

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGENS ATRAVÉS DO MODELO NUMÉRICO HISTAV.
CASO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, BRASIL*

DAM-BREAK SIMULATION USING THE NUMERICAL MODEL HISTAV. THE CASE OF FUNDÃO, BRAZIL

Bruna Carolina de Melo Almeida

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Hídrica e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da (Brasil)
ORCID 0000-0003-3716-1759 melobruna03@gmail.com

Aloysio Portugal Maia Saliba

Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil)
ORCID 0000-0002-0149-3295 asaliba@ehr.ufmg.br

Daniel Conde

Instituto Superior Técnico (Portugal)
ORCID 0000-0001-9442-299X daniel.conde@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A mineração é uma atividade essencial para a economia brasileira. Todo o processo de mineração gera, entretanto, rejeitos que são dispostos na grande maioria das vezes em barragens. Essa escolha é pautada em questões essencialmente econômicas. Um dos métodos construtivos mais utilizados para a disposição em barragens de rejeitos no Brasil é o método de montante, como era o caso da Barragem de Fundão, localizada no subdistrito de Bento Rodrigues, Município de Mariana, no Estado de Minas Gerais. Essa barragem sofreu sua ruptura no dia 05 de novembro de 2015, que culminou em cerca de 32 Mm³ de rejeitos propagados pelo vale a jusante. Tal evento causou a destruição de Bento Rodrigues e sérios danos ambientais que se estenderam até a foz do Rio Doce no mar em Regência (no Estado do Espírito Santo - ES). No presente estudo buscou-se avaliar o evento da ruptura da Barragem de Fundão por meio de simulações hidráulicas utilizando o modelo HISTAV e comparou-se os resultados aos obtidos por Machado (2017) em suas simulações com o HEC-RAS. Avaliaram-se questões que perpassam o tempo de chegada da onda, vazões e profundidades máximas atingidas pela onda de ruptura utilizando uma geometria de brecha distinta, essenciais para a elaboração de planos de ação emergencial.

Palavras-chave: Ruptura de barragens, barragem de Fundão, HISTAV, modelos numéricos.

ABSTRACT

Mining is essential to the Brazilian economy. The entire mining process generates tailings, however, that are often disposed of in dams. This choice is based on essentially economic issues. One of the construction methods most often used for disposing of tailings in Brazil is the upstream method, as was the case with the Fundão Dam, located in the Bento Rodrigues district, State of Minas Gerais. This dam suffered a breach on 5 November 2015, culminating in about 32 M.m³ of tailings propagated downstream along the valley. This event destroyed Bento Rodrigues, the local community, and caused serious environmental damage that extended to the mouth of the Doce River. The present study set out to assess the Fundão Dam failure event by means of hydraulic simulations using the HISTAV model, and the results were compared with those obtained by Machado (2017) in his simulations with HEC-RAS. The wave arrival time, flows, and maximum depths reached by the breach wave were evaluated, using a different gap geometry, issues that are essential to devising emergency action plans.

Keywords: Dam breach, Fundão dam, HISTAV, numerical models.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no III Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 07-10-2019, sujeito a revisão por pares a 31-10-2020 e aceite para publicação em 17-12-2020.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 28 (I), 2021, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

O processo de mineração pode ser definido, de acordo com Chammas (1989), como o conjunto de atividades relacionadas à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre, que acarretam grandes transformações ao meio ambiente.

A mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil. Como citado por Albuquerque Filho (2004), qualquer atividade, seja ela de cunho industrial ou agrícola, ou relacionada às áreas metalúrgica, química, da construção civil ou do cultivo da terra, utilizarão necessariamente os minerais lavrados ou os seus respectivos produtos derivados. Tal quadro, somado ao contínuo aumento da população mundial, torna cada vez mais importante um aumento da produção para atender à crescente demanda.

Toda a atividade de mineração gera, entretanto, rejeitos que devem ser dispostos de forma segura e economicamente viável. Este constitui um dos desafios enfrentados na rotina das atividades minerárias. Para a disposição final desses rejeitos, provenientes do processo de beneficiamento do minério, existem diversas soluções possíveis a serem adotadas, cada qual apresentando suas particularidades, vantagens e desvantagens.

Levando em consideração os aspectos citados de segurança e viabilidade econômica, observa-se que a disposição em barragens de rejeitos é uma opção bastante adotada. A título de exemplificação, no caso da construção das barragens de rejeitos no Brasil, três métodos possuem destaque: o método de montante, o método de jusante e o método de linha de centro, que possuem diferentes níveis de riscos. Entender como os materiais se comportam e quais os efeitos que possam vir a decorrer de uma ruptura constitui um aspecto de extrema relevância para escolha da metodologia mais apropriada.

Em vista dessa problemática, o presente estudo se propõe a realizar uma análise da ruptura ocorrida na Barragem de Fundão da mineradora Samarco, no dia 05 de novembro de 2015. O colapso que a barragem sofreu gerou, aproximadamente, 32 Mm³ de rejeitos propagados pelo vale a jusante. Além disso, causou mortes e a destruição do distrito de Bento Rodrigues (Machado, 2017).

A Barragem de Fundão foi construída por meio de um alteamento a montante com a utilização do próprio rejeito, oriundo do processo de beneficiamento do minério de ferro. A causa de sua ruptura foi resultado da liquefação iniciada após alguns tremores de terra na ombreira esquerda da barragem, segundo Machado (2017).

O conhecimento da envoltória de inundação é imprescindível para a classificação e geração de mapas de risco, para o planejamento em situações de emergência,

para a criação do sistema alerta da população a jusante, assim como para a valoração dos dados associados (Machado, 2017).

Como foi enfatizado por Vianna (2015), é muito importante o papel social e econômico das barragens, mas elas possuem um grande potencial de impactar negativamente também, especialmente quando não são adequadamente planejadas, projetadas, construídas, operadas ou mantidas. Os impactos decorrentes de falhas podem ser catastróficos.

No presente estudo aborda-se o rompimento da Barragem de Fundão e todos os aspectos relacionados a esse evento. Em seguida, será realizada uma revisão bibliográfica com base nos autores Machado (2017), Conde *et al.* (2014) e outros. A metodologia utilizada é descrita em seguida e a conclusão analisará os resultados encontrados.

O evento de ruptura da Barragem de Fundão

A Barragem de contenção de rejeitos de Fundão encontrava-se localizada junto ao Complexo Germano da Mineradora Samarco, do qual também fazem parte a Barragem de contenção de rejeitos de Germano e a Barragem de Santarém, uma barragem de água cuja finalidade é controlar o carreamento de sedimentos proveniente das barragens para o córrego a jusante e servir para a captação de água (Machado, 2017). O complexo de Germano está localizado no município de Mariana, estado de Minas Gerais, no Brasil (fig. 1).

A ruptura da Barragem de Fundão ocorreu na tarde do dia 05 de novembro de 2015. Segundo dados divulgados pela Samarco em seu site oficial, a Barragem de Fundão mantinha um volume de rejeitos de aproximadamente 55 milhões de m³, dos quais um total 32,6 milhões de m³ desceu de Fundão. Esse acidente causou 18 mortes e o desaparecimento de uma pessoa, entre membros da comunidade e empregados da Samarco e de empresas contratadas.

