostrou que o menor valor de coeficiente de Manning resultou em maiores vazões, como esperado. No entanto, as diferenças entre as vazões obtidas foram pouco expressivas. Considerando os resultados de Tschiedel (2017), se esperava maiores variações de vazão para as seções mais distantes do barramento nos terrenos mais declivosos. Os resultados obtidos nas simulações deste trabalho, para Canastra, indicam que na primeira seção, para os valores de coeficiente de Manning testados, a vazão máxima variou muito pouco. Para as seções mais distantes do barramento, as variações foram maiores, mas ficaram entre até +25% para  $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  e -25% para  $n = 0,11 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , sendo que não se observou uma tendência de aumento de variação do valor com o afastamento da seção analisada. A faixa de variação da vazão de pico com diferentes coeficientes de Manning está coerente com os valores obtidos por Paiva & Lima (2024).

Em relação às profundidades máximas, de forma geral, se observaram menores profundidades para os menores coeficientes de Manning, mas as variações foram pouco expressivas para todos os barramentos. Por outro lado, as variações nas velocidades máximas com o coeficiente de rugosidade de Manning foram maiores em todos os barramentos. Para os menores valores do coeficiente de Manning foram observadas as maiores velocidades, com uma tendência de maiores variações para as seções mais distantes do barramento.

Para o tempo de pico, os menores coeficientes de rugosidade de Manning resultaram nos menores tempos de pico, sendo claramente visível em todos os barramentos que as diferenças nos tempos de pico foram maiores para as seções mais distantes dos barramentos.

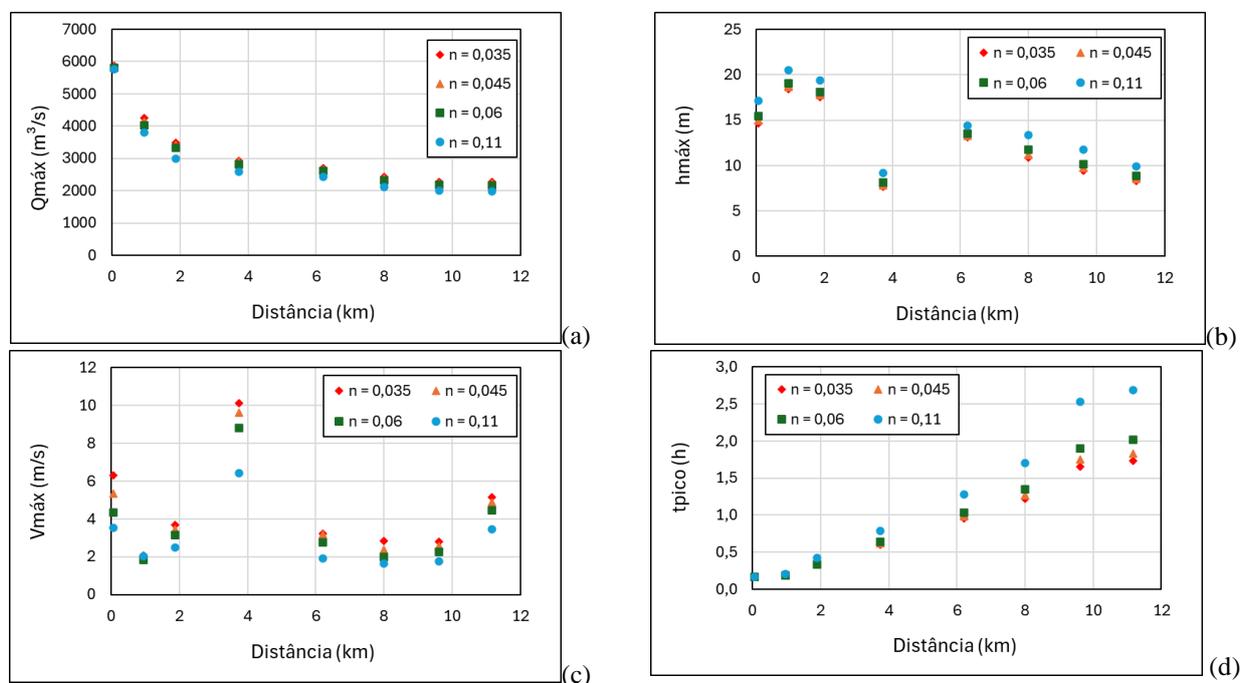


Figura 1 – (a) Vazões máximas, (b) profundidades máximas, (c) velocidades máximas e (d) tempos de pico nas seções avaliadas a jusante da Barragem do Salto para os diferentes coeficientes de Manning considerados nas simulações.

