

Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS

Campus Erechim

Camila Dalla Rosa

**INCERTEZA NA SIMULAÇÃO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE  
MONJOLINHO/RS DEVIDO À VARIAÇÃO DO PASSO DE TEMPO  
COMPUTACIONAL E POSICIONAMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS**

Erechim - RS

2017

Camila Dalla Rosa

**INCERTEZA NA SIMULAÇÃO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE  
MONJOLINHO/RS DEVIDO À VARIAÇÃO DO PASSO DE TEMPO  
COMPUTACIONAL E POSICIONAMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal  
da Fronteira Sul – UFFS – Campus  
de Erechim, como parte das  
exigências para obtenção do título  
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Valmir da Silva

Erechim - RS

2017

Camila Dalla Rosa

**INCERTEZA NA SIMULAÇÃO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE  
MONJOLINHO/RS DEVIDO À VARIAÇÃO DO PASSO DE TEMPO  
COMPUTACIONAL E POSICIONAMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal  
da Fronteira Sul – UFFS – Campus  
de Erechim, como parte das  
exigências para obtenção do título  
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Roberto Valmir da Silva  
(orientador)  
UFFS – Erechim

---

Prof. Dr. Paulo Afonso Hartmann  
UFFS – Erechim

---

Prof. Dr. José Mario Vicensi  
Grzybowski  
UFFS - Erechim

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Lourdes e meu pai Agostino, pelo apoio e amor que sempre recebi, vocês foram o meu incentivo e inspiração por cada hora de estudo que me tornam agora profissional. A linda história de vida e a vontade de batalhar de vocês me guiou para que eu andasse por um caminho sólido.

Agradeço ao meu irmão, Fábio, pelo apoio e por me cobrar resultados satisfatórios, você motivou meu entusiasmo para vencer novos desafios. Agradeço a minha irmã Fernanda pelo apoio durante esses cinco anos de graduação.

Agradeço aos familiares que me apoiaram e vibraram comigo a cada nova etapa.

Agradeço a todos os professores e técnicos da Universidade Federal da Fronteira Sul que de um modo ou outro contribuíram para minha formação. Agradeço em especial, o meu orientador professor Dr. Roberto Valmir da Silva que aceitou o desafio e me auxiliou nas dificuldades encontradas durante a realização do trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a todos que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

## Sumário

1. Introdução.....	6
2. Metodologia.....	9
2. 1. Área de estudo.....	9
2. 2. Inserção de dados .....	10
2. 3. Simulação da ruptura da barragem.....	10
2. 4. Análise de incertezas .....	10
2.4. 1. Número de seções topobatimétricas: .....	10
2.4. 2. Distância máxima de interpolação entre seções topobatimétricas.....	11
2.4. 3. Tempo computacional .....	11
3. Resultados e discussão .....	12
4. Conclusão .....	21
5. Referências: .....	22

# ANÁLISE DE INCERTEZA DEVIDO À VARIAÇÃO DO PASSO DE TEMPO COMPUTACIONAL E POSICIONAMENTO DE SEÇÕES NA SIMULAÇÃO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE MONJOLINHO/RS

*Camila Dalla Rosa, Daniel de Oliveira e Souza e Roberto Valmir da Silva*

**Resumo:** O presente trabalho teve por objetivo mapear as incertezas na simulação da ruptura da barragem de Monjolinho/RS. Para tanto foi utilizado o software HEC-RAS para simulações considerando diferentes passos de tempo computacional e posicionamento das seções topobatimétricas. O passo de tempo computacional variou de um segundo até doze horas, a distância entre seções de 40 até 400 metros e o número de seções levantadas de quatro até oito. Os resultados foram expostos graficamente e encontrou-se variações máximas entre todas as simulações de 6,11 metros para as alturas máximas, 3,52 metros por segundo para as velocidades máximas e 3.768,31 metros cúbicos por segundo para as vazões máximas.

**Palavras-chave:** HEC-RAS, Simulação hidráulica, Incerteza.

## UNCERTAINTY IN THE DAM BREAK SIMULATION OF MONJOLINHO/RS DAM DUE TO VARIATION OF THE COMPUTATIONAL INTERVAL AND CROSS SECTIONS POSITIONING

**Abstract:** This work aims to map the uncertainty in the dam break simulation of Monjolinho dam, located at the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Towards that end, it was used the HEC-RAS software for hydraulic simulations regarding different computation intervals and cross sections positioning. Computational interval varied from one second to twelve hours, whereas distance between two cross sections from 40 to 400 meters and the number of surveyed cross sections from four to eight. The results were shown by means of profiles and uncertainty accounted for 6.11 meters in the maximum water surface elevations, 3.52 meters per second in the maximum flow velocities and 3768.31 cubic meters per second in the maximum flows.

**Keywords:** HEC-RAS, Hydraulic simulation, Uncertainty.

## 1. Introdução

A Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010 estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Um dos instrumentos dessa lei é o Plano de Segurança de Barragem que por sua vez compreende o Plano de Ação de Emergência (PAE). Este plano estabelece ações para situações de emergência, uma delas é a identificação e análise das possíveis situações de emergência. Uma das ações emergenciais é aquela a ser tomada em caso de rompimento da barragem. Por meio da introdução da Lei 12.334/2010 o estudo de rompimento de barragens tornou-se etapa necessária para legalização das barragens no Brasil, aumentando a demanda por esse estudo. Profissionais de engenharia ligados principalmente ao setor energético usam a modelagem matemática para estudos de rompimento. Usualmente, esses profissionais têm usado o software HEC-RAS (ACE, 2010), devido à sua disponibilidade gratuita e facilidade de aplicação. Apesar de que o uso de modelagem matemática através da solução numérica de equações diferenciais ser bastante difundido na comunidade científica, pouco é discutido no âmbito de estudos de engenharia sobre suas limitações, incertezas e instabilidades, e a influência disso nos resultados. Uma exceção, é a consideração, nos estudos de rompimento, de brechas máximas e mínimas, como destacado por Gomes et. al. (2015) que ao analisar alguns parâmetros da formação da brecha como cota final da base, altura inicial do “piping”, inclinação lateral, largura final da base e a evolução temporal, demonstrou que as simulações são mais sensíveis a progressão, inclinação lateral e base final da brecha. Variações do coeficiente de rugosidade do canal (Manning) em intervalos pré-definidos, que também é uma exceção nos estudos de rompimento de barragem, mostraram resultados com diferenças expressivas para velocidade, vazão e níveis de água em estudos hipotéticos (SOUZA; SILVA; PARMIGIANI, 2015).

Vários fatores podem influenciar nos resultados de simulações de escoamento após o rompimento hipotético de uma barragem, como por exemplo os modelos utilizados, porém os mesmos podem ser definidos através de sua aplicabilidade, precisão e estabilidade. Segundo Monte-Mor (2004) os resultados podem ser influenciados pelas hipóteses adotadas, esquemas numéricos de solução, condições de simulação e dados de entrada.