As descrições e vídeos de testemunhas oculares foram indispensáveis para estabelecer vários pontos. O primeiro é o local de ruptura da barragem, sendo a falha iniciada na ombreira esquerda e não no lado direito ou o pé do talude de jusante. O segundo diz respeito ao motivo da ocorrência da falha, que se deu devido ao fluxo de liquefação de rejeitos, processo no qual as poropressões entre as partículas de rejeito aumentaram de tal forma que a massa de material perdeu resistência e passou a se comportar como um fluido. O terceiro e último ponto refere-se à transformação abrupta e completa de sólido para líquido, fazendo com que um fluido apresentasse viscosidade aparente e comportamento hidráulico pouco diferente da água em apenas alguns segundos (Morgenstern *et al.*, 2016).

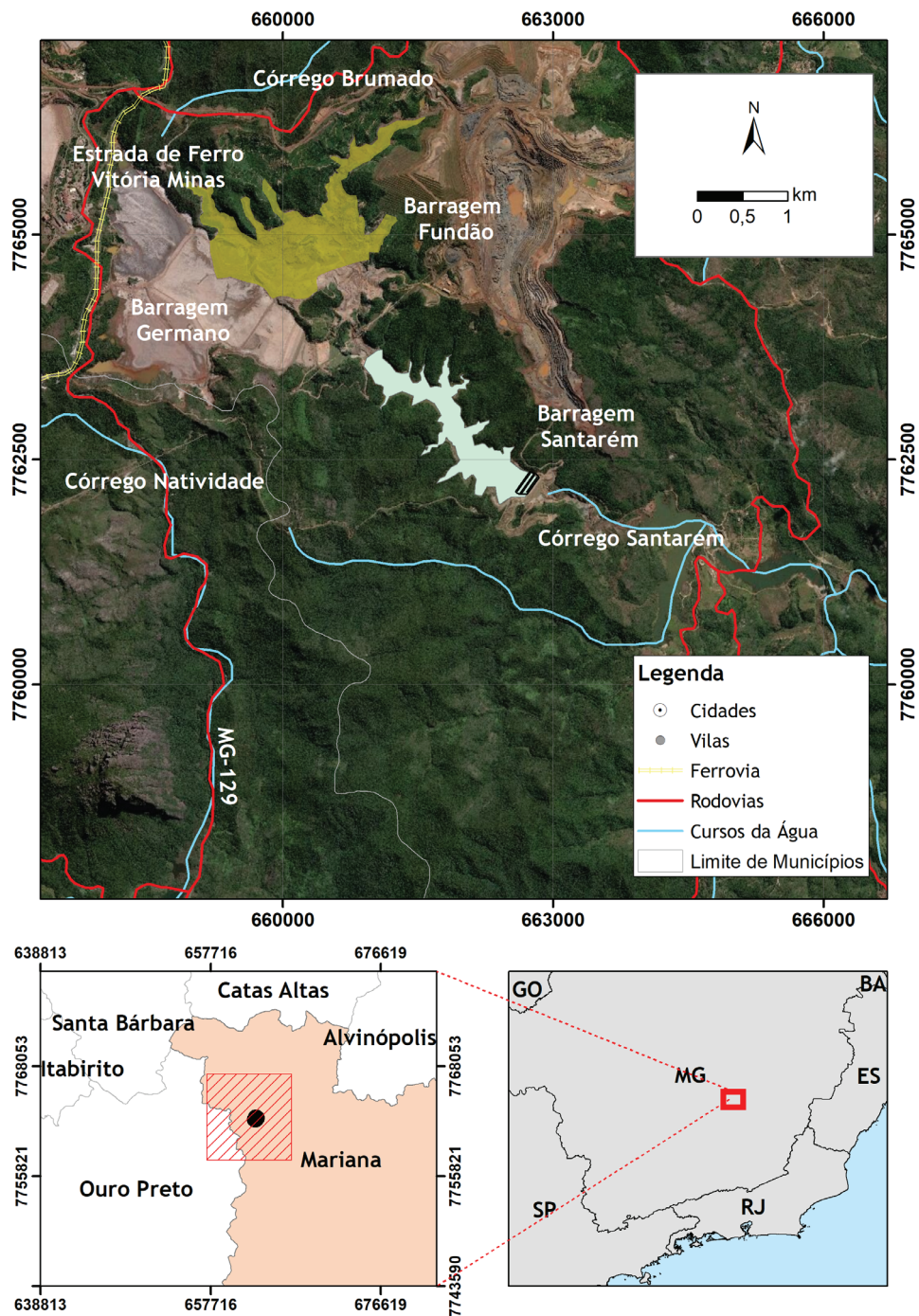


Fig. 1 - Localização da Barragem de Fundão (Fonte: Adaptado de Machado, 2017).

Fig. 1 - Location of Fundão Dam (Source: Adapted from Machado, 2017).

Os rejeitos provenientes da ruptura de Fundão galgaram a Barragem de Santarém, que foi responsável por reter parte dos sedimentos. Esse evento causou erosão parcial no maciço e danos na parte da estrutura de Santarém, mas não rompeu esta barragem. Posteriormente, a fração remanescente do material atingiu o distrito de Bento Rodrigues, localizado a 8 km de distância da estrutura de Fundão (SAMARCO, 2019).

O foco neste trabalho será analisar, como previamente citado, os aspectos que tangem à propagação desse material desprendido da Barragem de Fundão pelo vale à jusante.

Modelos Numéricos

Para o presente estudo serão utilizados os modelos hidráulicos HISTAV e HEC-RAS. A simulação desenvolvida será

realizada através do HISTAV e os resultados obtidos serão comparados aos encontrados por Machado (2017) utilizando o *software* HEC-RAS. Nos itens a seguir é feita uma descrição das principais características desses programas.

O modelo HISTAV

O modelo HISTAV, montado pelo CERIS-IST, é uma ferramenta de simulação que se baseia em um solucionador de fluxo superficial (Euleriano) adequado para limites de fundo complexos e dinâmicos. Para a técnica de discretização é necessário que seja realizada a determinação de um esquema de volumes finitos, baseado em uma técnica de divisão de fluxo incorporando uma versão revisada do solucionador de Roe Riemann (Conde *et al.*, 2013).

Para modelar a advecção de detritos no HISTAV utilizou-se duas formulações: uma abordagem contínua, na qual corpos sólidos são descritos apenas pela concentração e uma segunda formulação de material desacoplado (Lagrangeano), onde corpos sólidos são rastreados entre tempos de parada, uma vez que o campo de fluxo é determinado pelo solucionador Euleriano (Conde *et al.*, 2014).

O modelo conceitual do programa é baseado nas equações de águas rasas, apresentando geometrias de leito dinâmico e transporte de sedimentos. É através de um desequilíbrio entre a descarga da carga do leito de capacidade e a descarga sólida local, que as alterações morfológicas são modeladas com auxílio de uma equação de conservação do material do leito. A técnica de discretização é baseada na abordagem dos volumes finitos, sendo as soluções fornecidas para problemas iniciais e de valor limite totalmente conservadoras.

Tal modelo tem sido aplicado continuamente para realizar a simulação de cenários de *tsunamis* em locais chave da costa portuguesa.

