

APLICAÇÃO DO HEC-RAS 6.1 NO ESTUDO DE CASO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, MINAS GERAIS, BRASIL

Bruna Carolina de Melo Almeida¹ ; Aloysio Portugal Maia Saliba² & Jorge Luis Zegarra Tarqui³

RESUMO – A mineração é uma atividade econômica essencial no contexto nacional. Barragens com a finalidade de contenção de rejeitos são amplamente utilizadas em função de aspectos essencialmente econômicos, sendo a ocorrência da ruptura destas estruturas, entretanto, um evento catastrófico, que acarreta vários danos ambientais e sociais. Um dos instrumentos que possibilita a avaliação prévia dos possíveis impactos resultantes de uma ruptura são os estudos de Ruptura Hipotética ou *Dam Break*. Para a realização destes estudos, um dos *softwares* mundialmente utilizados é o HEC-RAS, que, recentemente, incorporou a possibilidade de simulação de fluidos não-newtonianos. Com a finalidade de avaliar os impactos desta nova funcionalidade, o presente estudo se propõe a simular a ruptura da Barragem de Fundão e comparar os resultados àqueles obtidos por Machado (2017), no qual aproximava-se o comportamento do fluido hiperconcentrado pelo pseudo-*Manning*, a partir da análise de parâmetros como profundidade máxima e tempo de chegada da onda, bem como os mapas de inundação gerados. Os resultados mostram-se satisfatórios a partir da utilização da nova ferramenta e indicam que nos primeiros quilômetros a jusante da estrutura, região corresponde à Zona de Autossalvamento (ZAS), a consideração de fluidos aquosos ou hiperconcentrado não resulta em diferenças significativas nos parâmetros avaliados.

ABSTRACT– Mining is an essential economic activity in the national context. Dams made to contain tailing are widely used due to economic aspects. The occurrence of dam failure, however, is a catastrophic event that causes several environmental and social damages. One of the instruments that enables the evaluation for the potential impacts of a dam failure are the Dam Break studies. To perform these studies, a software used worldwide is HEC-RAS, which recently started to incorporate the possibility of non-Newtonian fluids simulation. In order to measure the impacts of this new functionality at HEC-RAS, the present study proposes to evaluate the failure of the Fundão Dam, with evaluation of changes in parameters such as maximum depth and wave arrival time, as well as the generated flood maps and to compare the results to those obtained by Machado (2017), where the behavior of the hyperconcentrated fluid was estimated using the pseudo-Manning methodology. The results are satisfactory with the use of the new tool and indicate that in the first kilometers downstream of the structure, the region corresponding to the “Self-Rescue Zone” (ZAS), the consideration of Newtonian or non-Newtonian fluids does not result in significant differences in the parameters rated.

Palavras-Chave – HEC-RAS, Fluidos Hiperconcentrados, *Dam Break*, Barragem de Fundão

INTRODUÇÃO

Recentemente a ocorrência de dois acidentes de grandes proporções, Barragem de Fundão (em 2015) e Brumadinho (em 2019), ambos no estado de Minas Gerais, colocaram em evidência a

1) Mestranda do programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Endereço: Rua Vitorino Magnavacca, Bunitis, Belo Horizonte. Fone: (31) 99588-9213. E-mail: brunacarolina@ufmg.br.

2) Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: asaliba@ehr.ufmg.br.

3) Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: jlztarqui@yahoo.com.br.

problemática relacionada ao rompimento de barragens de rejeitos. Trata-se de um evento catastrófico, que acarreta incontáveis danos ambientais, além de uma perda inestimável de vidas humanas, em alguns casos de ruptura.

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água, para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Com a ocorrência do rompimento da Barragem B-I, em Brumadinho (MG), foram propostas alterações na PNSB e foi aprovada a Lei nº 14.066, em 30 de setembro de 2020. Conforme destacado por Silva *et al.* (2020), entre as principais mudanças encontram-se a inserção de um capítulo específico para as infrações e sanções que os proprietários cujas barragens sofrerem rompimentos estarão sujeitos.

Os dispositivos legais no âmbito de ruptura de barragens de rejeitos, que se encontram estabelecidos na legislação de referência, conforme destacado anteriormente, estão cada vez mais estruturados e atentos aos impactos resultantes de uma eventual ruptura e, de acordo com Silva *et al.* (2020), o grande desafio da atualidade está relacionado com conferir o máximo de efetividade para a Política Nacional de Segurança de Barragens.

Dado esse contexto, destaca-se que uma importante ferramenta que possibilita a avaliação prévia de possíveis impactos associados a ruptura de barragens e é um dos principais subsídios na elaboração de Planos de Ação de Emergência (PAE) são os estudos de Ruptura Hipotética ou Dam Break. Tais estudos tem como objetivo a realização de uma modelagem hidrodinâmica da inundação potencial associada a ruptura hipotética de determinada estrutura. Os estudos de Dam Break permitem, através das modelagens realizadas, a delimitação de potenciais áreas atingidas a jusante. As modelagens estão em constante evolução e buscam se aproximar cada vez mais da condição real através de refinamento dos dados utilizados, bem como a evolução computacional dos *softwares* utilizados de referência.

