

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING NO ESTUDO DE RUPTURA DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO SALTO

Priscila Maria Kipper¹; Renato Steinke Junior²; Rute Ferla³; Eder Daniel Teixeira⁴; José Falcão de Melo⁵; Carlo Lucca Coutinho Ungaretti Rossi⁶; Luiz Augusto Magalhães Endres⁷; Thiago Cepik Brune⁸; Camila de Souza Dahm Smiderle⁹; Daniela Guzzon Sanagiotto¹⁰ & Mauricio Dai Prá¹¹

Abstract: In Brazil, Federal Law 14.066/2020 consolidated the mandatory Emergency Action Plan preparation criteria for a greater number of dams than Law 12.334/2010. To determine the risk classification associated with the dam and to delimit the map of the Self-Saving Zone, dam breach studies are required to estimate the extent of damage that a possible breach can cause downstream of the dam. Such studies need some input parameters, among them the specification of the roughness coefficient, being common the use of the Manning's coefficient. In this article, we sought to evaluate the influence of Manning's roughness coefficient in a case study with the hypothetical failure of the Salto dam. For this purpose, three different values for the roughness coefficient were used: 0.035, 0.06, and 0.11 $\text{sm}^{-1/3}$, and the respective rupture wave propagation results obtained using the hydrodynamic modeling software HEC-RAS version 6.1 in the two-dimensional module were compared. The results indicate that, in the range of values considered for the Manning roughness coefficient, the differences in the respectively obtained inundation areas are not very relevant. The analysis of other parameters characterizes the flood wave, meaning the maximum flow rates and depths of the runoff, also did not show significant differences among the three simulations. However, it is noted that changes in Manning's coefficients impact more significantly the maximum velocities of the flood wave and peak wave's arrival time.

Resumo: No Brasil, a Lei Federal 14.066/2020 consolidou os critérios de obrigatoriedade da elaboração do Plano de Ação de Emergência para um número maior de barragens em relação à Lei 12.334/2010. Para determinar a classificação do risco associado à barragem e delimitar o mapa da Zona de Autossalvamento são necessários estudos de rompimento de barragens que estimem a extensão do dano que uma possível ruptura pode causar a jusante do barramento. Tais estudos necessitam de alguns parâmetros de entrada, dentre eles a determinação do coeficiente de rugosidade, sendo comum a consideração do coeficiente de Manning. Neste artigo, buscou-se avaliar a influência do coeficiente de rugosidade de Manning em um estudo de caso com a ruptura hipotética da barragem

1) Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); priscila_kipper@hotmail.com

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

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

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

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

6) Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental; rossi.carlolucca@gmail.com

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

8) Graduando em Engenharia Civil (UFRGS); thiagocbrune@gmail.com

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

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

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

do Salto. Para tal, foram utilizados três diferentes valores para o coeficiente de rugosidade: 0,035; 0,06 e 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$, e foram comparados os respectivos resultados da propagação da onda de ruptura obtidos utilizando o *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS versão 6.1 no módulo bidimensional. Os resultados indicam que, na gama de valores considerada para o coeficiente de rugosidade de Manning, são pouco relevantes as diferenças nas áreas de inundação respectivamente obtidas. A análise de outros parâmetros caracterizadores da onda de inundação, nomeadamente as vazões e profundidades máximas do escoamento, também não evidenciou diferenças significativas entre as três simulações. Contudo, tem-se que as alterações nos coeficientes de Manning impactam mais significativamente as velocidades máximas da onda de cheia e o tempo de chegada da onda de pico.

Palavras-Chave: Ruptura de barragens; Coeficiente de Manning; HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

A legislação brasileira de segurança de barragens foi instituída no Brasil em 2010 com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) através da Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010). Esta lei representou uma mudança importante no cenário brasileiro de segurança de barragens, pois diversos aspectos que antes eram avaliados somente por experiência profissional passaram a ser afirmados e institucionalizados por Lei Federal (FERLA, 2018). Com o intuito de mitigar riscos e consequências geradas pela ruptura de uma barragem, a Lei exige a elaboração de um Plano de Segurança de Barragens (PSB) e de um Plano de Ação de Emergência (PAE). Recentemente, a Lei 12.334/2010 foi atualizada através da Lei 14.066/2020 (BRASIL, 2020) que, dentre diversas modificações, tornou mais rigorosos os critérios para a exigência de elaboração do PAE, consequentemente aumentando o número de barragens para as quais o documento é necessário.