O software HEC-RAS é um modelo de análise fluvial, desenvolvido pela Hidrologic Engineering Center (HEC) e de propriedade da U.S. Army Corps of Engineers (USACE), que utiliza de métodos de soluções numéricas para simular escoamentos variáveis unidimensionais. Este software permite a simulação de ruptura de barragem.

As equações de Saint-Venant permitem o cálculo do caudal e da altura da lâmina de água em função do espaço e do tempo. Estas equações tornam-se solução para um escoamento variável de superfície livre (SILVA; MAIA; PINTO, 2011). A integração tridimensional de Navier-Stokes em altura ou com a aplicação direta dos princípios de conservação mecânica a um volume de controle resultam nas equações de Saint-Venant utilizadas pelo HEC-RAS.

A dedução das equações de Saint-Venant é realizada a partir dos seguintes pressupostos segundo Lança (2000): o escoamento é unidimensional onde a profundidade e a velocidade só variam na direção longitudinal do canal, tornando a velocidade constante e em relação a uma secção perpendicular ao eixo longitudinal do canal a superfície da água é horizontal; despreza-se as acelerações verticais e pode se considerar a variação de pressão segundo a vertical hidrostática; aproxima-se como linha reta o eixo longitudinal do canal; não são considerados os efeitos de destacamento e deposição no escoamento pois se considera um declive de fundo pequeno, não móvel; aplica-se os coeficientes de rugosidade para o regime permanente e uniforme e o fluido apresenta densidade constante e é incompressível. As equações descritas abaixo utilizadas para o cálculo de escoamentos variável unidimensional estão baseadas no manual de referências do HEC-RAS (ACE, 2010).

- Princípio da conservação de massa

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (1)$$

O princípio de conservação de massa do volume de controle admite que a variação de escoamento que entra e sai do volume de controle é igual a variação do armazenamento no volume. Na equação (1)  $A_t$  refere-se a área total do escoamento do volume de controle,  $Q$  representa o caudal que flui no volume de controle e  $q_l$  representa as somas recebidas lateralmente pelo volume de controle.

- Princípio da conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{dz}{dx} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

Neste princípio o fluxo de quantidade de movimento que entra no volume de controle juntamente com as forças externas atuantes é igual a quantidade de movimento que sai do volume de controle. Nesta equação (2)  $S_f$  representa a inclinação da linha de energia que pode ser descrita pela equação de Manning-Strickler.

O modelo do HEC-RAS utiliza solução numérica de diferenças finitas associado a relação entre o escoamento do canal e o escoamento nas zonas de inundação adjacentes (SILVA; MAIA; PINTO, 2011).

O HEC-RAS possui algumas limitações descritas por Lauriano (2009), onde é possível destacar que: as equações adotadas pelo HEC-RAS que calculam o

hidrograma em fluxo não permanente, são equações unidimensionais, que podem não representar locais onde o fluxo pode ser caracterizado como bidimensional, ou seja, quando a velocidade de fluxo e a elevação da cota da água variam também no eixo perpendicular à direção x, omitindo resultados para faixas onde o escoamento expande e achata na mancha de inundação; há incertezas devido a perdas devido a infiltração e o armazenamento de água na área simulada; os parâmetros de formação de brecha causam incertezas nos resultados pois variam o perfil de elevação do pico de cheia e consequentemente no tempo de propagação, também quando há a formação de uma brecha se tem o transporte de sedimentos e escombros que podem alterar as características das seções topobatimétricas; as incertezas acerca dos valores de Manning podem ser significativos já que o transporte e arraste de escombros podem alterar tais valores, bem como o fluxo turbulento após a ruptura pode causar erosão no canal fluvial alterando tais valores.

Segundo Sharkey (2014), além das características da brecha e dos valores de rugosidade do canal e áreas de inundação, são também fatores que afetam a estabilidade do modelo: 1) espaçamento entre as seções topobatimétricas, 2) passo de tempo computacional, 3) fator teta, usado para estabilidade e acurácia na aproximação por diferenças finitas das equações de escoamento transitório, 4) tolerâncias e iterações de cálculo, 5) estruturas laterais ao canal, 6) condições iniciais, 7) canais muito inclinados – regimes mixos, 8) ondulações no canal, 9) pontes e 10) geometria das seções. Outros autores como ACE (2010), Sharkey (2014) e Thomas e Williams (2012) também citam tais fatores como fontes instabilidade no modelo do software HEC-RAS. Os fatores listados acima podem desde forçar o modelo a interromper uma simulação, devido ao acúmulo de erros superando um valor pré-determinado, até provocar oscilações e valores incoerentes de vazão, nível e velocidade nas seções modeladas. Este último efeito, caracteriza o mais perigoso, pois o modelo produz uma resposta, mas uma resposta não condizente com a realidade. Esta resposta não condizente pode levar a projetos e tomadas de decisão equivocadas.

Incertezas na determinação de áreas inundadas foram estudadas por Pappenberger et al. (2005) e nas velocidades, vazões e níveis por Souza, Silva e Parmigiani (2015) devido à indeterminação do coeficiente de rugosidade.

Apesar de amplo material sobre as instabilidades e como tratá-las no HEC-RAS (A.C.E., 2010; SHARKEY, 2014; THOMAS; WILLIAMS, 2012), pouco tem sido feito para mapear os erros produzidos nas saídas do modelo e, no caso específico de simulações de rompimento de barragens, na definição das áreas de inundação, velocidades alcançadas, vazões e níveis por instabilidades.

Os fatores que influenciam na estabilidade das simulações são vários e há uma necessidade que projetos de engenharia incorporem tais análises mostrando-as em forma de intervalos de incerteza. No caso de rompimentos de barragens, que mostrem faixas de variação das áreas inundadas e de outras variáveis, tais como vazão, níveis e velocidades. Assim, medidas gerenciadoras serão tomadas já levando em consideração incertezas do próprio processo de modelagem. Este trabalho teve como objetivo avaliar as incertezas na determinação nos valores de profundidades, velocidades e vazão de escoamento devido ao rompimento hipotético da barragem de Monjolinho/RS. Para tanto, as quantidades de seções levantadas e interpoladas foram modificadas, assim como os passos de tempo computacionais.