Um dos *softwares* amplamente utilizados em escala mundial para a realização destes estudos, o HEC-RAS, passou recentemente por atualizações a partir da sua versão 6.0, incorporando entre as novas funcionalidades ferramentas que possibilitam a realização de simulações uni e bidimensionais de fluidos não-newtonianos. A possibilidade de incorporação dos fluxos de lama e detritos representa um grande avanço em relação as versões anteriores, nas quais para a realização das simulações de ruptura hipotética de barragens de rejeitos aproximava-se o comportamento do fluido pelo pseudo-Manning (*e.g.* Ventura, 2011).

Com a finalidade de avaliar as diferenças observadas nos resultados de uma modelagem hidrodinâmica bidimensional no HEC-RAS, a partir da utilização das novas ferramentas de fluidos não-newtonianos, este estudo se propõe a realizar uma análise da ruptura da Barragem de Fundão, utilizando-se como referência o estudo desenvolvido por Machado (2017).

METODOLOGIA

De forma a possibilitar a avaliação proposta da nova funcionalidade relativa à simulação bidimensional dos fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS, e posterior comparação com os resultados obtidos por Machado (2017) em sua simulação equivalente, o presente estudo pautou-se nas seguintes etapas metodológicas:

- Definição das variáveis de entrada: relativo à definição do hidrograma de ruptura, características geotécnicas e reológicas do rejeito e base topográfica. Todos estes parâmetros foram utilizados segundo dados consolidados e disponibilizados por Machado (2017), de forma a permitir a posterior comparação dos resultados. Destaca-se, em relação aos dados reológicos, a adoção de uma concentração volumétrica (C_v) de 47% e a utilização dos resultados das curvas reológicas relativas ao ponto 1 de coleta das amostras, de forma similar à Machado (2017).
- Modelagem hidráulica: consiste na definição dos cenários avaliados e os parâmetros para a propagação da onda de cheia pelo vale a jusante. Os cenários simulados no HEC-RAS v6.1 foram comparados aos Cenários 3 (Aquoso) e 4 (Hiperconcentrado) simulados por Machado (2017) em seu estudo. Em relação ao intervalo de tempo computacional, salienta-se que o *software* se baseia na solução das equações de *Saint-Venant*, visando o alcance da estabilidade do modelo, com base na condição de *Courant*. O coeficiente de rugosidade de *Manning*, na presente avaliação, foi determinado com base na cobertura vegetal apresentada ao longo da malha computacional avaliada. Para cada uso identificado foi atribuído o respectivo valor de *Manning* para o uso do solo conforme indicado por USACE (2021).
- Mapeamento da inundação potencial: referente a elaboração dos mapas de inundação e pós processamento dos resultados advindos da modelagem hidráulica, a partir da utilização da ferramenta de geoprocessamento ArcGis, que possui interface com o modelo hidráulico adotado.
- Análise dos resultados: realizada com base na abordagem de comparação binária com cálculo dos índices de desempenho F (e.g. Rocha, 2015; Vianini Neto, 2016; Machado, 2017).

A Figura 1 apresenta os parâmetros adotados para o uso e ocupação do solo. Destaca-se a malha de referência adotada (com *Grid* de 15 m), o eixo do rio (no qual realizou-se um refinamento do *Grid* empregando-se 5 m), bem como os cenários avaliados nas simulações.