Para definir a classificação do risco associado a uma barragem e posterior elaboração de seu PAE, é necessário o conhecimento dos danos que uma possível ruptura da barragem venha a gerar a jusante da estrutura (BRASIL, 2020). O PAE também deve conter a definição da Zona de Autossalvamento (ZAS), que determina, em caso de acidente, a região a jusante da barragem em que se considera não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes, conforme o mapa de inundação. Neste caso, estudos de rompimento de barragens, conhecidos também como *Dam-Break*, tornam-se necessários para estimar parâmetros específicos do dano causado pelo rompimento. Todavia, tais estudos necessitam de dados de entrada representativos para que os resultados se aproximem da realidade, destacando os seguintes: seções topobatimétricas, topografia do vale a jusante, volume do reservatório, altura da barragem, formação e evolução da brecha de ruptura e o coeficiente de rugosidade de Manning no vale de inundação (TSCHIEDEL, 2017).

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) caracteriza a resistência que o terreno impõe ao escoamento, sendo fundamental para descrever a variação temporal da vazão ao longo do domínio reproduzido (LI e ZHANG, 2001). No âmbito do estudo de ruptura de barragens, este coeficiente vem sendo abordado por diferentes autores quanto à sua influência em variáveis envolvidas no tema. Collischonn e Tucci (1997) relatam que variáveis como a vazão máxima e o tempo de pico são sensíveis às variações do coeficiente de rugosidade de Manning. De acordo com Gallegos *et al.* (2009) o coeficiente de Manning uniforme tem pouco impacto na extensão da mancha de inundação. Rocha (2015) declara em seu estudo que a influência do coeficiente de Manning está mais relacionada com o tempo de chegada da onda de pico do que com a extensão da mancha de inundação. Tschiedel (2017) afirma em seu trabalho que, para barragens localizadas em vales encaixados e íngremes, o coeficiente de Manning pode influenciar na determinação de parâmetros de avaliação como velocidade, vazão de pico e tempo de pico, enquanto que, para vales abertos e de baixa declividade, o coeficiente de rugosidade já não possui influência tão relevante. Contudo, Lyra *et al.* (2010) indica

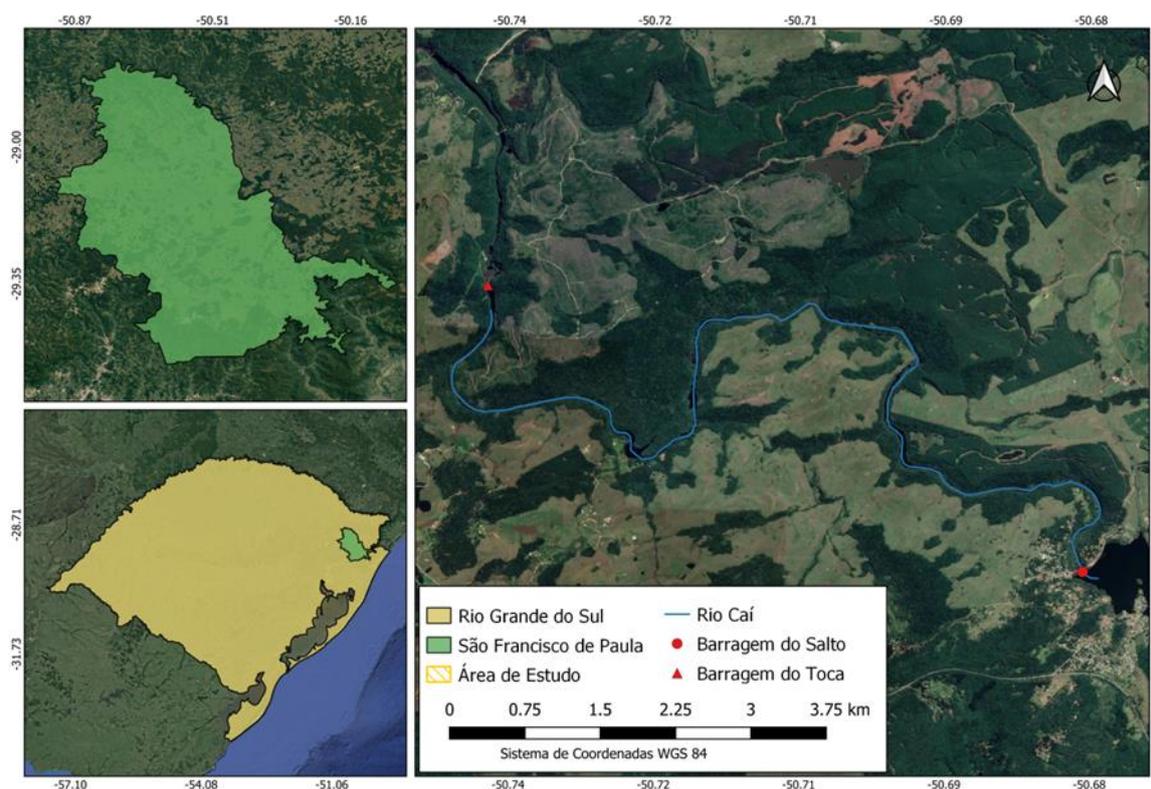
que uma das grandes dificuldades na aplicação da modelagem hidráulica se consiste precisamente numa seleção adequada de valores para os coeficientes de rugosidade de Manning.