HEC-RAS

O HEC-RAS é um *software* desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), sendo um *software* de livre acesso. Ele é um modelo hidráulico que se baseia nos fluidos newtonianos. Em sua formulação bidimensional, o programa utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações de Saint-Venant, para uma certa geometria e condições iniciais e de contorno. Levando em consideração que o fluido utilizado no presente estudo é um fluido não-newtoniano, é necessária a realização de ajustes nos parâmetros hidráulicos inseridos no modelo.

Uma das principais dificuldades em se utilizar o modelo HEC-RAS, para modelar escoamentos hiperconcentrados, consiste no fato de que suas equações são propostas para fluidos com baixa concentração de sedimentos,

com comportamento semelhante à água. Além disso, os fluxos hiperconcentrados não são frequentemente caracterizados por viscosidade e densidade constantes (Machado, 2017).

O HEC-RAS é bastante consolidado em território brasileiro e utilizado para diversos estudos de ruptura hipotética de barragens (*Dam Break*) em função da fácil obtenção e representatividade para os casos de estudos realizados.

Avaliação dos Modelos Hidráulicos

Segundo Toombes (2014), não importa o quão complexo sejam os modelos numéricos desenvolvidos, nenhum programador possui total confiança nos resultados encontrados. Existe, por parte deles, uma tendência a dar ênfase em resultados provenientes de modelos físicos. O autor ressalta ainda, no entanto, que estes modelos também não são perfeitos. Existem diversos erros associados, como os oriundos dos processos de construção.

É evidente, dessa forma, que por mais que os erros de modelagem sejam minimizados, sempre existirão incertezas no projeto do sistema hidráulico, mas a análise individual de cada situação deve ser realizada uma vez que atenção tão excessiva dos detalhes pode se mostrar desnecessária e uma aproximação razoável atende ao estudo proposto (Toombes, 2014).

Machado (2017), cita que, de maneira usual, utiliza-se a análise visual da imagem observada através de satélites dos eventos ocorridos, para a avaliação do desempenho do modelo hidráulico, por meio de comparações com o resultado que é gerado no modelo de simulação.

Metodologia

Para o presente estudo será analisado um cenário de ruptura através do programa HISTAV. O resultado gerado por essa simulação será comparado com aquele obtido por Machado (2017) ao simular diferentes cenários utilizando o HEC-RAS. As etapas definidas para a elaboração do estudo estão indicadas a seguir.

- a) Definição das variáveis de entrada: hidrograma de ruptura, características geotécnicas e reológicas do rejeito e topografia;
- b) Propagação da onda de cheia: modelagem hidráulica computacional no HISTAV 2D;
- c) Mapeamento da inundação potencial: construção dos mapas contendo as manchas de inundação;
- d) Análise dos resultados obtidos.

Para a modelagem realizada através do HEC-RAS, Machado (2017) destaca a possibilidade de que se processe uma modelagem hidrodinâmica Newtoniana, unidimensional ou bidimensional, com um escoamento não-permanente.

Machado (2017) evidencia ainda a possibilidade de ajustes nos parâmetros hidráulicos durante a modelagem no HEC-RAS, permitindo a simulação para fluidos hiperconcentrados e possibilitando, portanto, a comparação entre seus dois cenários de estudo: uma de fluidos Newtonianos (com as características similares às da água) e uma de fluidos não Newtonianos (referindo-se ao escoamento dos hiperconcentrados).

Destaca-se, no entanto, que tais ajustes sugeridos na simulação de fluidos hiperconcentrados no HEC RAS referem-se à uma tentativa de agregar aos dados processados pelo *software* as características que os fluidos não-Newtonianos apresentariam. Isso decorre do fato de sua modelagem ser baseada no escoamento de fluidos Newtonianos e, portanto, não representar de forma satisfatória o comportamento que o material desprendido da barragem apresentaria ao escoar pelo vale à jusante.

Já para o modelo HISTAV verifica-se a possibilidade de inserção direta dos fluidos não-Newtonianos, que correspondem aos fluidos cujas características se assemelham ao rejeito desprendido da Barragem de Fundão, para uma avaliação bidimensional.

A definição dos parâmetros de entrada é o primeiro passo para a realização do estudo. Para a simulação através do HISTAV é necessária a inserção no Modelo Digital de Elevação (MDE) de todas as obras hidráulicas que venham a impactar a propagação da onda de cheia.

Dessa forma, a partir da determinação da topografia a ser utilizada, analisa-se a propagação da onda de cheia e, posteriormente, a partir das manchas de inundação, geram-se os mapas de inundação e é possível efetuar a comparação dos resultados observados.

Os principais parâmetros avaliados através do HISTAV foram o tempo máximo de chegada da onda e as profundidades e vazões máximas da inundação. Os resultados são gerados em formato raster e, por serem georreferenciados, possibilitam a sobreposição da mancha com a imagem de satélite que retrata o objeto de interesse.

Hidrograma de Ruptura

Diferentemente da abordagem de determinação do hidrograma de ruptura para a simulação pelo HEC-RAS, utiliza-se para a simulação por meio do HISTAV a modelagem do reservatório. Nesse caso, ao invés de impor uma condição de montante e forçar o volume que saiu do reservatório no momento da ruptura, determina-se a estrutura da barragem e o tamanho da brecha de ruptura. O estudo é, portanto, baseado numa equação de soleira espessa para a brecha e a modelagem se refere ao esvaziamento do reservatório.

Para a realização da simulação insere-se a batimetria da barragem e determina-se a cota em que se encontra o reservatório da barragem. Impõe-se uma condição inicial e não de fronteira, e a partir disso tem-se uma massa de rejeitos que irá escoar.

É necessário a determinação do local no qual ocorreu o rompimento da barragem e a determinação da largura da brecha de ruptura. O colapso ocorreu na ombreira esquerda da estrutura e, de posse dessa informação, utilizou-se o *Google Earth* para medir aproximadamente a largura da brecha. O valor encontrado e adotado foi de 220 metros.

Características geotécnicas

Machado (2017) enfatiza a importância da caracterização geotécnica dos materiais para garantir que o que é inserido nos modelos hidráulicos é compatível ao material proveniente da Barragem de Fundão. Machado (2017), frisa ainda que a avaliação de diferentes amostras permite perceber as variações físico/químicas que podem ocorrer ao longo da propagação do material pelo vale à jusante. Os resultados de Machado (2017), que tangem à caracterização geotécnica e reológica, foram elaborados a partir de três amostras coletadas em diferentes pontos pelos quais passou a onda de cheia a jusante da barragem.

Para o desenvolvimento do estudo com o HISTAV tais dados referentes às características geotécnicas, como o peso específico e o teor de matéria orgânica de cada amostra encontrados por Machado (2017), não foram levados em consideração.

Esses dados são essenciais para a realização de um estudo acerca do transporte de sedimentos, mas esta vertente não foi explorada nesse trabalho. A abordagem adotada no presente estudo incorporou o essencial à reologia e partiu do pressuposto que o fluido tem reologia de mistura e o fundo permanece inalterado, ou seja, não há deposição de materiais ao longo da calha dos rios e nem uma mistura do rejeito com os materiais da calha. Embora não seja a representação exata do fenômeno real, essa premissa foi adotada com o intuito de simplificar o estudo.

O dado incorporado de característica geotécnica corresponde à densidade real dos grãos, no valor de $3,30 \text{ g/cm}^3$.