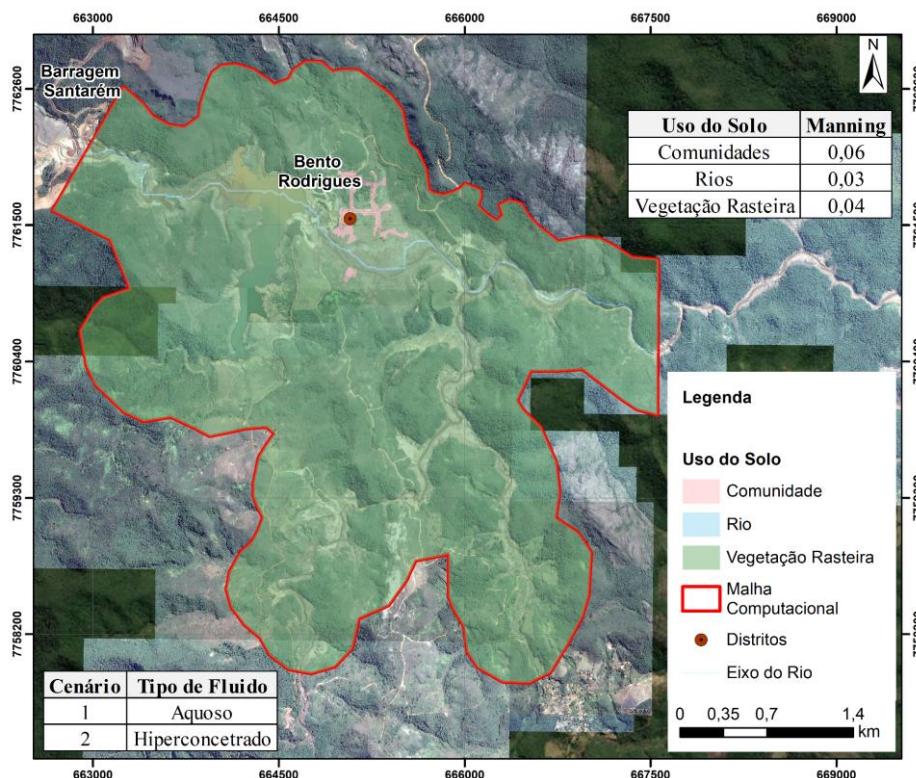


Figura 1 – Indicação da malha, uso e ocupação do solo e cenários

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação dos resultados foram definidas 7 seções de referência, conforme Figura 2.

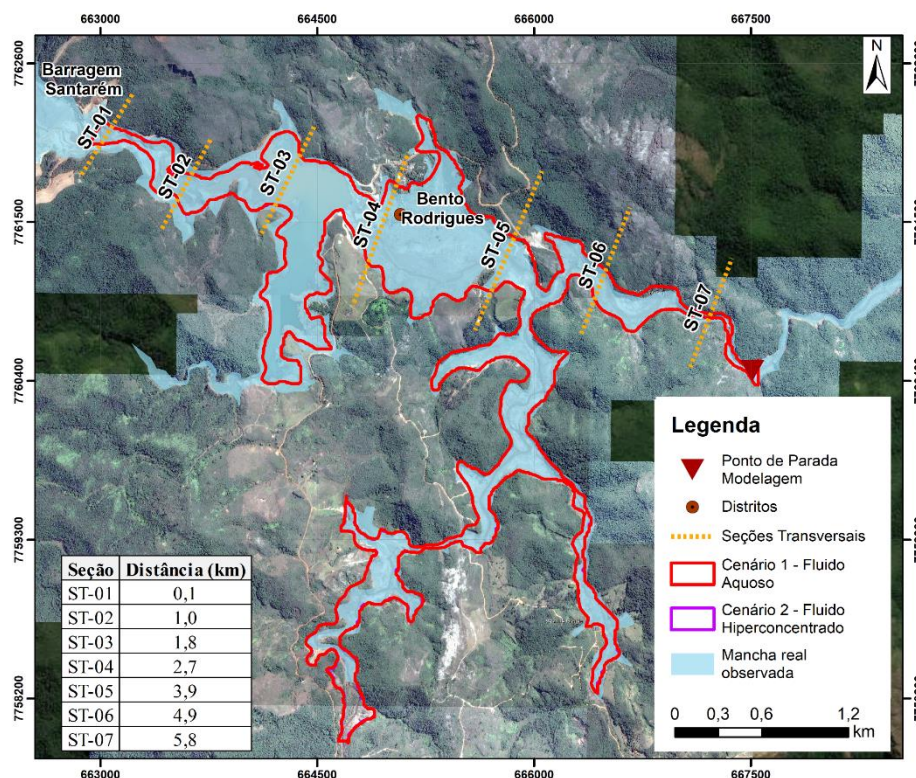


Figura 2 – Seções transversais de referência para a avaliação dos resultados

Com base nas etapas metodológicas descritas anteriormente e utilizando-se como referência os dados base de Machado (2017), de forma a possibilitar uma análise comparativa dos resultados, foi possível o mapeamento da inundação potencial associada a partir do *software* HEC-RAS v6.1.

A Figura 3 apresenta um mapa contendo as manchas de inundação resultantes dos cenários avaliados e a mancha correspondente aos Cenários 3 e 4, relativas ao estudo de Machado (2017). Observa-se que em algumas regiões de borda da mancha existem locais nos quais as diferenças foram mais significativas, sendo os resultados obtidos por Machado (2017) os mais conservadores. Tais diferenças foram visualizadas em especial no trecho compreendido entre a Barragem Santarém e Bento Rodrigues. Após Bento Rodrigues, região com forte efeito de remanso causado por um estrangulamento de seção a jusante, as diferenças passam a ser praticamente inexistentes.