O objetivo deste trabalho é, precisamente, o de contribuir para a avaliação da influência dos valores considerados para o coeficiente de rugosidade de Manning, nos resultados da modelagem hidrodinâmica da propagação de onda de cheia oriunda da ruptura hipotética de barragens. Para isso, foi adotado como estudo de caso a barragem do Salto e foram utilizados alguns parâmetros de avaliação, designadamente: vazões, velocidades e profundidades máximas, tempos de chegada da onda de pico, área total atingida pela mancha de inundação e mapa de inundação.

METODOLOGIA

O estudo de caso desenvolvido neste trabalho refere-se à barragem do Salto, localizada no município de São Francisco de Paula – RS e instalada no rio Caí, de propriedade da Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica (CEEE-G). A barragem é do tipo gravidade em concreto e possui altura equivalente a 10 m, comprimento de 600 m e reservatório com volume total de 14 hm³. A extensão longitudinal avaliada considera o trecho do rio entre a barragem do Salto até o início do reservatório da barragem do Toca, totalizando 11,7 km de extensão (Figura 1).

Figura 1 - Localização da barragem do Salto.



Para o desenvolvimento das análises referentes à influência da rugosidade no escoamento no rio principal e no vale de inundação na sua totalidade, optou-se por utilizar o mesmo valor para o coeficiente de Manning na calha do rio e nas margens, ao longo de todo o trecho estudado. O U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2016) sugeriu uma estimativa de valores a serem considerados para diferentes locais de escoamento de acordo com o tipo de uso de solo local. Segundo a bibliografia, tem-se que locais de escoamento como rios naturais e zonas de inundação possuem

valores de coeficientes de Manning que variam entre 0,025 e 0,15 $\text{sm}^{-1/3}$ e 0,025 e 0,2 $\text{sm}^{-1/3}$, respectivamente. Os coeficientes escolhidos, ilustrados na Figura 2, almejam analisar o comportamento do escoamento considerando um valor do coeficiente de rugosidade baixo e outro alto, 0,035 $\text{sm}^{-1/3}$ e 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$; e analisar um valor de coeficiente intermediário, nesse caso 0,06 $\text{sm}^{-1/3}$.

Figura 2 - Coeficientes de rugosidade de Manning utilizados. Fonte: Brisbane (2017).