Características reológicas dos rejeitos

Machado (2017) realizou, a partir das três amostras coletadas, ensaios de reologia dos rejeitos, nos quais adotou três metodologias: reômetro rotacional com palheta coaxial, reômetro rotacional cilindro concêntrico e teste de *slump*.

Para cada uma das metodologias adotadas e utilizando diferentes valores de concentrações em massa (C_w) e volumétricas (C_v), a autora encontrou vários valores para os parâmetros de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidade (η).

Para o presente estudo foram adotados os seguintes valores médios a partir dos resultados gerais de Machado (2017): 0,15 Pa.s para a viscosidade e 45 Pa para a tensão de escoamento.

Topografia

Para a elaboração do MDE (Modelo Digital de Elevação) utilizado na simulação do presente estudo, por meio do HISTAV, optou-se pela união do MDE disponibilizado por Machado (2017) e pelo disponibilizado por Matos (2018).

Este primeiro foi obtido através do site Earth Explorer, sendo uma base gratuita procedente da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), que corresponde a uma técnica de interferometria por radar e possui uma resolução de 30 metros, ao passo que o segundo foi obtido através do Alos Palsar e possui uma resolução de 12,5 metros.

Essa opção foi adotada por ser avaliada a mais pertinente para o estudo. Considerando-se a comparação dos resultados obtidos pelo HISTAV aos do HEC-RAS elaborados por Machado (2017), utilizar uma base topográfica mais similar faria com que os erros provenientes de diferentes condições do terreno fossem minimizados. Além disso, Machado (2017) realizou a calibração do canal por meio de seções topobatimétricas obtidas através de um estudo da Pimenta de Ávila (2008). A junção com Matos (2018) ocorreu face à decisão de realizar a simulação desde a Barragem de Fundão, diferentemente de Machado (2017), que inicia sua simulação na Barragem de Santarém.

Dessa forma, complementou-se a área de Machado (2017) com a de Matos (2018) e, em seguida, interpolou-se o MDE para células de 5 metros. Observou-se que nas áreas de interseção entre os dois MDEs a interpolação apresentou um comportamento inadequado e, nesses locais, foram realizados alguns ajustes de forma manual.

Simulação Hidráulica

As simulações realizadas por Machado (2017) utilizando o HEC-RAS (TABELA I) serviram para a autora simular quatro diferentes cenários variando modelagem 1D e 2D e fluidos aquosos e hiperconcentrados. Sua simulação compreendeu a área a jusante da Barragem de Santarém.

Para a realização do estudo de ruptura de uma barragem é necessário que se determinem as condições de

TABELA I - Cenários simulados por Machado (2017) para o HEC-RAS.

TABLE I - Scenarios simulated by Machado (2017) for HEC-RAS.

Cenário	Tipo de simulação/Grid (m)	Tipo de Fluido
1	1D	Aquoso
2		Hiperconcentrado
3	2D/15m	Aquoso
4		Hiperconcentrado

Fonte/Source: Adaptado de/Adapted from Machado, 2017.

contorno. No caso das condições de contorno a montante na simulação com o HISTAV observa-se que não há uma condição determinada, existe o reservatório.

Já as condições de contorno de jusante equivalem ao gradiente zero, sendo uma condição passiva, ou seja, o escoamento é livre para sair além da malha do domínio estabelecido para o cálculo.

O modelo não sofre instabilidades e nem são necessários ajustes em relação ao intervalo de tempo da modelagem, que utiliza um método de cálculo explícito e dinâmico. Esse intervalo de tempo é calculado internamente pelo próprio modelo e não é um parâmetro imposto pelo usuário.

Resultados e discussão

Após a realização das etapas metodológicas referentes à definição das variáveis de entrada (hidrograma de ruptura, características geotécnicas e reológicas dos rejeitos e topografia) e à propagação da onda de cheia (modelagem hidráulica computacional através do HISTAV 2D), foi possível realizar o mapeamento da inundação potencial a partir da geração dos mapas contendo as manchas de inundação.

Os resultados foram representados em mapas contendo as manchas de inundação referentes ao tempo de propagação, profundidade máxima atingida e a vazão ao longo da mancha de inundação (figs. 2 a 4). Para a elaboração dos mapas que apresentam os resultados encontrados com a simulação do modelo numérico HISTAV, optou-se por utilizar uma escala de cores variando do valor mínimo ao valor máximo apresentado. Priorizou-se essa abordagem pela sua apresentação visual e facilidade de identificação dos padrões.

A primeira análise dos resultados obtidos através do HISTAV é relacionada ao tempo de propagação da mancha de inundação (fig. 2), na qual é possível perceber que a área correspondente ao tempo de chegada da onda de aproximadamente 30 minutos está localizada em Bento Rodrigues. Segundo definição da ANM (Agência Nacional de Mineração), em sua resolução N° 04/2019, a ZAS (Zona de Autossalvamento) corresponde a região

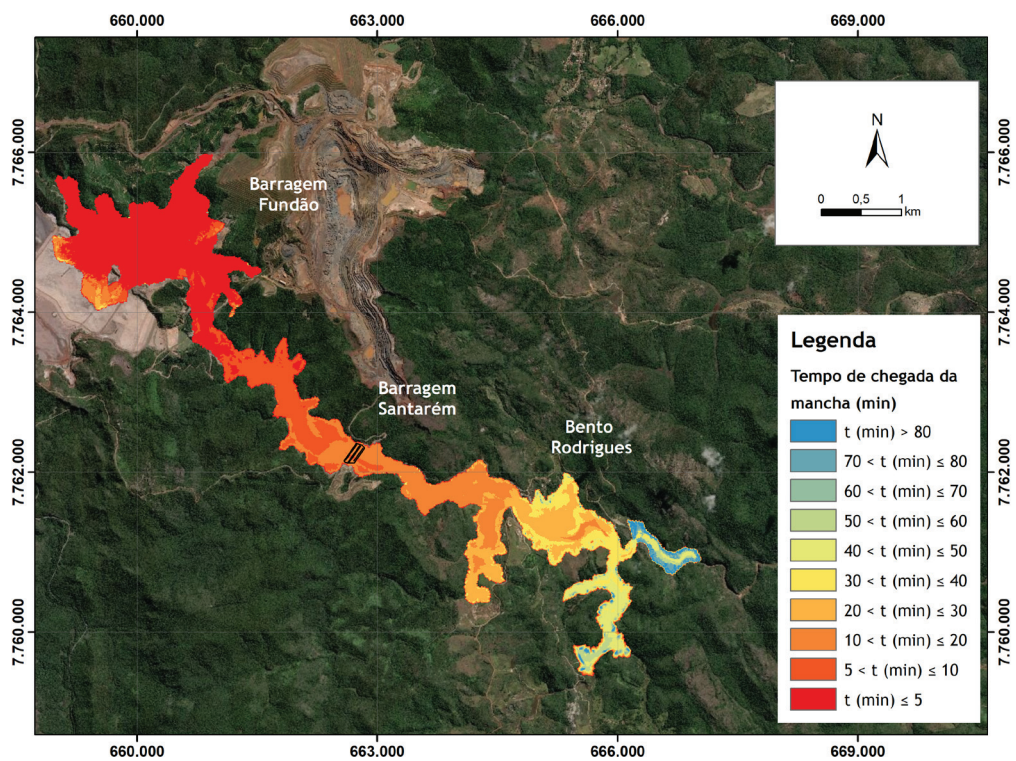


Fig. 2 - Tempo de propagação da mancha de inundação pelo Modelo HISTAV.