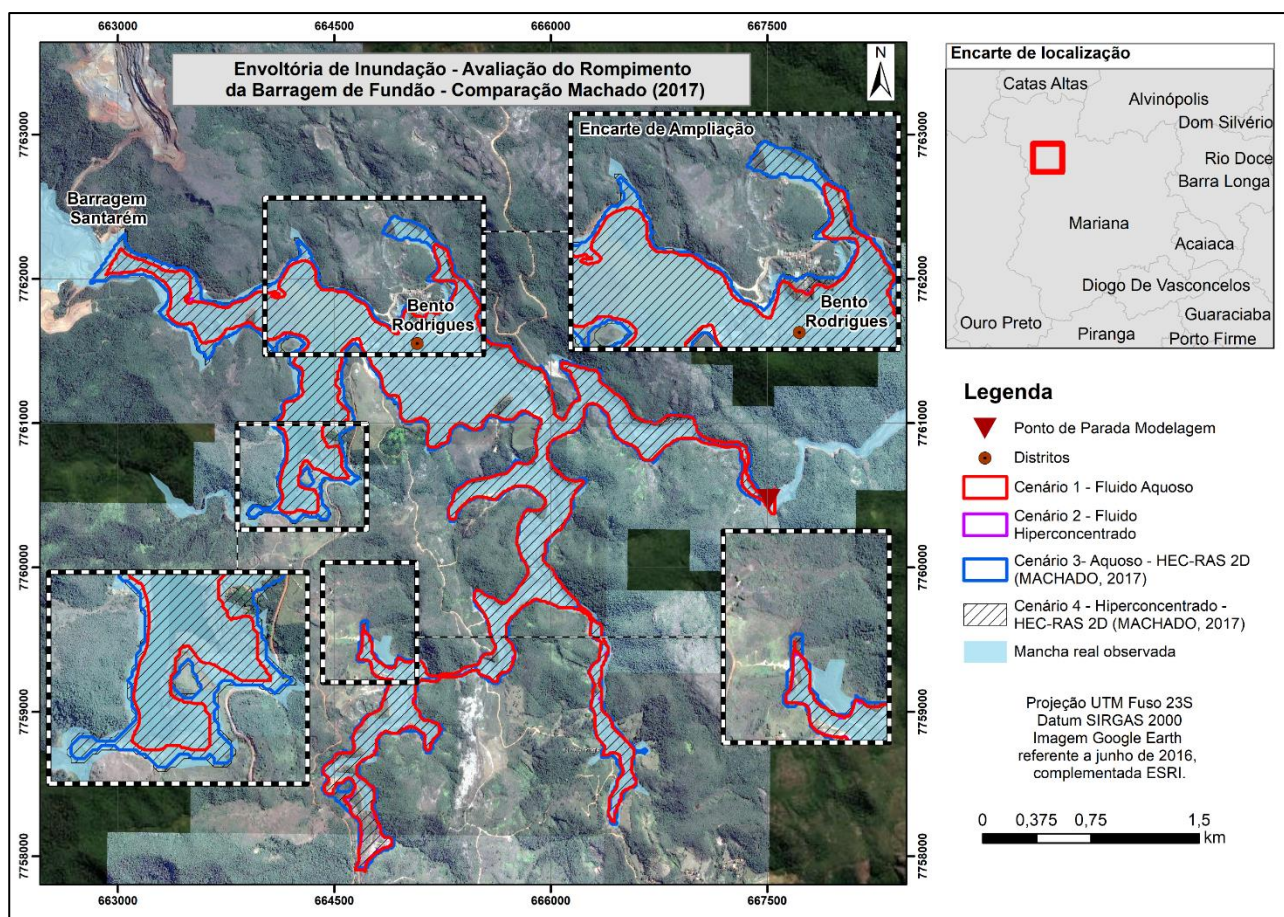


Figura 3 – Mancha de inundação resultante – Avaliação do rompimento da barragem de fundão – Comparação com Machado (2017)

A Figura 4 apresenta, para cada uma das seções indicadas previamente, a profundidade máxima associada. Observa-se que os resultados foram praticamente idênticos em cada uma das seções ao se avaliar o fluido aquoso ou o fluido hiperconcentrado.