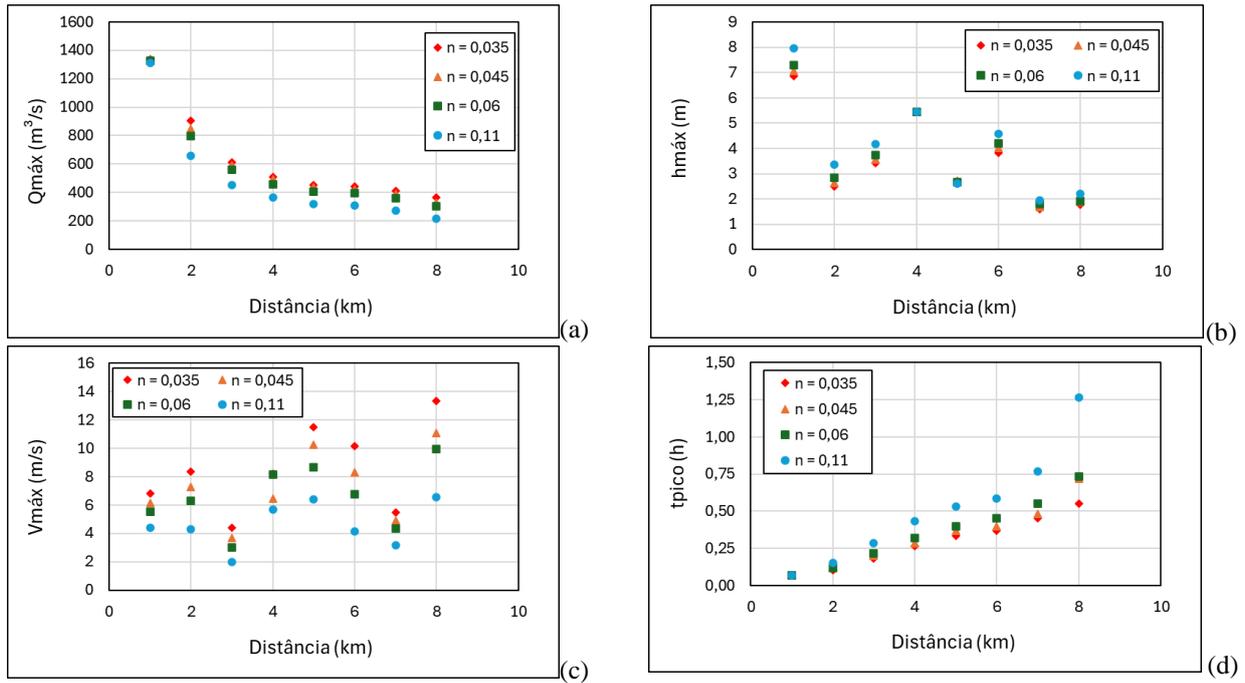


Figura 2 – (a) Vazões máximas, (b) profundidades máximas, (c) velocidades máximas e (d) tempos de pico nas seções avaliadas a jusante da Barragem de Canastra para os diferentes coeficientes de Manning considerados nas simulações.