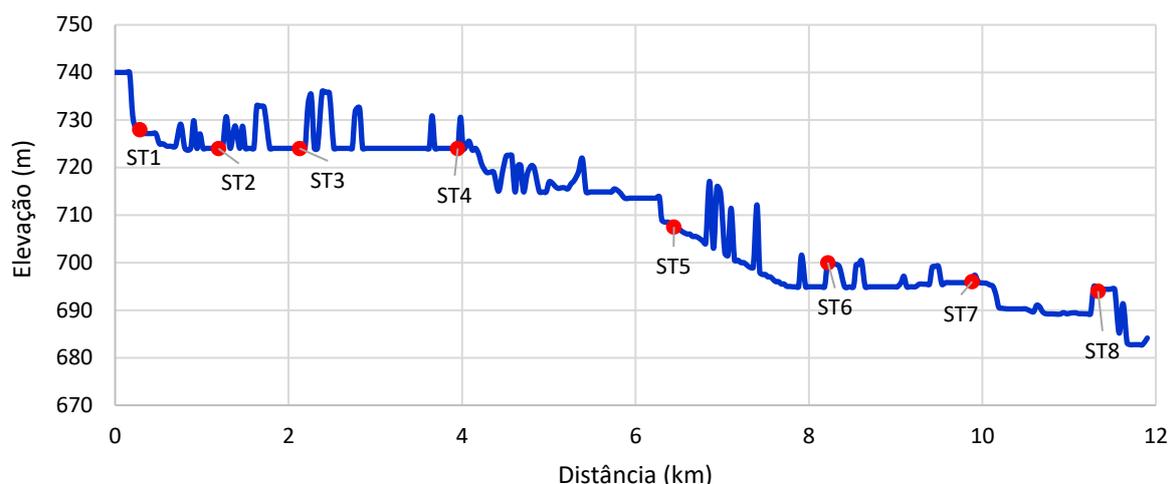


Para a simulação da ruptura hipotética da barragem do Salto, foi utilizado o *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS (versão 6.1), desenvolvido pelo USACE, no módulo bidimensional (2D). A malha utilizada considerou uma geometria de 10 m X 10 m nas proximidades do rio e de 100 m X 100 m nas zonas mais afastadas do rio. A fim de avaliar apenas o resultado gerado pela variação do coeficiente de Manning foi escolhido fixar alguns dados de entrada nas simulações. Na condição de contorno de montante considerou-se o hidrograma de ruptura baseado em arquivos disponibilizados pela proprietária da barragem referente ao cenário com ruptura extrema por galgamento e passagem de cheia decamilenar afluente, com vazão máxima de 6.118,2 m^3/s e tempo de pico igual a 10 minutos. Além disso, optou-se por utilizar como condição de contorno de jusante uma declividade de 0,001 m/m, associada à ocorrência do regime uniforme.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado foi o “*Forest and Buildings removed Copernicus DEM*” (FABDEM). Com resolução espacial de 30 m, essa base topográfica consiste em uma remodelação a partir de uma versão do COPERNICUS DEM. Trata-se de um Modelo Digital de Terreno (MDT) representado a partir de um Modelo Digital de Superfície (MDS) e, para isso, foram realizados reprocessamentos para retiradas de árvores e áreas urbanas do MDE de origem (HAWKER *et al.*, 2022).

Com o intuito de analisar os resultados, foram escolhidas oito seções transversais distribuídas ao longo trecho do rio estudado. A Figura 3 apresenta o perfil longitudinal do terreno FABDEM extraído a partir do eixo do rio e, também, a posição, tomada a partir da seção da barragem e percorrida através do eixo do curso d’água, de cada uma das oito seções transversais.

Figura 3 – Perfil longitudinal do terreno FABDEM e posição das seções transversais utilizadas.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de avaliar a influência da rugosidade na propagação da onda de ruptura ao longo do vale a jusante, foram analisadas métricas como vazões, velocidades e profundidades máximas, tempo de chegada da onda de pico, além da área total atingida pela inundação e mapa de inundação. A Figura 4 apresenta graficamente os resultados obtidos para algumas métricas analisadas e a Figura 5 apresenta algumas seções transversais com as profundidades máximas extraídas do *software* HEC-RAS.

A Figura 4(a) exhibe a propagação das vazões máximas para as simulações feitas com os três valores do coeficiente de Manning em cada seção analisada. Os resultados obtidos foram relativamente próximos entre si. Ainda assim se percebe que a maior diferença encontrada acontece entre os coeficientes de Manning de 0,035 e 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$, nas seções 2 e 3, chegando a aproximadamente 500 m^3/s (cerca de 10% dos valores estimados nestas seções). Ao longo do trecho analisado, verifica-se que, quanto maiores os coeficientes de Manning, menores são as vazões máximas observadas. Esse resultado é esperado já que, possuindo menor rugosidade no leito do rio e nas margens, as vazões tendem a ser maiores pois apresentam menor resistência ao escoamento.

As velocidades máximas atingidas podem ser visualizadas na Figura 4(b), onde se percebe que a velocidade máxima diminui com o aumento do coeficiente de Manning. Em todas as seções foram observadas velocidades máximas da onda de cheia maiores para o coeficiente de 0,035, seguidas de 0,06 e 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$, com exceção da seção 2 que apresentou um comportamento diferente, tendo uma diferença relativa de apenas 2% entre os coeficientes extremos. A maior diferença percentual encontrada entre os extremos (coeficientes de Manning de 0,035 e 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$) é da ordem de aproximadamente 44% e acontece na seção transversal 1. Entretanto, a seção 4 apresentou valores muito maiores de velocidades máximas para todos os coeficientes de Manning do que o restante das seções observadas. Esse comportamento resulta da geometria estreita presente nessa seção transversal, conforme pode ser visto na Figura 5.

O tempo de chegada da onda de pico pode ser analisado através da Figura 4(c). Nas primeiras seções avaliadas, mais especificamente até a seção transversal 3, os resultados obtidos do tempo de pico para os diferentes coeficientes de Manning são muito próximos. Contudo, a partir da seção 4 os resultados apresentam maiores diferenças, chegando até a 57 minutos na seção 8 entre os coeficientes de rugosidade extremos. Analisando o gráfico, ainda se percebe que os resultados com maiores valores de tempo de pico aparecem para o maior coeficiente de Manning, de 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$, o que já era esperado, uma vez que um terreno mais rugoso retarda o avanço da onda de cheia.