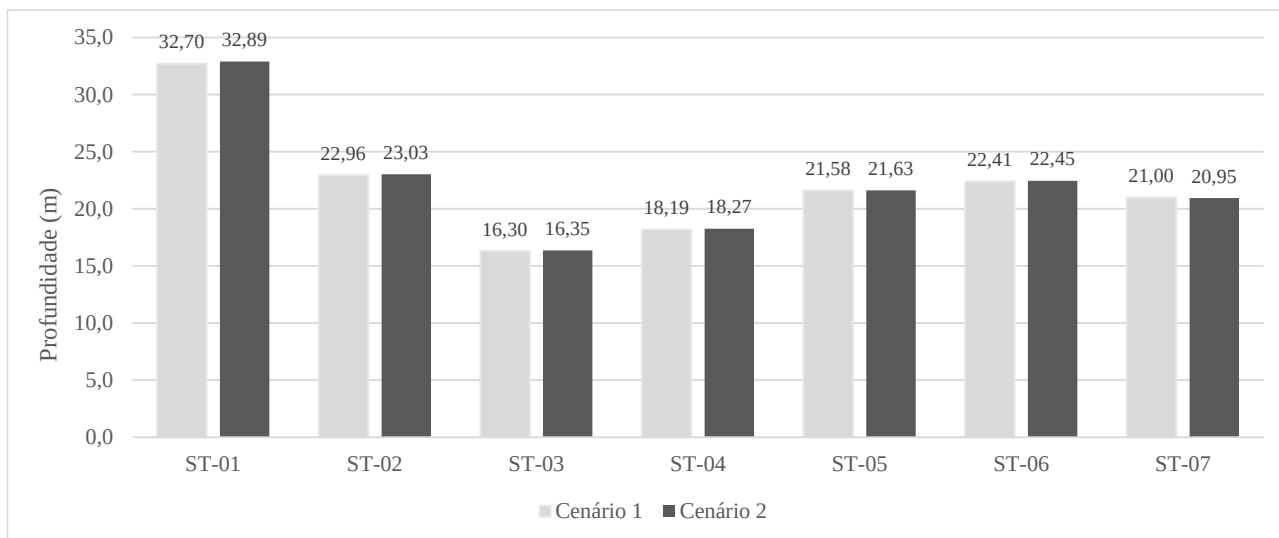


Figura 4 – Avaliação da profundidade (m) ao longo das seções de interesse

A Figura 5 apresenta a variação do perfil da linha de água ao longo do eixo do Córrego Santarém, destacando a localização das 7 seções avaliadas e do subdistrito de Bento Rodrigues. Observa-se que o perfil do terreno apresenta muitas oscilações. O traçado do eixo sobre o rio foi realizado a partir da base topográfica de referência, que possui resolução de 15 m, com auxílio da ferramenta ArcSWAT no ArcGis. Salienta-se que após a utilização desta ferramenta foram ainda realizados, de forma manual, alguns ajustes no traçado do eixo do rio em planta com objetivo de melhorar o perfil de elevações finais do terreno. Destaca-se, entretanto, que existe uma limitação da qualidade da topografia de referência. Trata-se de um SRTM no qual foram inseridas algumas seções topobatimétricas. Desta forma, reforça-se que se trata de uma limitação do dado de entrada.

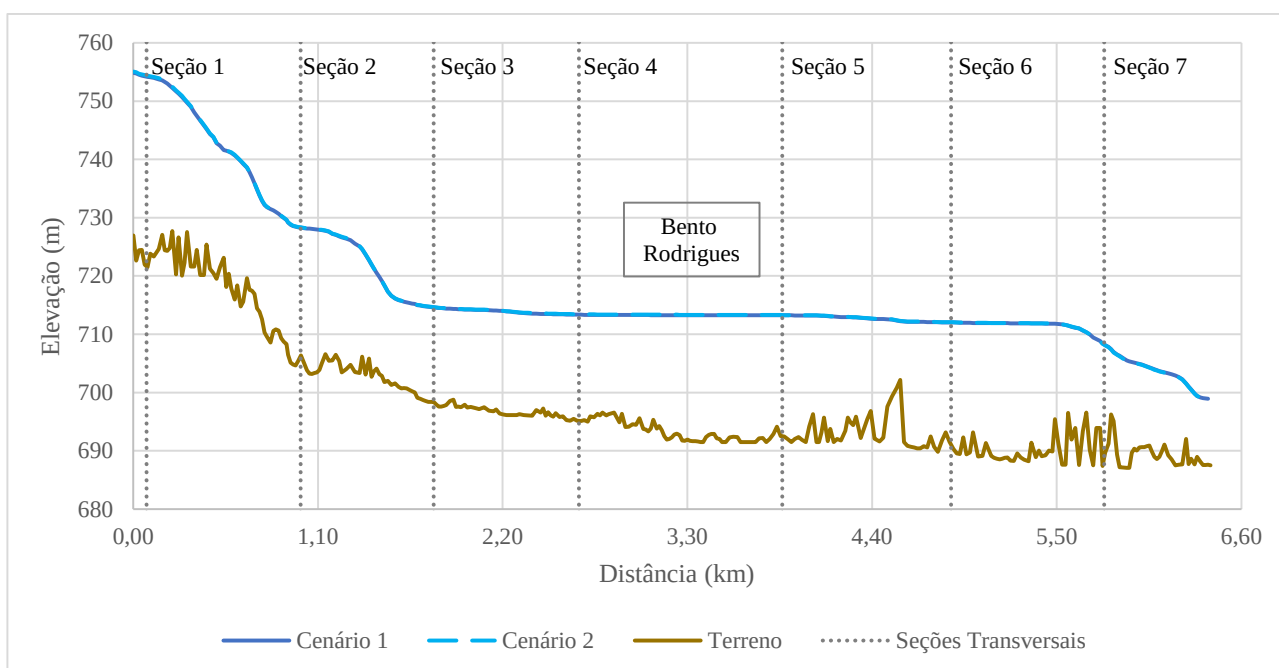


Figura 5 – Avaliação da variação de elevação (m) ao longo das seções de interesse