Fig. 2 - Flooding time along modelled domain using HISTAV Model.

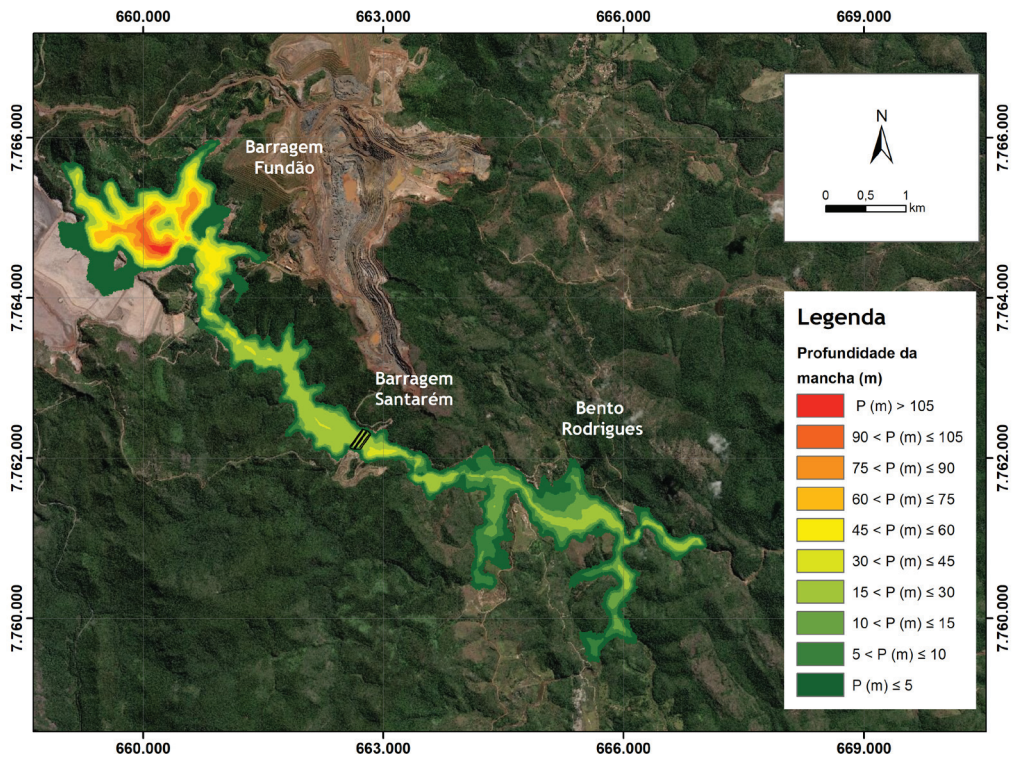


Fig. 3 - Profundidade da mancha de inundação pelo Modelo HISTAV.

Fig. 3 - Maximum flow depth along modelled domain using HISTAV Model.

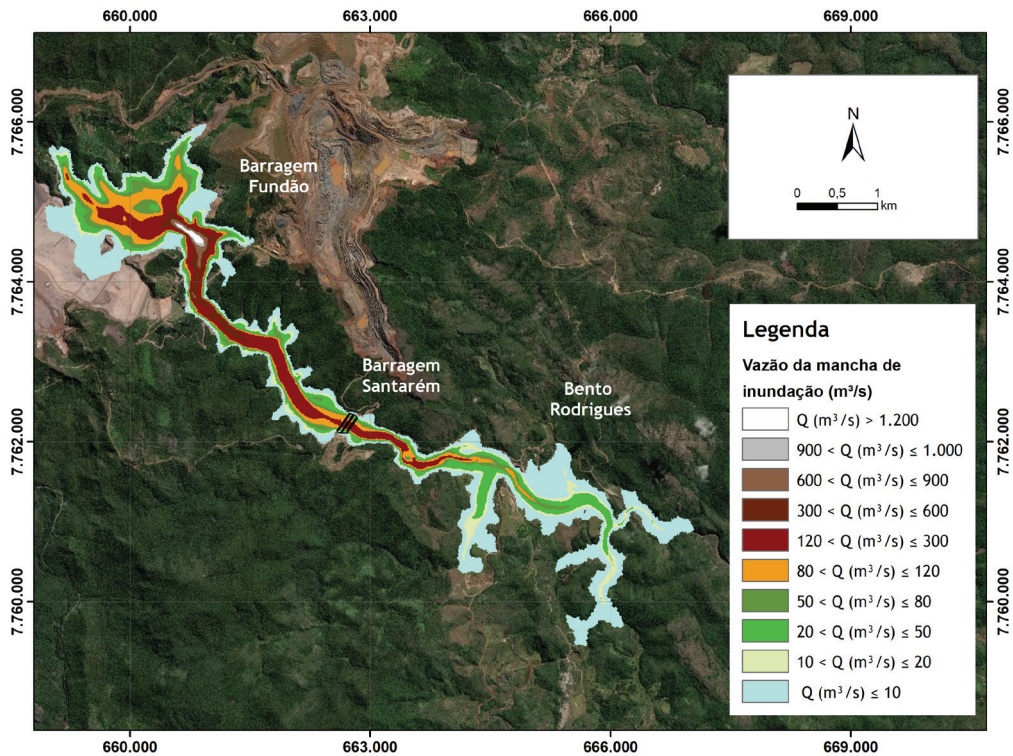


Fig. 4 - Vazão da mancha de inundação pelo Modelo HISTAV.

Fig. 4 - Maximum flow along modelled domain using HISTAV Model.

a jusante da barragem, na qual não existe tempo suficiente para a realização de uma intervenção das autoridades competentes no caso de um acidente. Para sua delimitação adota-se a maior das seguintes distâncias: aquela que corresponde a um tempo de chegada da onda de inundação de 30 minutos ou a distância de 10 km. Considerando-se que a distância de Bento Rodrigues até a estrutura de Fundão é de cerca de

8 km, observa-se que toda essa área ao redor do distrito era parte da Zona de Autossalvamento (ZAS). Machado (2017), concluiu, a partir de entrevistas com moradores locais e testemunhas do evento e dos dados disponíveis no relatório da ruptura elaborado por Morgenstern *et al.* (2016), que a onda atingiu Bento Rodrigues em menos de 30 minutos, o que é, portanto, compatível ao resultado encontrado mediante a utilização do HISTAV.