As profundidades máximas encontradas para cada coeficiente de Manning são apresentadas na Figura 4(d). Seguindo o mesmo padrão encontrado nas vazões máximas, os valores observados são relativamente semelhantes para todas as seções transversais analisadas. A maior diferença relativa encontrada entre os extremos do coeficiente de Manning, 0,035 e 0,11 $\text{sm}^{-1/3}$ é da ordem de aproximadamente 20% e se encontra nas seções transversais 6 e 7. Através da análise do gráfico percebe-se que os valores de profundidade aumentam em cada seção conforme aumenta o coeficiente de Manning, o que também pode ser observado nas seções transversais mostradas na Figura 6. Entretanto, a seção transversal 4 apresenta valores de profundidades menores bem distantes do padrão acompanhado nas outras seções. Este comportamento pode ser decorrente da configuração da geometria do MDE FABDEM. Nesta região, a calha do rio diminui de largura, consequentemente provocando um estrangulamento da seção transversal. Pelo fato de o regime de escoamento ser subcrítico, há um decréscimo das áreas molhadas, bem como das profundidades. Isso também explica o aumento das velocidades máximas nesta seção (Figura 4(b)).

Figura 4 – Parâmetros analisados nas seções transversais ao longo do vale a jusante: (a) Propagação das vazões máximas; (b) Velocidades máximas; (c) Tempo de chegada da onda de pico e (d) Profundidades máximas.