A atenuação das vazões ao longo das seções de referência pode ser observada a partir dos hidrogramas obtidos em cada uma das seções a uma distância D a jusante da barragem (Figura 6). Os resultados apresentados mostram que os valores máximos dos hidrogramas (Q) em cada uma das 7 seções avaliadas é muito próximo, em especial no trecho inicial. A partir da seção 5, ou seja, após a passagem pelo subdistrito de Bento Rodrigues, observa-se um maior decaimento dos hidrogramas no Cenário 2, com a incorporação da reologia. O tempo para a máxima profundidade, entretanto, é maior no Cenário 2. Estes resultados encontram-se compatíveis aos resultados de Machado (2017), que destaca que nos fluidos com grande carregamento de partículas sólidas, uma menor velocidade observada resulta em um tempo superior para a profundidade máxima.

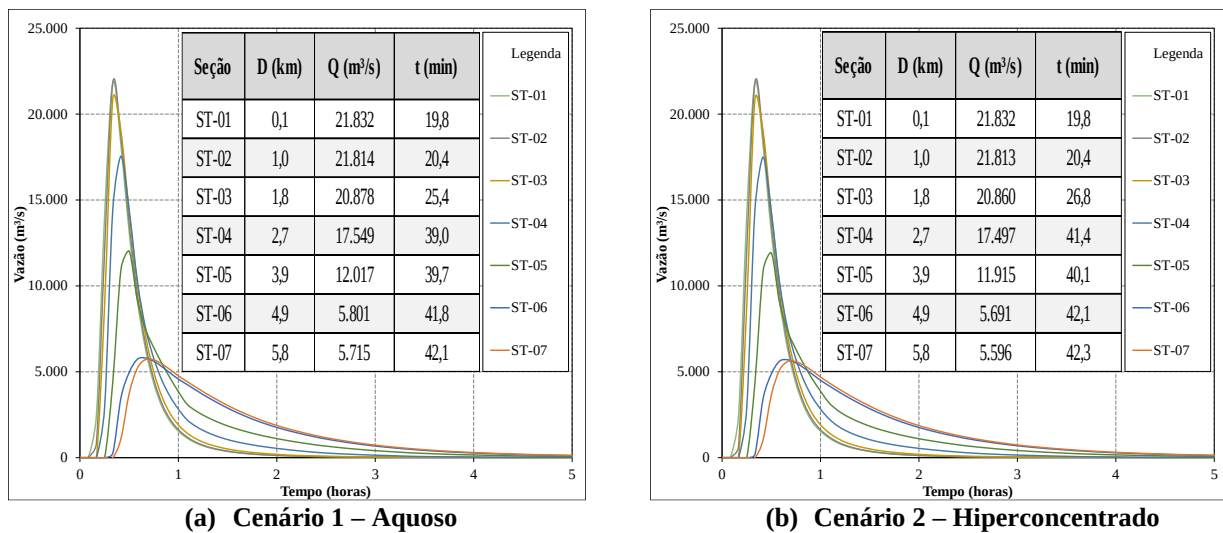


Figura 6 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas

No que tange ao tempo de chegada da frente de onda de ruptura (Figura 7), analisando-se os 2 cenários simulados observa-se que ambos apontaram a faixa de cerca de 30 minutos para a chegada da onda no subdistrito de Bento Rodrigues. Salienta-se que o valor de 30 minutos é importante na análise de um estudo de ruptura, uma vez que, a maior área entre o correspondente aos 30 minutos ou a extensão equivalente a distância de 10 km, configura como a Zona de Autossalvamento (ZAS). Conforme estabelecido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 12.334/2010, alterada pela Lei 14.066/2020), a ZAS configura como o trecho do vale a jusante da barragem em que não existe tempo suficiente para intervenção da autoridade competente em uma emergência. A partir dos estudos de Machado (2017), que realizou entrevistas com moradores e testemunhas do evento, e do relatório de Morgenstern *et al.* (2016), que buscou avaliar em detalhes toda a cronologia do que levou ao evento de ruptura e sua ocorrência, conclui-se que a chegada da frente de onda em Bento Rodrigues em cerca de 30 minutos é coerente ao observado no evento real.