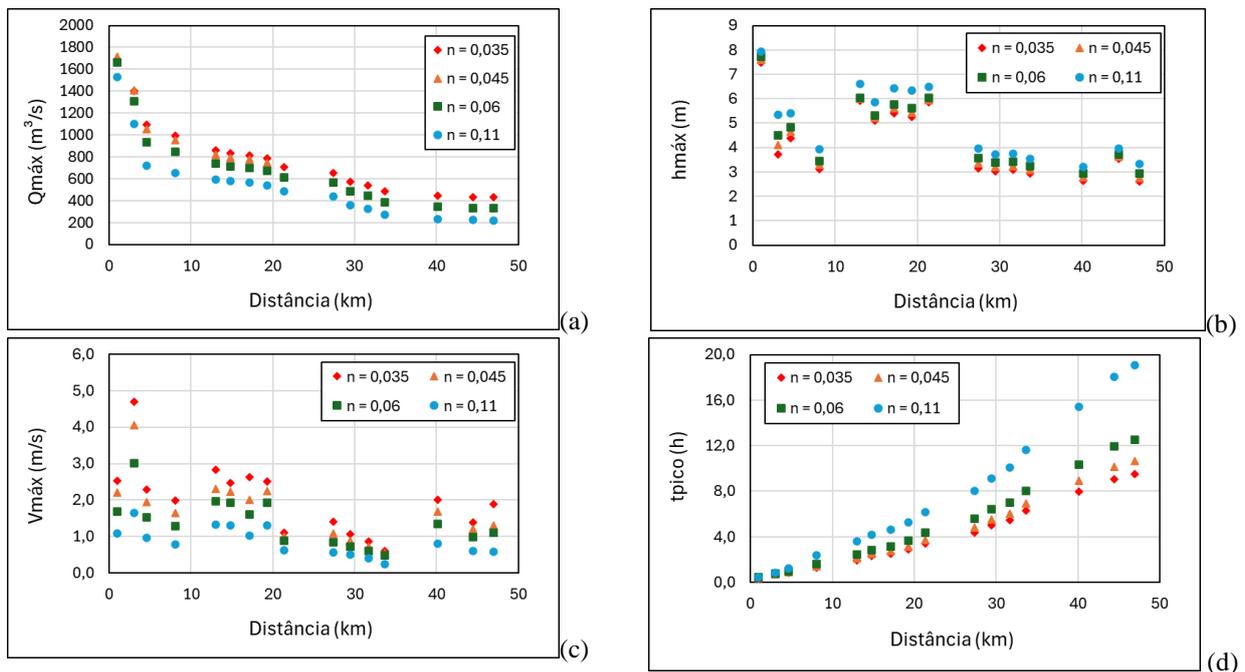


Figura 3 – (a) Vazões máximas, (b) profundidades máximas, (c) velocidades máximas e (d) tempos de pico nas seções avaliadas a jusante da Barragem João Amado para os diferentes coeficientes de Manning considerados nas simulações.

Na Tabela 2 são apresentadas as áreas alagadas resultantes da simulação do rompimento hipotético dos barramentos para os diferentes coeficientes de rugosidade de Manning avaliados. Nessa tabela também se apresenta a variação percentual da área alagada em relação aos valores obtidos com o valor de referência ( $0,06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ).



Os resultados de área alagada obtidos nas simulações do rompimento hipotético dos barramentos foram, de forma geral, pouco impactados em função do coeficiente de Manning adotado. As simulações realizadas com os menores coeficientes de Manning resultaram em menores áreas alagadas. As maiores diferenças para a área alagada ocorreram na Barragem do Salto onde a área alagada variou de -4,25% a +7,44% em relação ao cenário de referência ( $n=0,06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ).

Tabela 2 – Área alagada resultante do rompimento hipotético dos barramentos e diferentes coeficientes de Manning.

n ( $\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ )	Barragem do Salto		Barragem de Canastra		Barragem João Amado	
	Área alagada (ha)	Variação em relação à referência	Área alagada (ha)	Variação em relação à referência	Área alagada (ha)	Variação em relação à referência
0,035	273,72	-4,25%	52,49	-2,52%	1078,84	-2,82%
0,045	277,63	-2,88%	53,17	-1,25%	1095,16	-1,35%
0,06	285,85		53,84		1110,19	
0,11	307,12	7,44%	56,08	4,16%	1154,91	4,03%

Ao confrontar a análise de sensibilidade realizada no presente trabalho com a análise de Tschiedel (2017), se esperava obter maiores variações das vazões de pico em função do coeficiente de Manning, principalmente para os terrenos mais declivosos e em seções mais distantes do barramento, como o vale a jusante da barragem Canastra. Uma diferença importante entre a metodologia utilizada neste trabalho e Tschiedel (2017) consiste na forma de atribuição do coeficiente de Manning. No presente estudo foram adotados coeficientes de Manning constantes para a calha e a planície de inundação, sendo o valor de referência igual a  $0,06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , enquanto que Tschiedel (2017) tratou com coeficientes de Manning distintos a calha principal e a planície de inundação, com valores de referência de  $0,075 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  e  $0,15 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , respectivamente, para a representação do terreno a jusante de Canastra. Outros elementos, que ainda podem ser investigados, que auxiliem na explicação das diferentes conclusões entre os resultados da análise de sensibilidade do presente trabalho e Tschiedel (2017), podem ser a base topográfica e o equacionamento utilizado nas simulações. Ao se distinguir a calha principal da planície de inundação pode se melhorar a representação do terreno considerando coeficientes de Manning mais coerentes com a superfície desses locais, que geralmente são distintas. Por outro lado, ao diferenciar calha e planície de inundação, é inserida uma nova incerteza, sobre a forma de delimitar a calha do rio.