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de estudo

Para o estudo do rompimento hipotético escolheu-se a barragem de Monjolinho da região sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul. A mesma está localizada no Rio Passo Fundo, entre os municípios de Faxinalzinho (RS) e Nonoai (RS), pertencendo a bacia do Rio Uruguai. Segundo o Observatório Nacional de Barragens (2017) a barragem está em operação possuindo uma altura de crista de 74 m com um reservatório de área de 5,46 km<sup>2</sup> e uma potência instalada de 74 MW. A Figura 1 mostra a localização da barragem em estudo:

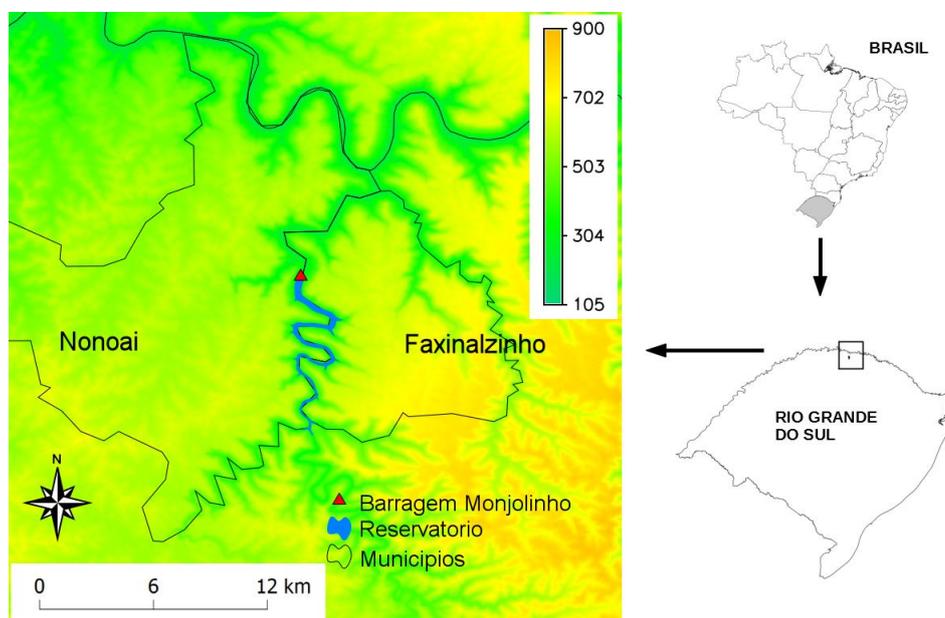


Figura 1: Barragem de Monjolinho -Latitude 27°20'45.0" S, Longitude 52°43'53,2"W.

Fonte: Arquivo pessoal.

## 2. 2. Inserção de dados

Utilizou-se o software de modelo computacional hidráulico HEC-RAS, obtido no site do *US Army Corps of Engineers*, para determinar as incertezas nas áreas inundadas devido ao rompimento da Barragem de Monjolinho. Os parâmetros de entrada do modelo foram: o modelo digital de terreno referente à região a jusante da barragem, as seções topobatimétricas locadas com a finalidade de descrever as singularidades do rio a jusante da barragem, valores de rugosidade do leito e áreas de inundação do rio e hidrogramas de cheia, que já haviam sido determinadas anteriormente.

## 2. 3. Simulação da ruptura da barragem

O critério para a ruptura escolhida foi por galgamento, havendo a formação de uma brecha quando o escoamento de água passa por cima da crista da barragem. Utilizou-se hidrogramas correspondentes à cheia com tempo de retorno de dez mil anos, que para o rio Passo Fundo é de 19.000 mil m<sup>3</sup>/s, o tempo de base utilizado foi de aproximadamente 10 dias. A brecha foi determinada com uma largura de base final de 92,34 m, declividades laterais de 1:2 com um tempo de formação de uma hora.

Como a simulação hidráulica é não permanente e não uniforme, utilizou-se assim as condições de contorno onde valores iniciais de vazões e níveis foram estabelecidos em todas as seções com valores retirados de simulações prévias em estado permanente. Na última seção topobatimétrica do levantamento a condição de contorno foi curva-chave da seção, ou seja, a relação entre nível e vazão. Desta forma o modelo hidráulico propaga uma onda de cheia pelos trechos de rio a jusante.

## 2. 4. Análise de incertezas

Para analisar as incertezas do modelo computacional hidráulico HEC-RAS variou-se o número de seções topobatimétricas inseridas no modelo, as distâncias máximas de interpolações entre seções topobatimétricas e o tempo computacional:

### 2.4. 1. Número de seções topobatimétricas:

Inicialmente utilizou-se todas as seções previamente levantadas para as simulações. Em seguida retirou-se a metade das seções topobatimétricas, de forma a intercalar a retirada ao longo do trecho.

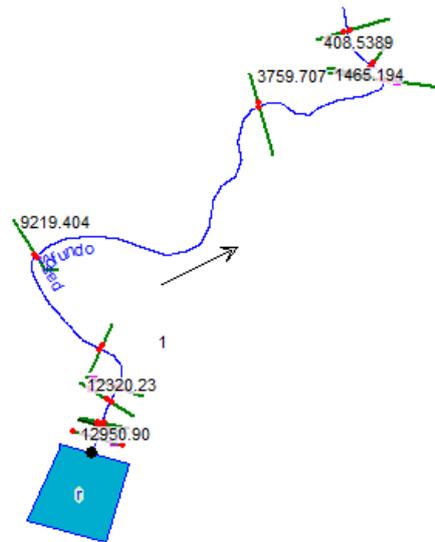


Figura 2: Todas as seções topobatimétricas previamente inseridas no modelo do Rio Passo Fundo.

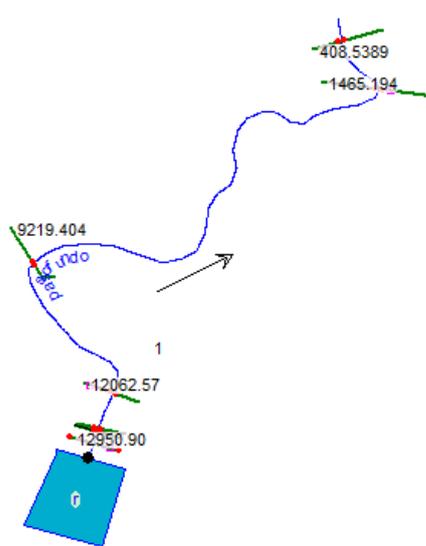


Figura 3: Metade das seções topobatimétricas previamente inseridas no modelo do Rio Passo Fundo.

#### 2.4. 2. Distância máxima de interpolação entre seções topobatimétricas

A distância máxima de interpolações entre seções topobatimétricas levantadas também foi variada desde o limite inferior indicado pelo Manual Hidráulico do HEC-RAS e o máximo permitido pelo modelo. Desta forma avaliou-se distâncias máximas de interpolações como 40m, 80m, 120m, 160m, 200m, 240m, 280m, 320m, 360m e 400m.

#### 2.4. 3. Tempo computacional

Utilizou-se todas as opções de tempo computacional apresentadas na interface do software: 1 segundo, 2 segundos, 3 segundos, 4 segundos, 5 segundos, 6 segundos,

10 segundos, 12 segundos, 15 segundos, 20 segundos, 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 3 minutos, 4 minutos, 5 minutos, 6 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 6 horas, 8 horas e 12 horas.

Desta forma realizou-se 580 simulações no modelo HEC-RAS, variando os itens acima citados, a fim de analisar as instabilidades.

### 3. Resultados e discussão

Os resultados estão apresentados de forma gráfica, onde o eixo do comprimento remete-se ao canal a jusante da Barragem de Monjolinho. O rompimento foi modelado no comprimento 12.752 m e a onda de cheia propagou-se a jusante, pelo Rio Passo Fundo.