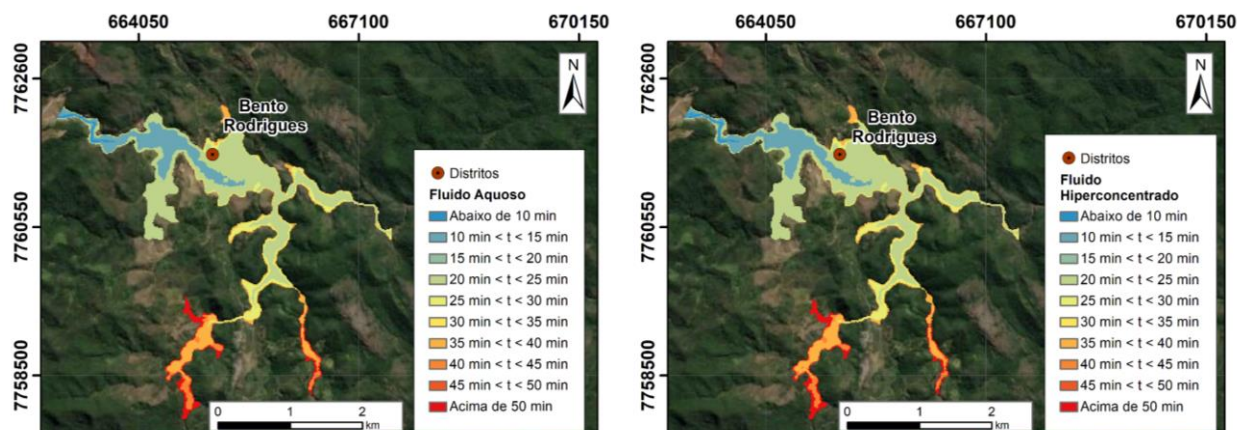


Figura 7 – Mancha de inundação resultante – Avaliação do tempo de chegada da onda (min)

A partir da utilização da matriz da combinação binária (Tabela 1) realizou-se, por fim, a avaliação dos resultados obtidos nos Cenários 1 e 2. Com base na possibilidade de combinações entre observado/previsto e não observado/não previsto, foram determinados os conjuntos A, B, C e D, a partir dos quais é realizado o cálculo dos índices de desempenho F (Tabela 2).

Tabela 1 – Conjuntos de possibilidades – Combinações para a utilização da comparação binária

	Presente na observação	Ausente na observação
Presente no modelo	A	B
Ausente no modelo	C	D

Fonte: Rocha (2015).

Tabela 2 – Indicadores de desempenho binários para utilização em estudos de inundação

Nome	Equação	Intervalo	Comentário
Viés	$\frac{A + B}{A + C}$	$(0, \infty)$ – Igual a 1 para previsão correta	Balanco entre sub e superestimativa inundação
F ² - Índice de Sucesso Crítico	$\frac{A}{A + B + C}$	$(0, 1)$	Ajuste do F ¹ para reduzir a influência do tamanho da área não inundada no domínio
F ³	$\frac{A - C}{A + B + C}$	$(-1, 1)$	Desenvolvido para penalizar a subestimativa da cheia
F ⁴	$\frac{A - B}{A + B + C}$	$(-1, 1)$	Desenvolvido para penalizar a superestimativa da cheia

Fonte: Adaptado de Rocha (2015).

Os resultados encontrados apontam os seguintes valores de referência: 0,865 (viés), 0,709 (F²), 0,501 (F³) e 0,626 (F⁴) para o fluido aquoso e 0,863 (viés), 0,710 (F²), 0,502 (F³) e 0,628 (F⁴) para o fluido hiperconcentrado. Observa-se que os valores estão em todos os casos contidos dentro do intervalo de referência a que o índice se propõe e são muito próximos na comparação entre os cenários 1 e 2. Salienta-se que foi utilizado como referência a delimitação da mancha real realizada e disponibilizada por Silva (2020). A Figura 8 apresenta a exemplificação da combinação binária para o Cenário 1 avaliado, relativo ao fluido aquoso. Procedimento similar foi executado para o Cenário 2, referente ao fluido hiperconcentrado.