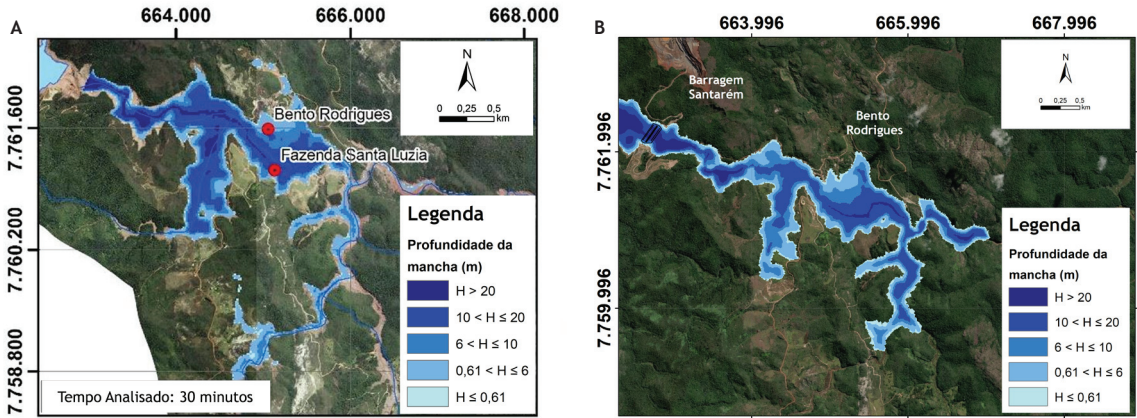


Fig. 5 - Comparação entre os valores de profundidades obtidos por Machado, 2017 (a); e pelo Modelo HISTAV (b).

Fig. 5 - Comparison between depth values obtained by Machado, 2017 (a); and using HISTAV Model (b).

A comparação das profundidades foi realizada através das imagens (fig. 5), que mostra o resultado de Machado (2017) e o mapa elaborado na mesma escala de cores resultante do HISTAV.

Através de uma análise visual é possível perceber que ambos resultados são bastante similares. Observam-se locais com profundidades maiores que 20 metros apenas em alguns pontos ao longo da calha do rio. A maior parte da área possui profundidades variando na faixa de 10 a 20 metros e os valores vão diminuindo à medida que se aproxima das bordas da mancha de inundação, constatando-se os valores mais próximos de zero.

A última comparação no que tange ao parâmetro de profundidade foi em relação às profundidades máximas. Machado (2017) encontrou valores que variaram de 25 a cerca de 45 metros em sua área de análise. Analisando-se os valores destacados (fig. 6), é possível verificar que os valores máximos de profundidade apontados pelo HISTAV variam de cerca de 25 metros (destacado em vermelho) até cerca de 40 metros (destacado em azul). Tais dados são consistentes pois estão localizados no trecho de calha do rio e no trecho percorrido pela mancha de inundação logo após galgar Santarém, respectivamente, e, portanto, representam os pontos para os quais esperava-se uma maior profundidade

Logo, a partir dos dados aqui apresentados e discutidos, é possível constatar que tanto os dados referentes ao tempo de chegada da onda, quanto os dados referentes à profundidade, foram bastante análogos com a utilização dos diferentes modelos hidráulicos.

O último componente a ser avaliado foi a vazão, que é apresentada de forma geral (fig. 4). Com intuito de comparar as vazões obtidas partiu-se de um dos quatro hidrogramas elaborados por Machado (2017) ao considerar diferentes seções à jusante da Barragem de Santarém. Utilizou-se a seção cuja localização era a mais próxima de Santarém e, consequentemente, representava o hidrograma com os maiores valores de vazões de pico. A seção do hidrograma escolhido está localizada a 0,46 km de uma seção chamada pela autora de ST-1 e apresentava uma vazão de pico de 22.000 m³/s.

Como o resultado de Machado (2017) foi medido em um ponto a 0,46 km da sua seção ST-1, que estava um pouco à jusante de Santarém, não foi possível determinar o local exato no qual ela retirou seus dados. Em função disso, aproximou-se o ponto pela distância de 0,50 km do eixo da Barragem de Santarém (Seção S2) e mediu-se também 50 m antes (Seção S1) e 50 m depois (Seção S3), totalizando 3 seções.

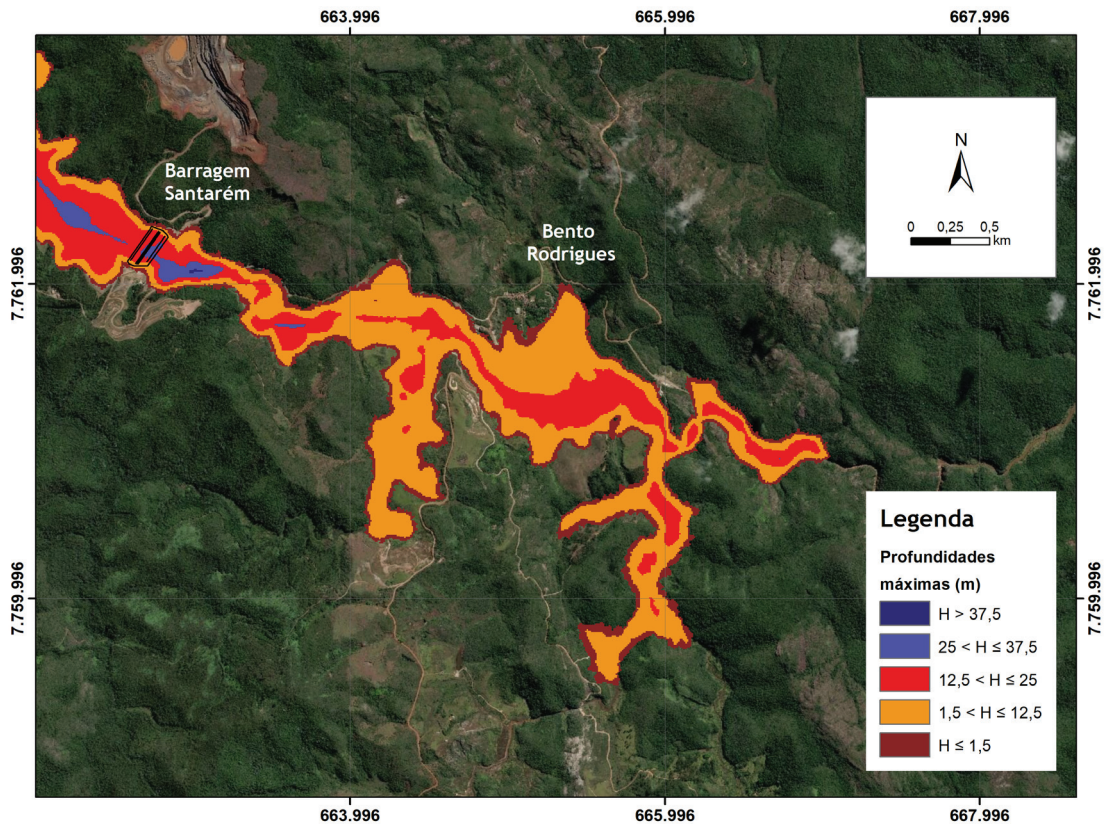


Fig. 6 - Profundidades máximas encontradas pelo Modelo HISTAV.

Fig. 6 - Maximum depths found using HISTAV Model.