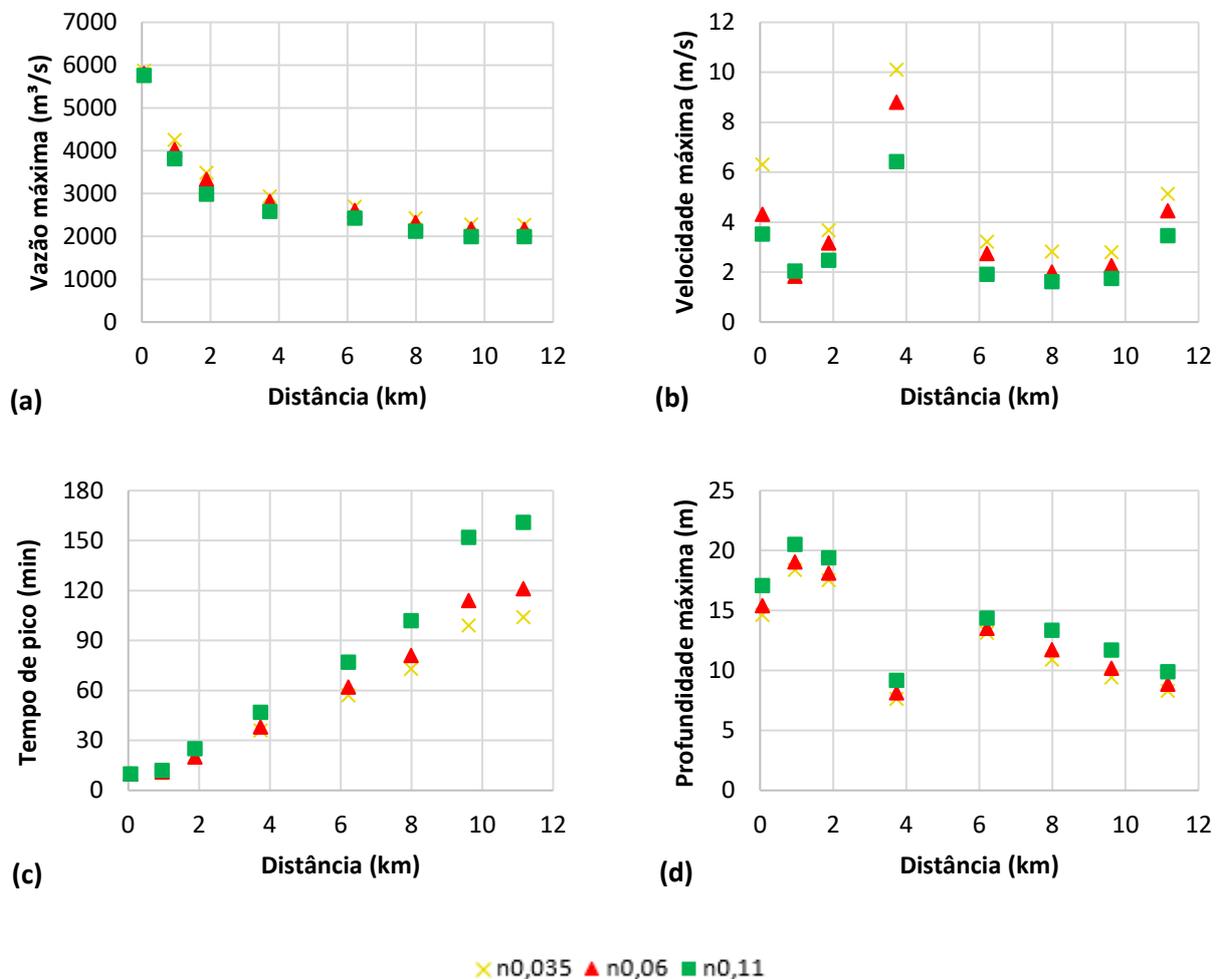
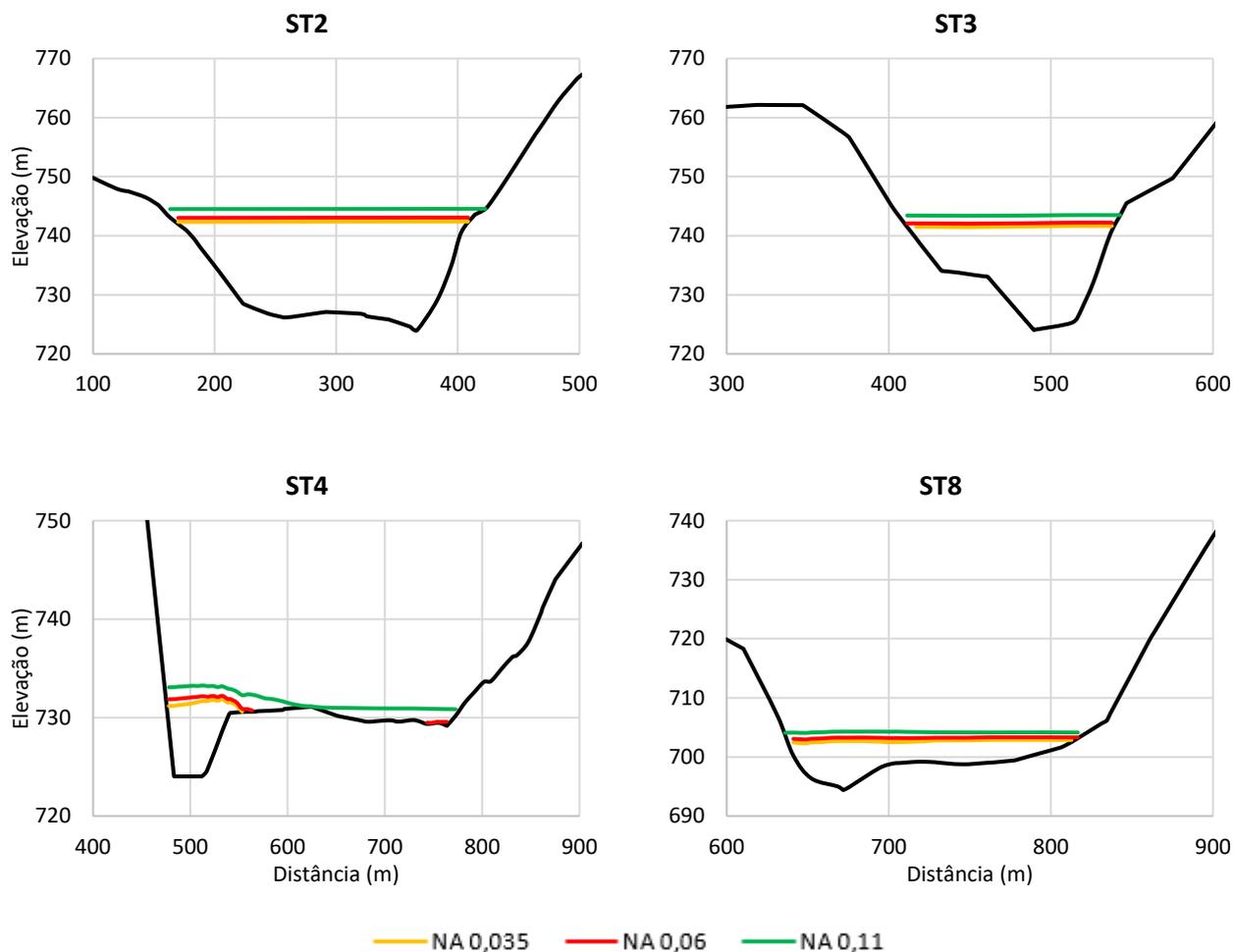