Utilizando como referência a análise de sensibilidade realizada por Paiva & Lima (2024), os resultados obtidos no presente trabalho estão em maior concordância, ao atribuir menor sensibilidade aos resultados da propagação da onda de cheia pela modificação do coeficiente de Manning. No entanto, os estudos de Paiva & Lima (2024) são menos abrangentes sob o ponto de vista de declividade do terreno do vale de jusante e ao considerar um coeficiente de Manning elevado para representar o armazenamento nas planícies, o que não foi considerado nesse estudo.

## CONCLUSÃO

Foram conduzidas investigações para avaliar a sensibilidade do coeficiente de rugosidade de Manning na modelagem de ondas de cheia em rupturas de barragens. Além da análise da literatura, foram realizadas simulações de rompimento hipotético de três barramentos, utilizando diferentes valores para o coeficiente de rugosidade de Manning, no módulo 2D do *software* HEC-RAS. Foram comparados os resultados de vazões, velocidades e profundidades máximas, tempos de pico e área alagada.



A análise da literatura indica divergências quanto aos efeitos do coeficiente de rugosidade de Manning em estudos de propagação de ondas de cheia provenientes da ruptura de barragens.

Nas avaliações realizadas no presente estudo, os resultados reforçam as conclusões apresentadas por Kipper *et al.* (2023) para a Barragem do Salto. Os maiores valores do coeficiente de Manning resultaram nas maiores áreas alagadas, profundidades e tempos de pico e menores vazões e velocidades máximas. Foram testados fatores multiplicativos entre 0,58 e 1,83 do coeficiente de Manning de referência ( $0,06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ). Essas variações no coeficiente de Manning impactaram pouco na área alagada e nas profundidades máximas. Para a área alagada a variação ficou entre -4,25% e +7,44%. As profundidades máximas variaram, em média, entre -8% e +10% dos valores obtidos com o coeficiente de Manning de referência. Para as vazões máximas as variações foram menores nas seções próximas dos barramentos. Para as seções mais distantes, as variações foram menores para a Barragem do Salto (entre +5% e -10%, respectivamente para variação de 0,58 e 1,83 do valor do coeficiente de Manning de referência) e maiores para a Barragem de João Amado, até  $\pm 30\%$ , com a tendência de aumento na variação para as seções mais distantes do barramento. As velocidades máximas nas seções variaram, em média, em  $\pm 20\%$ ;  $\pm 30\%$ ;  $\pm 40\%$ ; para os diferentes coeficientes de Manning, para as barragens de Salto, Canastra e João Amado, respectivamente. Para os tempos de pico, as variações foram sendo mais expressivas para as seções mais distantes do barramento.

Considerando as informações disponíveis na literatura e os resultados obtidos nesse trabalho, e ainda, a dificuldade e a incerteza na definição do coeficiente de rugosidade de Manning do terreno a jusante de um barramento, se reforça a recomendação de Kipper *et al.* (2023) de considerar dois valores para o coeficiente de rugosidade: um mais baixo para a estimativa de tempos de pico, velocidades e vazões máximas e outro mais elevado para a análise das profundidades máximas e áreas alagadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CSN Energia/CEEE-G pelo financiamento da pesquisa e pelo fornecimento dos dados referentes aos barramentos, bem como ao IPH/UFRGS, ao CNPq e à CAPES pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (1997). “Análise do Rompimento hipotético da barragem de Ernestina”. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos.
- CUNHA *et al.* (2023). “Análise de sensibilidade do parâmetro de rugosidade de Manning em modelos sintéticos de vale para estudos de ruptura hipotética de barragens (Dam Break).” <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15712>.
- GALLEGOS, A.H.; SCHUBERT, J.E.; SANDERS, B.F. (2009). “Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California”. Advances in Water Resources.
- KIPPER, P. M. *et al.* (2023). “Influência do coeficiente de rugosidade de Manning no estudo de ruptura de barragens: estudo de caso da Barragem do Salto.” XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju/SE. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15479>.
- LIMA, S. G. (2023). “Mapeamento de Perigo Potencial Associado ao Rompimento de Barragens sob Efeito Cascata”. Dissertação. Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PAIVA, R. C. D., & LIMA, S. G. (2024). “A simple model of flood peak attenuation”. Water Resources Research, 60. <https://doi.org/10.1029/2023WR034692>.
- TSCHIEDEL, A. F. (2017). “Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens”. Dissertação. Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.