#### 3.1. Variações do número de seções topobatimétricas previamente levantadas

As Figuras 4, 5 e 6 trazem em destaque as diferenças entre a Faixa A (todas as seções topobatimétricas previamente levantadas) e a Faixa B (metade das seções topobatimétricas levantadas) com as variações de tempo computacional e de distâncias máximas de interpolação entre seções.

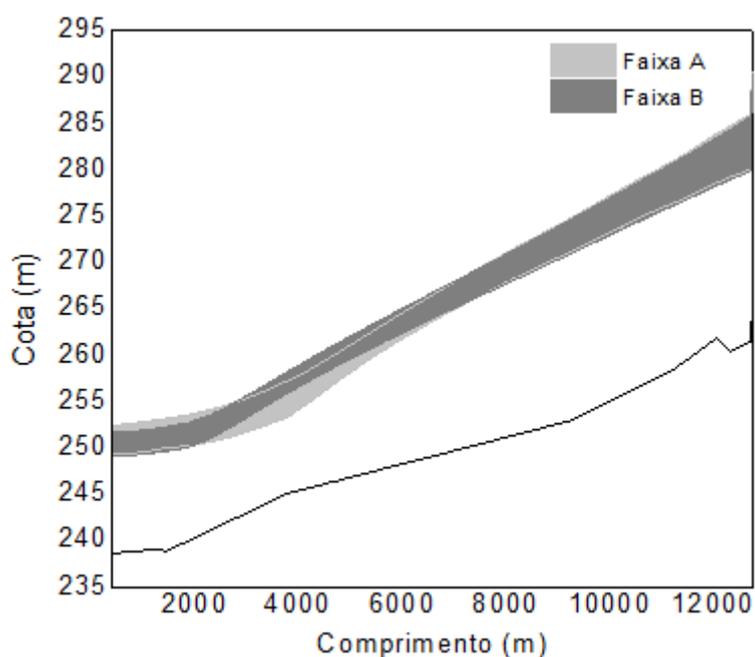


Figura 4: Variação das alturas máximas para tempo computacional de 1 segundo a 12 horas e distâncias entre interpolações de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas. Faixa B considera metade das seções levantadas.

As variações de cotas máximas e mínimas, conforme a Figura 4, foram parecidas no início do canal a jusante do rompimento entre a Faixa A e a Faixa B, havendo discrepância maior a partir do comprimento 7.000 m até o fim do Rio Passo Fundo. Nota-se que para comprimentos entre o rompimento (1.2752 m) até 9.219 m foram levantadas

um maior número de seções (5 seções), e no momento em que se retira metade das seções neste trecho não ocorrem grandes diferenças nos resultados. Já para trechos do Rio Passo Fundo entre comprimentos de 9.219 m até 1.465 m, nota-se maiores diferenças já que havia apenas uma seção topobatimétrica entre estes trechos e a mesma foi retirada causando uma diferença entre os resultados de alturas máximas das simulações.

O mesmo fato retratado na Figura 4 pode ser visto na Figura 5, onde a retirada de seções topobatimétricas possivelmente resultou em uma discrepância de resultados para as faixas de velocidade máxima e mínima entre os comprimentos de 9.219 m e 1.465 m. O ponto com maior discrepância de resultados, comprimento 3.759 m, apresentou diferenças de velocidade da onda para a Faixa A de máximo e mínimo entre 6,39 m/s e 5,42 m/s e para a Faixa B diferenças entre máximo e mínimo de 3,36 m/s e 2,87 m/s.

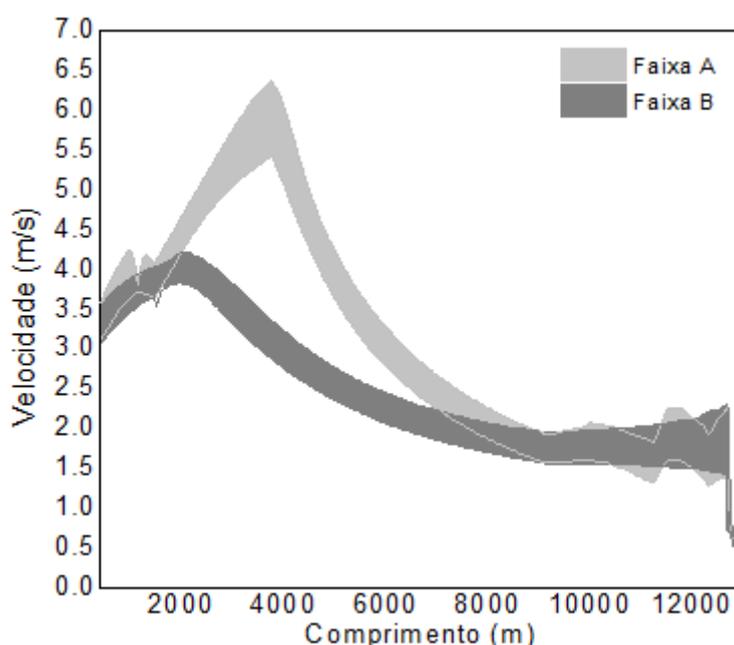


Figura 5: Variação das velocidades máximas para tempo computacional de 1 segundo a 12 horas e distâncias entre interpolações de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas. Faixa B considera metade das seções levantadas.

Nota-se na Figura 5 diferenças nos resultados também no início da simulação, onde, para a Faixa A houve maiores variações nas respostas, e a Faixa B convergiu para valores próximos. A retirada de seções topobatimétricas faz com que as soluções numéricas sejam construídas com  $dx$  (distâncias entre seções interpoladas), das equações 1 e 2, que podem não descrever algumas peculiaridades da calha do rio. Por exemplo, uma seção levantada que represente um estreitamento do canal, que pode representar uma velocidade maior, ao ser retirada deixará o modelo sem a informação podendo trazer respostas com velocidades menores. Isso vem do fato de que as

interpolações entre as seções constroem a morfologia da calha do rio de acordo com as informações das seções topobatimétricas levantadas, e com menos informações de entrada as incertezas sobre o modelo tendem a ficar maior.

Para as figuras 4 e 5, as maiores variações aconteceram próximas ao ponto de retirada de uma seção topobatimétrica que estava situada em uma região onde haviam poucas seções levantadas. Nota-se que ao retirar essa seção, algumas peculiaridades da morfologia do canal foram perdidas e as soluções numéricas mostraram resultados diferentes, como uma altura de onda de cheia maior e uma velocidade menor.

A variação de descarga não teve grandes influências com a retirada de seções, ao longo do Rio Passo Fundo em relação a retirada de seções topobatimétricas, conforme ilustrado na Figura 6. Nota-se que a Faixa A e B ficaram sobrepostas não indicando maiores diferenças, neste caso pode-se remeter o resultado ao fato da vazão estar associada também com o tempo computacional. Neste gráfico foi utilizado todos os tempos computacionais, mascarando os resultados descritos na figura 12, onde nota-se claramente diferenças entre os resultados decorridos pela variação de tempo computacional.