Os resultados obtidos foram: para S1 um valor de 2.062 m³/s, para a seção S2 um valor de 1.934 m³/s e para a seção S3 um valor de 1.752 m³/s. Observa-se que esses valores estão muito diferentes dos obtidos por Machado (2017) que, como citado, estavam na faixa de 22.000 m³/s. Uma das possíveis causas dessa divergência pode ter relação com o tamanho da brecha de ruptura adotada, pois este é um parâmetro determinante para os valores de vazão calculados pelo modelo correspondente. Diferentes valores adotados podem ocasionar erros de ordens de grandeza nos valores de vazões encontrados, como foi o caso presente que apresentou uma diferença de 10 vezes. Na análise realizada com o HISTAV adotou-se uma brecha de 220 m de largura total na crista, enquanto Machado (2017) admitiu uma brecha com cerca de 700 m na crista. Este resultado evidencia a importância do estudo prévio acerca da geometria e parâmetros de formação da brecha, e sua influência nos resultados obtidos em estudos de ruptura. Este é um tema de pesquisa corrente dos autores (Saliba, 2009; Campos et. al., 2018; Almeida, 2019).

A análise da mancha gerada pelo modelo numérico estudado com a mancha real foi a próxima análise do estudo. Com a utilização de uma imagem disponível no

Google Earth, de 09 de novembro de 2015 (data mais próxima ao acidente na qual é nítida a visualização da mancha de inundação ocasionada pela ruptura), elaborou-se o seguinte mapa que compara a mancha real do evento com aquela que foi obtida através da simulação numérica. O mapa elaborado mostra que o resultado encontrado mediante a utilização do HISTAV foi bastante consistente e fidedigno a mancha real (fig. 7).

Por fim, elaborou-se um mapa contendo as manchas obtidas pelo HISTAV e pelo HEC-RAS, com objetivo de avaliar a proximidade dos resultados de forma mais apropriada (fig. 8).

Observa-se que, embora os contornos tenham se mostrados bem próximos, nas áreas correspondentes às pontas da mancha os resultados obtidos pelo HEC-RAS estenderam a mancha bem mais a jusante que as obtidas através do HISTAV. Também na região do distrito de Bento Rodrigues a abrangência através dos cenários simulados pelo HEC-RAS foi mais ampla em termos de área do que aquela encontrada pelo HISTAV. Essa diferença provavelmente também é um resultado das diferentes vazões encontradas em função dos diferentes valores de brecha de ruptura adotados e evidencia a importância do parâmetro.

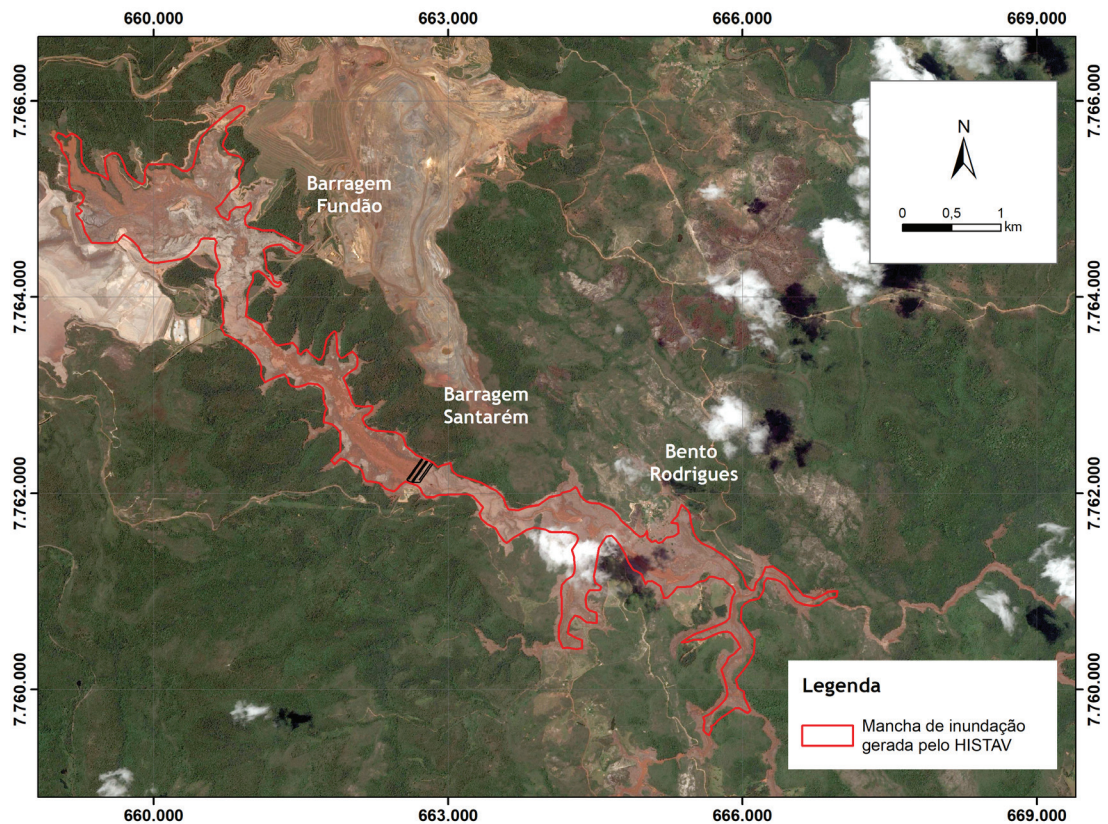


Fig. 7 - Comparação entre a mancha real do evento e o resultado gerado pelo HISTAV.

Fig. 7 - Comparison between the actual site of the event and the result generated using HISTAV.

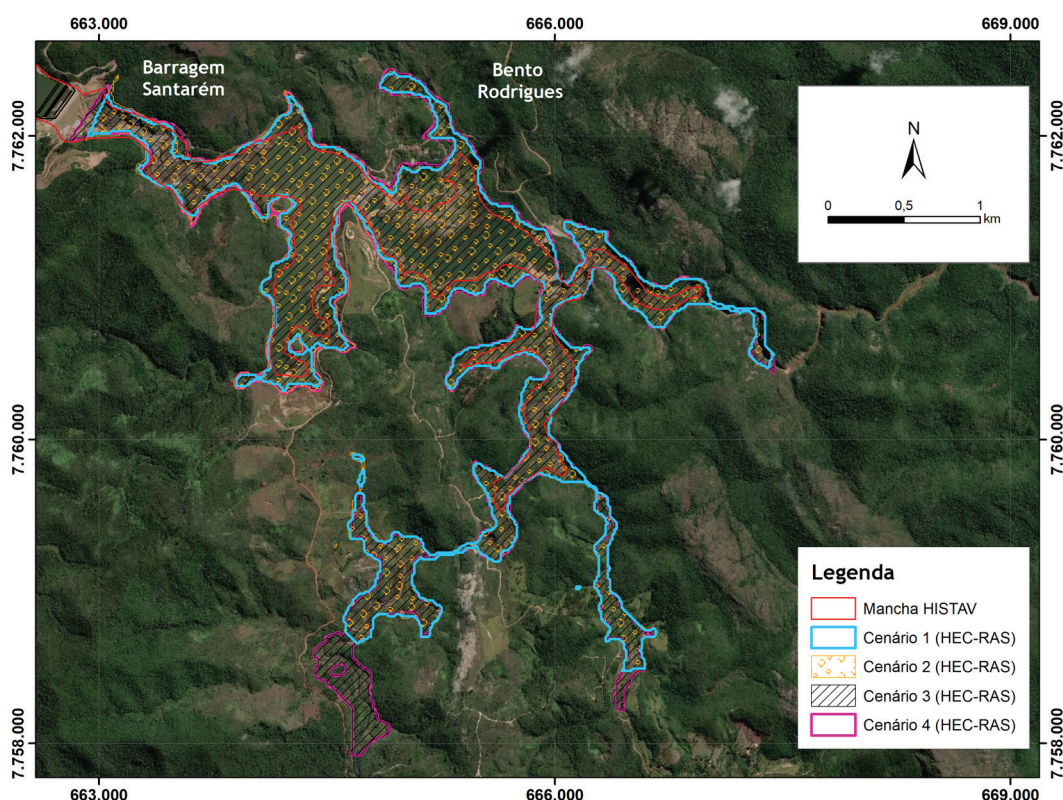


Fig. 8 - Mapa contendo as manchas resultantes do HISTAV e dos 4 cenários simulados por Machado (2017) no HEC-RAS.