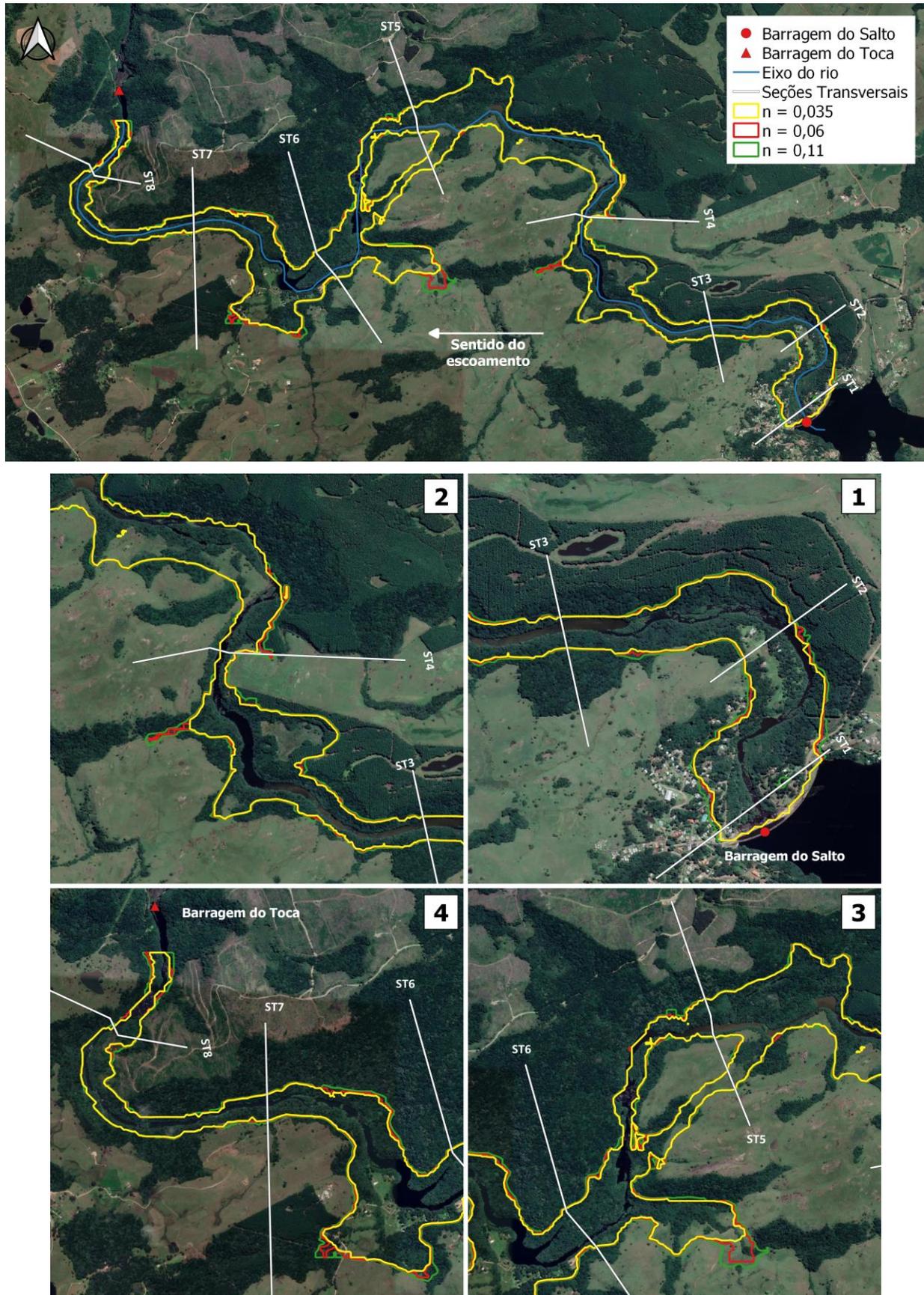