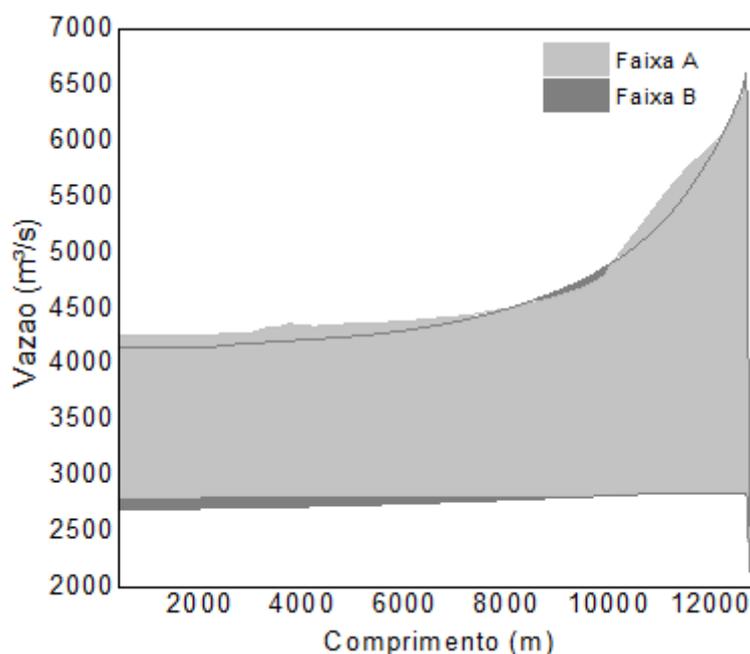


Figura 6: Variação das vazões máximas para tempo computacional de 1 segundo a 12 horas e distâncias entre interpolações de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas.

Faixa B considera metade das seções levantadas.

### 3. 2. Variações fixando tempo computacional em 1 hora

A análise dos resultados com o tempo computacional fixado em 1 hora (intervalo do hidrograma de entrada) para alturas máximas, demonstra na Figura 7 resultados similares para a Faixa A, onde as simulações ocorreram com todas as seções

topobatimétricas e a maior amplitude de diferença entre altura máxima e mínima foi registrada no comprimento 3.759 m com 1,72 m. A Faixa B também mostra uma amplitude de resultados menor onde a diferença máxima de altura da onda de cheia foi de 0,46 m no comprimento 10.768 m. Destaca-se novamente a diferença entre a Faixa A e B na retirada de seções topobatimétricas.

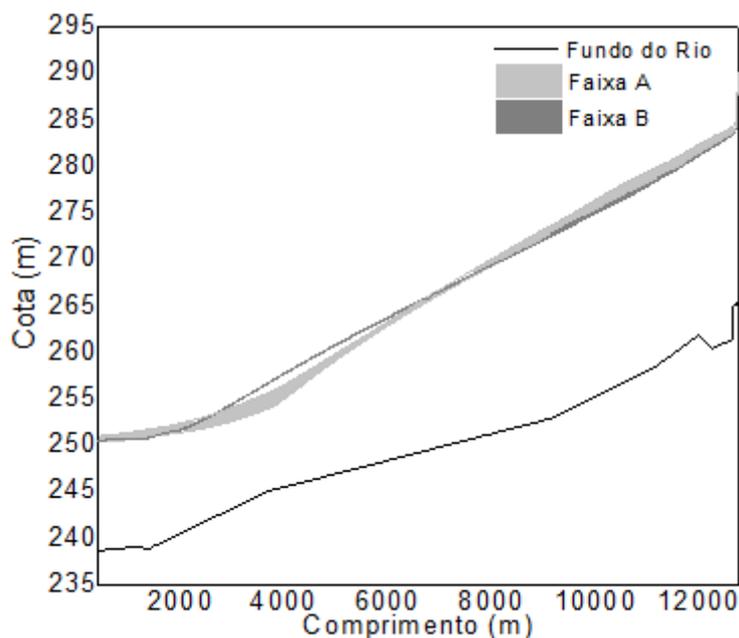


Figura 7: Variação das alturas máximas para tempo computacional de 1 hora e distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas. Faixa B considera metade das seções levantadas.

A variação da velocidade e da vazão de descarga da onda de cheia após o rompimento da barragem com o tempo computacional de 1 hora, conforme figuras 8 e 9, respectivamente, mostram um comportamento de diferenças entre máximos e mínimos baixas. Porém é possível destacar o efeito da retirada de seções topobatimétricas da simulação como principal fator para a divergência de resultados tanto para alturas, velocidades e vazões máximas.

A Figura 8 que retrata as variações de velocidades máximas onde Faixa A, com todas as seções levantadas obteve variações maiores que a Faixa B com metade das seções levantadas. Na Faixa A a maior variação encontrada foi de 0,45 m/s no comprimento 12.688,80 m, e a menor foi de 0,05 m/s no comprimento 1.133,85 m. Já a Faixa B resultou em uma variação máxima de 0,22 m/s n comprimento 11395,70 m e uma mínima de 0,01 m/s no comprimento 1.133,85 m.

Já para a Figura 9 (vazões máximas), a Faixa A resultou na maior variação logo após a simulação com 1.303,25 m<sup>3</sup>/s e uma variação mínima de 279,21 m<sup>3</sup>/s no

comprimento 3.205,85 m. A Faixa B teve a maior variação no comprimento 11.440,00 m com 526,77 m<sup>3</sup>/s e uma variação mínima de 35,60 m<sup>3</sup>/s na seção 3.205,85m.

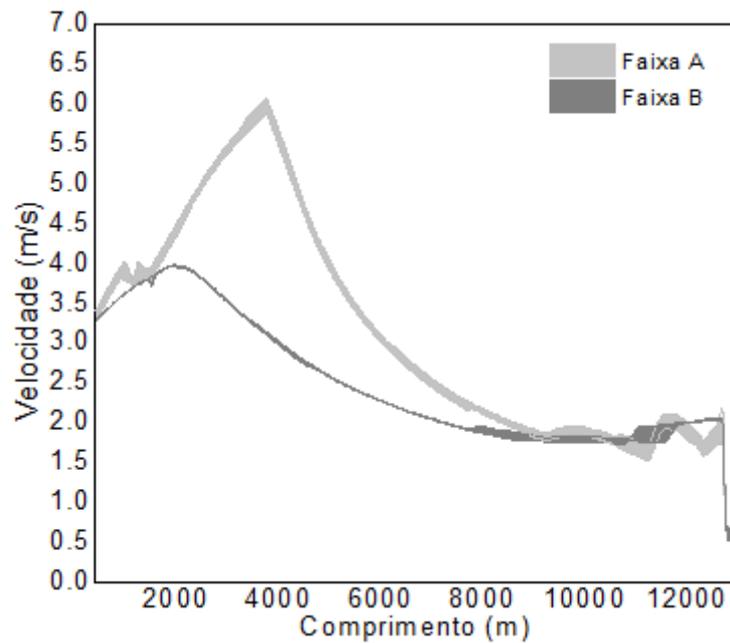


Figura 8: Variação das velocidades máximas para tempo computacional de 1 hora e distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas. Faixa B considera metade das seções levantadas.