Fig. 8 - Map containing the sites resulting from HISTAV and the 4 scenarios simulated by Machado (2017) in HEC-RAS.

Conclusão

O objetivo da realização desse trabalho era avaliar um modelo numérico não muito difundido no Brasil para o estudo de uma ruptura hipotética de barragens (ou estudo de *Dam Break*). Como foi enfatizado por Machado (2017), a elaboração de estudos de retroanálise constituem uma ferramenta importante de análise e avaliação dos fenômenos por permitirem ponderar e analisar a respeito dos parâmetros adotados e aperfeiçoar metodologias. A autora destaca, no entanto, a importância de que os dados empregados no estudo sejam os mais precisos possíveis, o que muitas vezes se torna um desafio face à sua difícil obtenção.

Observa-se que a composição de uma base topográfica que represente as características do terreno é uma etapa determinante. A utilização de um MDT, que seria a opção mais indicada, não foi possível em função da indisponibilidade desse dado. Utilizou-se, por conseguinte, uma base MDE que é disponibilizada de forma gratuita e que apresenta, entretanto, problemas como o relativo à elevação considerada não descontar os objetos sobre a superfície terrestre. Ao se comparar a mancha real de inundação e a mancha obtida pelo HISTAV constatou-se, todavia, que eram bastante similares e o dado apresenta, portanto, um nível de resolução aceitável e representativo para o problema estudado.

A opção pela utilização da mesma base topográfica usada por Machado (2017), complementada com a de Matos (2018) para se avaliar uma área de estudo um pouco maior, mostrou-se uma solução interessante ao permitir que a comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes modelos numéricos não fossem influenciados diretamente por esse aspecto.

Outras variáveis de destaque correspondem aos dados geotécnicos e reológicos. A determinação dessas características é fundamental para que se simule o comportamento dos rejeitos em sua propagação pelo vale a jusante. Devido ao fato do tempo disponível para a realização do estudo não permitir que fossem realizados os ensaios necessários para a obtenção dos parâmetros citados, utilizar um valor médio entre os encontrados por Machado (2017) se mostrou uma simplificação aceitável.

Um ponto de atenção é a diferente abordagem adotada na determinação da largura da brecha de ruptura e a posterior dificuldade em relação à determinação da vazão de pico. A diferença de brechas adotadas em estudos pode originar erros de ordens de grandeza nos resultados de vazão. Nesse caso, uma alternativa mais razoável seria a utilização do mesmo valor encontrado por Machado (2017), o que limitaria a possibilidade de divergências apenas em função do tamanho de brecha adotado.

Levando em consideração que a simulação através do HISTAV não impõe a porcentagem do volume que vai desprender da barragem e modela uma massa de água que vai escoar através da barragem em um cenário de ruptura, observa-se que esta é uma vantagem da simulação. Uma das maiores dificuldades de estudos dessa natureza reside na determinação dessa porcentagem do volume total do reservatório e, embora a média na literatura convirja para cerca de 30%, esse número pode variar consideravelmente, chegando inclusive a 100% de volume despreendido.

O uso do HISTAV, para um utilizador não perito em sistemas de informação geográfica, é substancialmente mais difícil que o uso do HEC-RAS, dado que este último é dotado de uma interface gráfica intuitiva e é acompanhado por um leque abrangente de tutoriais. No HISTAV, a manipulação da informação topográfica baseia-se no QGIS, um software de livre acesso. Podem ser introduzidas alterações ao código fonte do HISTAV, mas é necessário que os utilizadores detenham conhecimentos de C++. Os responsáveis pela elaboração e continuidade do modelo estão desenvolvendo uma interface gráfico que deverá ficar disponível em 2020.

Por fim, conclui-se, a partir de tudo o que foi exposto, que o modelo numérico HISTAV é uma opção viável para a elaboração de estudos de ruptura hipotética de barragens (*Dam Break*). Os resultados obtidos através do programa mostram-se coerentes aos observados no evento real de ruptura e aos simulados por Machado (2017), como foi destacado nos casos do tempo de propagação da onda de ruptura e das profundidades atingidas. Em relação às divergências observadas em relação à vazão de pico atribui-se a variação às diferentes larguras de brecha adotadas em cada caso.

Agradecimentos

RiverCure - This research was partially supported by Portuguese and European funds, within the COMPETE 2020 and PORE-FEDER programs, through project PTDC/CTA-OHR/29360/2017.

Referências bibliográficas

Albuquerque Filho, L. H. (2004) *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone (Dissertação de Mestrado)*. Apresentada ao curso de Engenharia Civil - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 194 f.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (2019). Nota explicativa - 15/02/2019: segurança de barragens focada nas barragens construídas ou alteadas pelo método a montante, além de outras especificidades referentes.

Disponível em: <http://www.anm.gov.br/noticias/nota-explicativa-sobre-tema-de-seguranca-de-barragens-focado-nas-barragens-construidas-ou-alteadas-pelo-metodo-a-montante-alem-de-outras-especificidades-referentes>. Acesso em: 04 de abril de 2019.

Chammas, R. (1989). *Barragens de Contenção de Rejeitos*. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEb), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 29 p.

Conde, D., Baptista, M. A. V., Oliveira, C. S., Ferreira, R. M. L. (2013). A shallow-flow model for the propagation of tsunamis over complex geometries and mobile beds. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 13, Out, 2533-2542.

Conde, D., Canelas, R., Baptista, M. A., Telhado, M. J., Ferreira, R. M. L. (2014). Severity and exposure associated to tsunami actions in urban waterfronts. The case of Lisbon, Portugal. *Geophysical Research Abstracts*, v. 16.

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

Matos, A. C. S. (2018). *Modelagem Hidrodinâmica de perdas de vidas humanas associadas à ruptura da Barragem de Fundão, para o subdistrito de Bento Rodrigues, Mariana (MG) TCC (Tese de Graduação)*. Apresentada ao Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 63 f.

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. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com>. Acesso em: 25 de maio de 2019.

SAMARCO. Rompimento da Barragem de Fundão. Disponível em: <https://www.samarco.com/rompimento-da-barragem-de-fundao/>. Acesso em: 18 de maio de 2019.

Toombes, L. (2014). How Far Can You Push a HEC-RAS Model and Other Conundrums - A Nam Theun 2 Case Study. *5th International Symposium on Hydraulic Structures*, Jun. DOI: <https://doi.org/10.14264/uql.2014.46>

Vianna, L. F. V. (2015). *Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão (Dissertação de Mestrado)*. Apresentada ao curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 118 f.