Figura 5 – Algumas seções transversais e profundidade máximas extraídas do *software* HEC-RAS.



As manchas de inundação geradas no *software* HEC-RAS foram extraídas para um formato .shp, sobrepostas e analisadas no *software* de geoprocessamento QGIS. A Figura 6 apresenta o resultado obtido quando comparados os coeficientes de rugosidade de Manning simulados, indicando que as manchas de inundação apresentam poucas diferenças quando analisadas visualmente.

Figura 6 – Diferença entre as manchas de inundação (vista geral e em detalhes) para os três coeficientes de Manning estudados.



Os valores encontrados referentes à área atingida pela mancha de inundação para os três coeficientes de Manning analisados resultaram em valores de área próximos, sendo de 2,75 km² para o coeficiente de Manning de 0,035 sm^{-1/3}; 2,86 km² para o coeficiente de 0,06 sm^{-1/3} e 3,07 km² para o coeficiente de 0,11 sm^{-1/3}. O coeficiente de Manning de 0,06 sm^{-1/3} apresentou uma diferença de 0,12 km² a mais, quando comparado ao menor coeficiente, diferença que corresponde a aproximadamente 4%. Já o coeficiente de 0,11 sm^{-1/3} apresentou uma diferença de 0,33 km² a mais, que corresponde a aproximadamente 12% em comparação com a área do menor coeficiente. Percebe-se que o valor de área mais alto está associado ao coeficiente mais rugoso, seguindo o esperado desse resultado. Nesse sentido, também se percebe um aumento das larguras máximas em cada seção conforme o coeficiente de Manning também aumenta.

CONCLUSÃO

O presente estudo desenvolve uma análise comparativa entre os resultados oriundos de simulações hidrodinâmicas, avaliando características da inundação proveniente da ruptura hipotética da barragem do Salto. Ao desenvolver a propagação da onda de cheia através do *software* HEC-RAS no módulo 2D, foi realizada a análise de alternar o coeficiente de rugosidade de Manning a fim de investigar os impactos gerados. Diante dos resultados analisados, tem-se que, para os coeficientes de Manning testados, não houve grande variação entre as áreas de inundação, vazões e profundidades máximas nas seções. Para as áreas de inundação, as diferenças relativas máximas encontradas entre os três coeficientes de Manning utilizados foram de 12%; para as vazões de pico, 16%; para as profundidades máximas, 20%. Entretanto, percebe-se que os parâmetros de velocidade máxima e tempo de chegada da onda de pico são sensíveis à alteração do coeficiente de Manning. Para as velocidades máximas, as diferenças relativas máximas encontradas entre os três coeficientes de Manning foram de 44% e para o tempo de chegada da onda de pico foi de 55%. Tal impacto é significativo quando se realiza o mapa de delimitação do ZAS, por exemplo. A dificuldade acerca da disponibilidade de informação de campo para estabelecer os coeficientes de rugosidades e a incerteza envolvida quanto ao seu estabelecimento é elevada. Não há garantia diante das alterações provocadas pelo arrastamento e deposição de material do leito e do revestimento vegetal em cheias naturais, assim como em uma ruptura artificial. Dessa forma, visando compor simulações que estejam a favor da segurança em relação a todos os parâmetros relevantes para o PAE, recomenda-se, em estudos deste tipo, que sejam realizadas duas simulações: uma com coeficiente de rugosidade mais baixo, minimizando assim os tempos de pico e maximizando as velocidades do escoamento; e outra com coeficiente de rugosidade mais elevado, a fim de se maximizar as profundidades máximas de escoamento e as áreas abrangidas pela mancha de inundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos financiadores e facilitadores: CEEE-G pelo financiamento da pesquisa e pelo fornecimento de dados referentes à barragem do Salto, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), ao CNPq (Brasil) e à CAPES (Brasil).

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 20 de setembro de 2010.
- BRASIL. Lei n° 14.066, de 30 de setembro de 2020. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 30 de setembro de 2020.

BRISBANE. CITY COUNCIL INFORMATION. Manning Roughness. Disponível em https://www.brisbane.qld.gov.au/sites/default/files/ncd_appendixc_part3.pdf.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. *Análise do Rompimento hipotético da barragem de Ernestina*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.

FERLA, R. *Análise de aspectos hidráulicos de métodos simplificados envolvendo rompimento de barragens*. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

GALLEGOS, A.H.; SCHUBERT, J.E.; SANDERS, B.F. *Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A Baldwin Hills, California case study*. Advances in Water Resources. 2009.

HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. (2022). "A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed". Environmental Research Letters 17(024016). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>.

LI, Z.; ZHANG, J. *Calculation of field manning's roughness coefficient*. Agricultural Water Management, v.49, n.2, p.153-161, 2001.

LYRA, G. B.; CECILIO, A. R.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G. B. *Coefficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2010.

TSCHIEDEL, A. D. F. *Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens*. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. *HEC-RAS River Analysis System*. Hydraulic Reference Manual. Version 5. Davis: 2016.