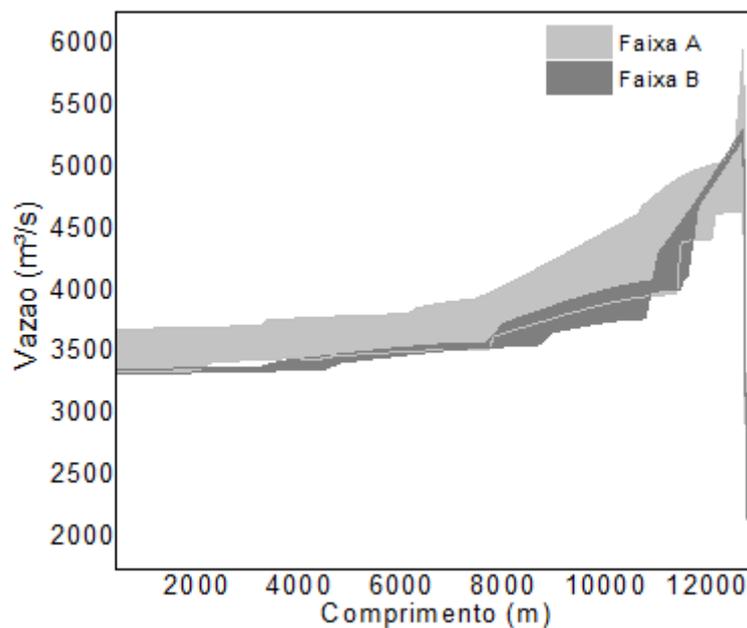


Figura 9: Variação das vazões máximas para tempo computacional de 1 hora e distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas. Faixa B considera metade das seções levantadas.

### 3. 3. Variação de tempos computacionais

A variação de altura máxima, velocidade e vazão atingida pela onda de cheia, descritas nas figuras 10, 11 e 12 respectivamente, mostra uma clara variação nos

resultados com tempos computacionais menores e superiores ao hidrograma de entrada. A explicação pode ser vinculada ao tipo de solução que o HEC-RAS utiliza, diferenças finitas com esquema implícito, e que ao modelar com um tempo computacional menor ou igual ao hidrograma de entrada (simulações de 1 segundo a 1 hora) as soluções tendem a ser mais coerentes com os dados de entrada. Já o uso de um tempo computacional maior que o hidrograma de entrada utiliza menos dados acerca da onda de cheia, podendo mascarar um episódio entre o novo tempo computacional provocando possíveis instabilidades e equívocos.

Na Figura 10 a maior variação de altura máxima para as simulações com tempos computacionais da Faixa A (tempos computacionais de 1 segundo a 1 hora) foi de 3,10 m no comprimento 3.759,71 e a menor de 1,63 m no comprimento 6.549,33. Já a Faixa B (tempos computacionais de 2 horas a 12 horas) obtiveram uma variação máxima de 3,29 m na mesma seção de maior variação para a Faixa A, já a variação mínima ocorreu no final da simulação com 0,75 m.

A Figura 11 mostra que para a Faixa A as maiores variações ocorreram próximas ao comprimento 3759,71 m com 3,29 m/s e a menor variação ocorreu na seção de comprimento 9219,40 m com uma amplitude de 0,18 m/s. A Faixa B obteve a maior variação logo após o rompimento com 0,37 m/s e a menor ao fim da simulação com 0,08 m/s. Nota-se também que para a Faixa A a maior velocidade foi de 6,39 m/s enquanto a Faixa B teve a maior velocidade de 5,67, ambas no comprimento 3759,71 m.

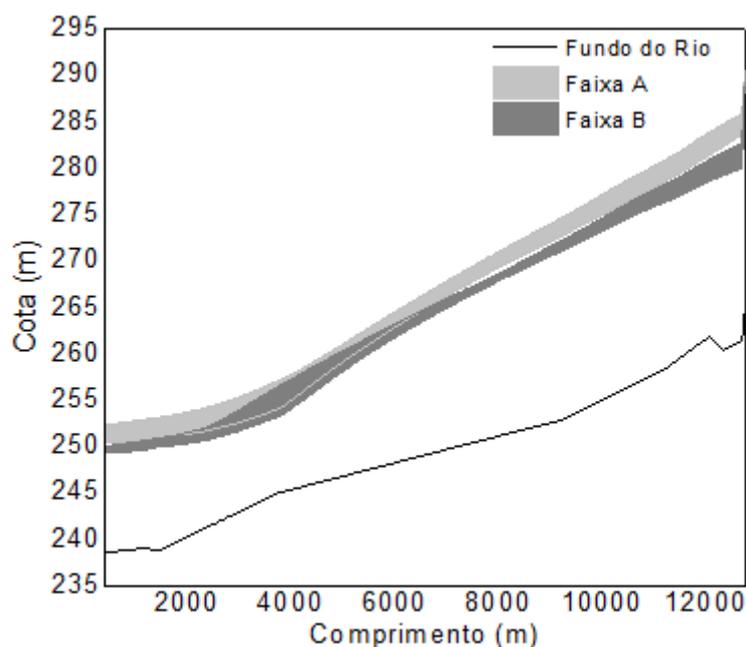


Figura 10: Variação de alturas máximas para todas e metade das seções levantadas e distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera tempos computacionais de 1 segundo a 1 hora. Faixa B considera tempos computacionais de 2 horas a 12 horas.

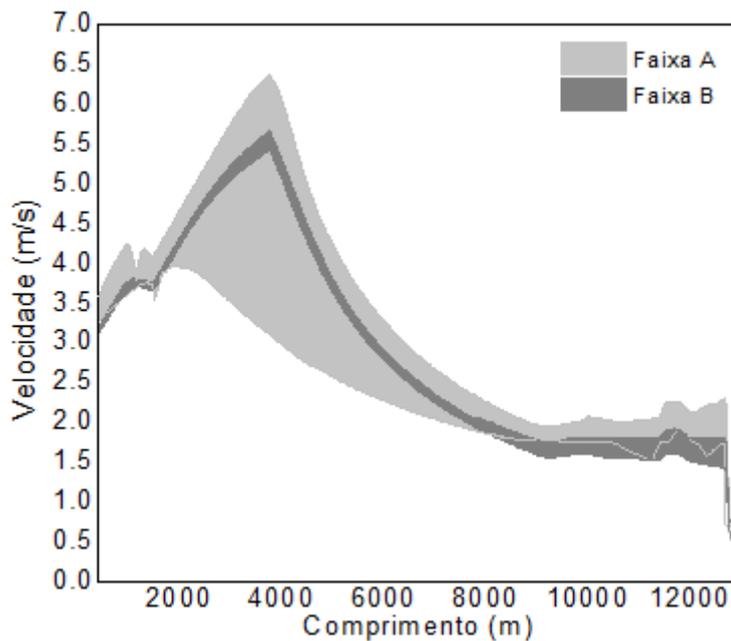


Figura 11: Variação de velocidades máximas para todas e metade das seções levantadas e distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera tempos computacionais de 1 segundo a 1 hora. Faixa B considera tempos computacionais de 2 horas a 12 horas.