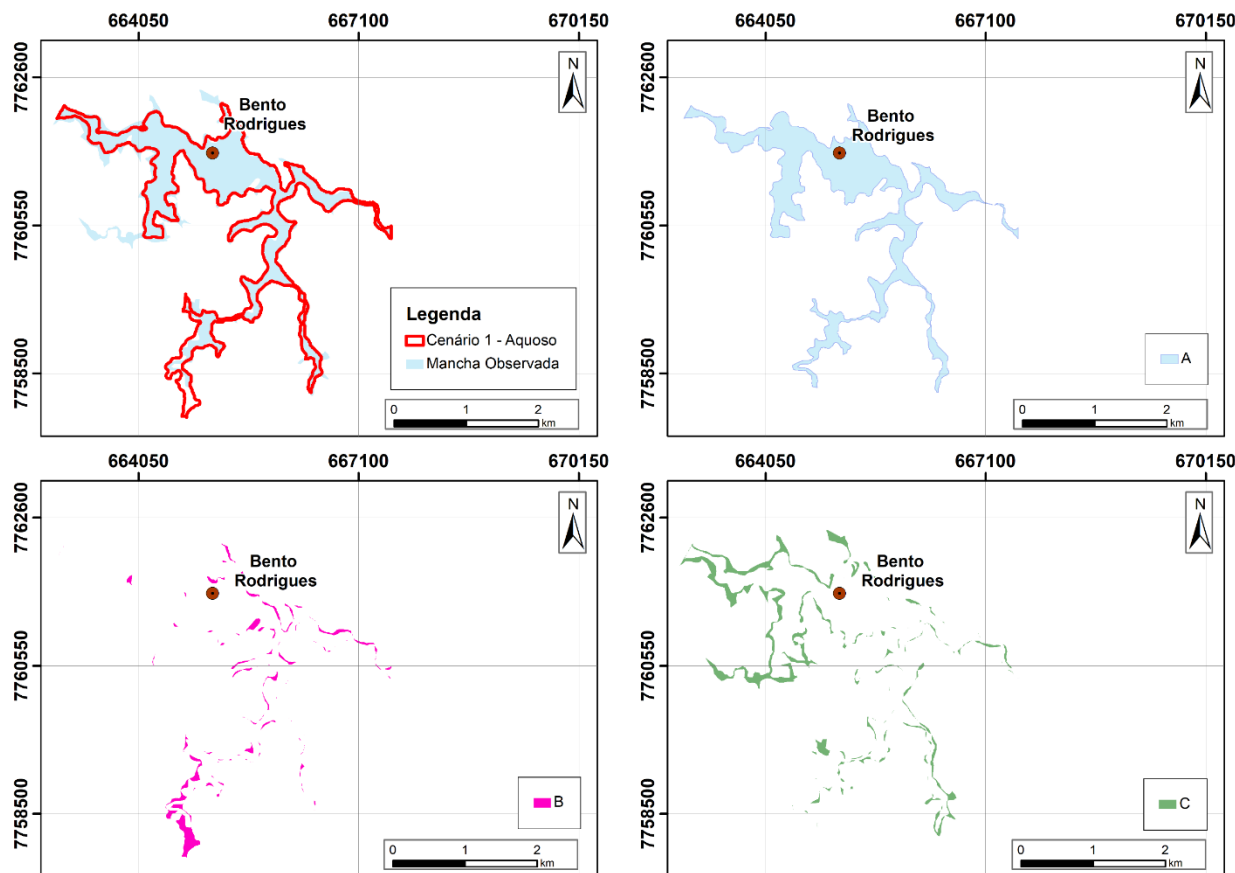


Figura 8 – Combinação e classificação binária – Simulação cenário 1 – Fluido aquoso

CONCLUSÃO

Ao utilizar o software HEC-RAS em sua versão 6.1, na simulação da ruptura da Barragem de Fundão com fluidos hiperconcentrados, os resultados obtidos foram muito próximos àqueles obtidos em um cenário que considera o fluido aquoso, principalmente nas seções mais próximas da barragem.

Essas diferenças pequenas são esperadas, visto que as diferenças na reologia do fluido na concentração simulada devem afetar de forma mais significativa as perdas de carga contínuas, que são melhor percebidas na medida em que se acumulam para jusante. Todavia, à medida que se avança para jusante, outros efeitos, tais como armazenamentos laterais e a existência de seções de controle, também ganham importância e podem mascarar essas diferenças em termos de área atingida. Ainda assim, o compromisso de representar adequadamente o fluido propagado permanece e repercute nos tempos de chegada. Alguns minutos podem ser a diferença entre vida e morte, principalmente Zona de Autossalvamento (ZAS), como ficou claro neste evento.

Neste sentido, destaca-se que o trecho avaliado é curto, contendo apenas cerca de 6,4 km de extensão. Essa é uma limitação do estudo destacada por Machado (2017), que em suas avaliações não

teve acesso a bases topográficas de qualidade e utilizou um STRM. Em trabalhos futuros pretende-se avaliar trechos de mais extensos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei no 12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, 2010.

BRASIL. Lei no 14.066 de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).

MACHADO, N. C. *Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação*. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MORGENSTERN, N. R., VICK, S. G., VIOTTI, C. B., WATTS, B. D. (2016). *Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*, 88 p.

ROCHA, F. F. *Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Miraf, Minas Gerais, Brasil*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

SILVA, A. F. R. *Análise da aplicabilidade de modelos de estimativa de perdas de vidas para inundações provenientes de rupturas de barragens de rejeitos*. 202 f Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

SILVA, D. C. C.; FAIS, L. M. C. F.; FREIRIA, R. C. *Segurança de Barragens: Panorama Histórico da Legislação Brasileira*. Athenas: Revista de Direito, Política e Filosofia, Conselheiro Lafaiete, Ano IX – Vol I, 2020.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS 6.0, *Hydraulic Reference Manual*. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2021.

VENTURA COUNTY WATERSHED PROTECTION DISTRICT; WEST CONSULTAINS. *Sediment/Debris Bulking Factors and Post-fire Hydrology for Ventura-County. Final Report*. Ventura, CA; San Diego, CA: Ventura County Watershed Protection District; WEST Consultains, 184 p. 2011.

VIANINI NETO, L. *Estudo de Ruptura da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da Brecha do Acidente de 1954 e Ruptura Hipotética nas Condições Atuais*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2016.