A Figura 12 mostra as diferenças entre a Faixa A e B para as vazões máximas.

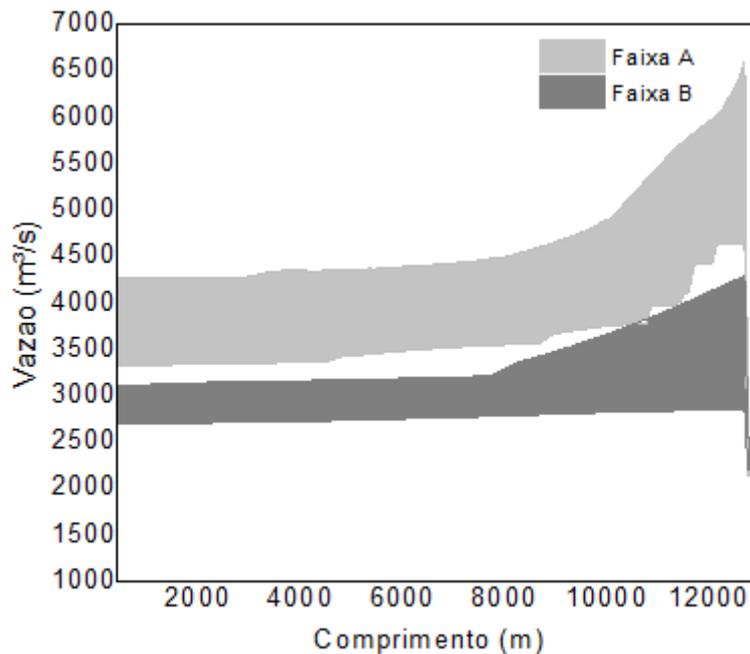


Figura 12: Variação de vazões máximas para todas e metade das seções levantadas e distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera tempos computacionais de 1 segundo a 1 hora. Faixa B considera tempos computacionais de 2 horas a 12 horas.

A maior vazão encontrada na Figura 12 em ambas as faixas foi ao início da simulação, para a Faixa A obteve-se 6.606,96 m³/s enquanto para a Faixa B encontrou-se 4.288,33 m³/s. As menores vazões foram encontradas ao final da simulação, para a

Faixa A obteve-se 3319,63 m<sup>3</sup>/s, enquanto para a Faixa B o menor valor encontrado foi de 2689,70 m<sup>3</sup>/s. A maior variação encontrada para a Faixa A foi de 1962,99 m<sup>3</sup>/s enquanto a Faixa B obteve uma maior variação de 1449,68 m<sup>3</sup>/s, a menor variação encontrada foi de 902,55 m<sup>3</sup>/s para a Faixa A e 411,14 m<sup>3</sup>/s para a Faixa B.

### 3. 4. Variações com todos os parâmetros

A Figura 13, 14 e 15 representa a variação de cota máxima, velocidade e descarga, respectivamente, atingida pela onda de cheia após o rompimento da barragem. Os dados representam a faixa de diferença máxima e mínima levando em consideração todas as simulações realizadas no estudo.

A Figura 13 retrata uma variação na cota de elevação entre 249,05 m a 290,57 m. As maiores variações entre cotas máximas e mínimas ocorreram entre as seções após o rompimento da barragem, 12.688,8 m até a comprimento próximo a 11.478,9 m com amplitudes que variam de 6,11 m a 5 m. Já a menor variação ocorreu no comprimento 7.266,66 m com uma amplitude de 2,98 m.

Para as diferenças de alturas destaca-se a variação devido ao tempo computacional, conforme figura 10, onde um tempo superior ao hidrograma de entrada mostrou alturas de onda de cheia menor que para tempos menores que o hidrograma de entrada, mostrando assim ser o principal fator para as variações descritas na Figura abaixo.

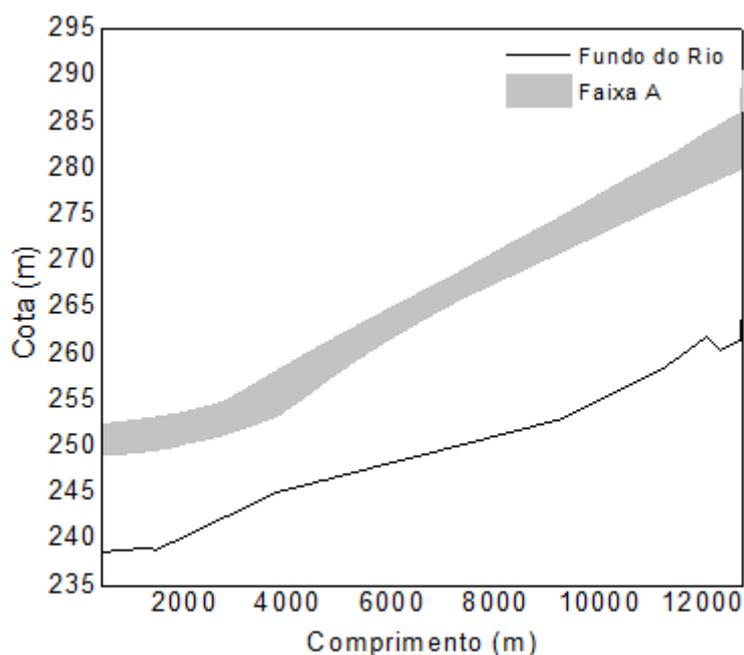


Figura 13: Variação das alturas máximas. Tempo computacional entre 1 segundo e 12 horas, distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas e metade seções levantadas.

A Figura 14 mostra uma variação de velocidades da onda de cheia após o rompimento entre 1,27 m/s e 6,39 m/s. A maior amplitude de diferenças entre as

simulações foi de 3,52 m/s no comprimento 3759,71 m, já a mínima foi de 0,39 m/s localizando-se próximo ao comprimento de 9.100 m. No geral a variação nas velocidades pode ser remetida a variação de seções topobatimétricas levantadas inseridas no modelo. Conforme a figura 5, as maiores variações ocorreram próximas a pontos de retirada de seções, demonstrando que quanto menos informações maiores as incertezas nas respostas.

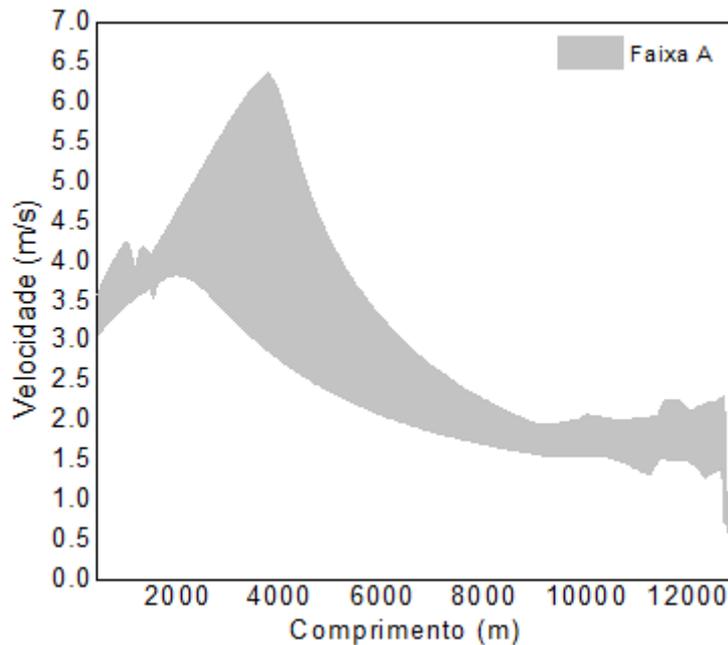


Figura 14: Variação de velocidades máximas. Tempo computacional entre 1 segundo e 12 horas, distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas e metade seções levantadas.

A Figura 15 tem vazões máximas de 6.606,96 m<sup>3</sup>/s logo após o rompimento e com uma vazão mínima de 2.689,70 m<sup>3</sup>/s ao final da simulação. A amplitude máxima de diferença entre as vazões máximas e mínimas encontradas foi de 3768,31 m<sup>3</sup>/s e a mínima de 1556,25m<sup>3</sup>/s. As vazões máximas também tiveram maiores influencias devido ao tempo computacional, conforme figura 12, explicada pela relação entre o tempo computacional e o hidrograma de entrada.

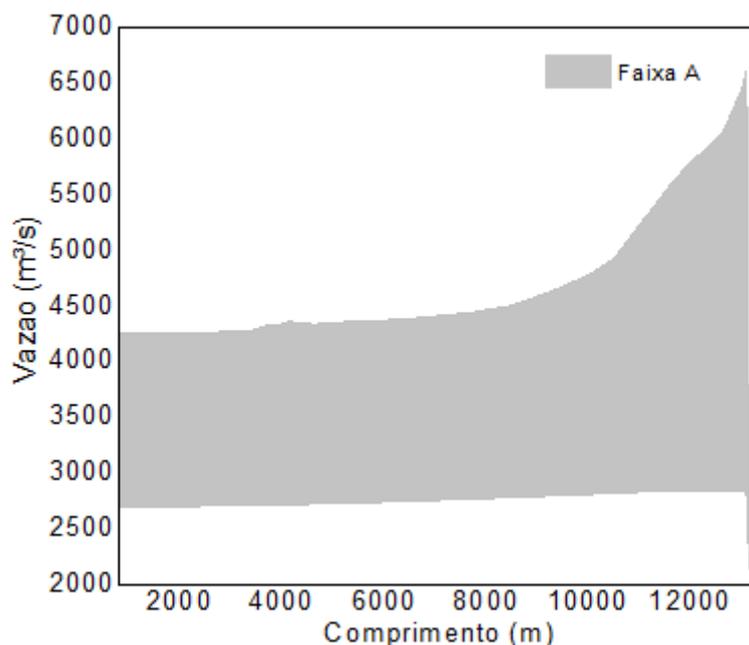


Figura 15: Variação das vazões máximas. Tempo computacional entre 1 segundo e 12 horas, distâncias entre seções interpoladas de 40 a 400 m. Faixa A considera todas as seções levantadas e metade seções levantadas.

#### 4. Conclusão

Neste trabalho foram realizadas centenas de simulações no software HEC-RAS para analisar as incertezas devido à variação do passo de tempo computacional e posicionamento de seções na simulação de ruptura da barragem de Monjolinho/RS. Os resultados foram abordados graficamente e assim discutidos.

O tempo computacional influenciou significativamente nos resultados de alturas e vazões máximas indicando que tempos computacionais superiores ao tempo do hidrograma de entrada oculta informações a respeito da onda de cheia, remetendo a possíveis erros.

A retirada de seções topobatimétricas levantadas demonstrou-se mais significativa em relação a resultados de velocidades máximas. A retirada de seções deixa o modelo com menos informações em relação a morfologia do rio, deixando de lado algumas peculiaridades que alteram os resultados.

O trabalho sugere que ao modelar uma ruptura de barragem alguns fatores devem ser atentados. O tempo computacional deve ser condizente com o hidrograma de cheia inserido no modelo, ou seja, deve ser menor ou igual ao hidrograma. Desta forma assegura-se que os picos do hidrograma serão representados no modelo, o que pode não ocorrer ao utilizar um tempo computacional maior que o hidrograma de entrada.

Já para o levantamento de seções topobatimétricas sugere-se que se tenha um número que consiga reproduzir a morfologia e as peculiaridades da calha do rio, como alongamentos e estreitamentos. Assim quanto mais informações de entrada o modelo conter menor serão as incertezas nos resultados.

#### 5. Referências:

A.C.E., U. S. HEC-RAS River Analysis System. **User's Manual, Version 4.1**, n. November, p. 1–790, 2010.

BRASIL, Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

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

LANÇA, Rui Miguel Madeira. **Contribuição para o estudo de teias recorrendo a um modelo distribuído**. 2000.. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Solo e da Água, Universidade de Évora, Lisboa, 2000.

LAURIANO, André Wihiam. **Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV E HEC-RAS**. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MONTE-MOR, Roberto César de Almeida. **Mapeamento de Áreas Inundáveis associadas à ruptura de barragens - Estudo de caso: Barragem de Ninho da Água - MG**. 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PAPPENBERGER, F. et al. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HECRAS using inundation and downstream level observations. **Journal of Hydrology**, v. 302, n. 1-4, p. 46– 69, fev. 2005.

SHARKEY, J. K. **Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages**. [s.l.] The University of Tennessee, 2014.

SILVA, T.; MAIA, R.; PINTO, P.. Estudo de escoamentos variáveis em canais naturais. Aplicação ao caso de ruptura de uma barragem. In: 6ª JORNADAS DE HIDRÁULICA,

RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE, 6., 2011, Porto. **Anais...** Porto: Feup, 2011. p. 127 - 136.

SOUZA, D. DE O. E.; SILVA, R. V.; PARMIGIANI, M. A. Avaliação da incerteza em variáveis de inundação por rompimento de barragem devido à variação do coeficiente de rugosidade. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...**Brasília: ABRH, 2015.

THOMAS, I. M.; WILLIAMS, D. T.. Common Modeling Mistakes Using HEC-RAS. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2007, Tampa. **Anais...** Reston: Asce, 2012.

INCERTEZA NA SIMULAÇÃO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE  
MONJOLINHO/RS DEVIDO À VARIAÇÃO DO PASSO DE TEMPO  
COMPUTACIONAL E POSICIONAMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

Trabalho de conclusão de curso de  
graduação apresentado como requisito  
para obtenção de grau de Engenharia  
Ambiental e Sanitária da Universidade  
Federal da Fronteira Sul.



---

Orientador

Prof. Dr. Roberto Valmir da Silva



---

Orientanda

Camila Dalla Rosa