

MODELAGEM HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL DE FLUIDOS HIPERCONCENTRADOS ESTUDO DE CASO DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO - BRASIL

Nathália Couto Machado¹, Aloysio Portugal Saliba² y Márcio Benedito Baptista²

¹ Engenheira da Pimenta de Ávila Consultoria, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

² Professores doutores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
E-mail: nathalia.couto@pimentadeavila.com.br, asaliba@ehr.ufmg.br; marcio.baptista@ehr.ufmg.br

Introdução e objetivo

A disposição dos rejeitos de mineração em barragens é amplamente utilizada em todo mundo e, como qualquer outra obra de engenharia, as barragens construídas com esta finalidade são susceptíveis a falhas, tornando imprescindível o conhecimento das consequências de uma eventual ruptura.

Em estudos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos Machado (2017) aponta a necessidade de uma avaliação quanto ao comportamento do escoamento do material resultante, no que tange aos fluxos hiperconcentrados, não-Newtonianos, como por exemplo, um fluido de *Bingham*.

Conforme USSD (2013), existem diversos modelos de propagação do hidrograma de ruptura de barragem disponíveis, destacando-se o FLO-2D, FLDWAV, DAW-W, HEC-RAS, entre outros. Os modelos citados são usualmente utilizados em engenharia e possuem diferentes níveis de complexidade e recursos de cálculo distintos. Assim, ao passo que a maioria dos modelos é capaz de modelar o fluxo newtoniano, apenas alguns são capazes de simular o fluxo não newtoniano. Torna-se importante, portanto, avaliar o desempenho dos modelos nas duas hipóteses de cálculo citadas, ou seja, avaliar os ganhos efetivos com as simulações em condições de fluxo não-Newtoniano.

Assim, o objetivo do presente trabalho é apresentar e comparar as simulações bidimensionais efetuadas com o uso dos modelos HEC-RAS 5.0.1 e FLO-2D PRO referentes à retroanálise do evento de ruptura da barragem de rejeitos do Fundão, situada no Sudeste do Brasil em 2015.

Descrição do estudo de caso

A ruptura da Barragem do Fundão ocorreu o dia 5 de novembro de 2015, causando perdas de vidas humanas e destruição de matas ciliares e áreas urbanas, afetando cerca de 680 km do sistema fluvial a jusante, fortemente impactado pela deposição de cerca de 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos.

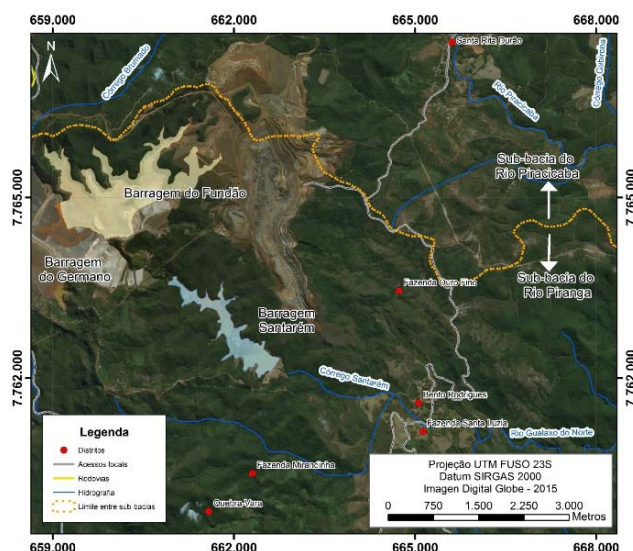


Figura 1.- Localização da Barragem do Fundão

A Figura 1, que ilustra a área afetada adjacente à barragem, permite constatar que a barragem de Santarém, localizada imediatamente a jusante da barragem do Fundão, sofreu galgamento e o material liberado fluiu através do curso do córrego Santarém, adentrando em seguida o rio Gualaxo do Norte, que deságua no rio do Carmo a aproximadamente 73 km a jusante, que por sua vez é formador do Rio Doce.

Foi observado ao longo do caminho percorrido pela onda de ruptura, uma mistura de rejeitos, solos, detritos vegetais e antrópicos, como pontes e construções, que foram se depositando ao longo das planícies de inundação, das margens e calhas dos cursos de água e seus tributários. Caracteriza-se claramente, desta forma um fluido não-Newtoniano, sobretudo no segmento inicial de cerca de 6 km, objeto do presente estudo.

Metodologia

O estudo de caso da ruptura da Barragem do Fundão foi fundado na propagação bidimensional com o uso de modelos numéricos capazes de simular o escoamento nas hipóteses já citadas, como será descrito ulteriormente.

O trecho de simulação hidráulica estende-se por aproximadamente 6,2 km, iniciando-se logo a jusante da Barragem Santarém e englobando: (i) a planície de inundação característica da região de Bento Rodrigues; (ii) pronunciado estreitamento do trecho do rio a jusante desta; (iii) pequeno trecho a jusante do estreitamento, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2.- MDT e singularidades hidráulicas do trecho simulado.

A topografia utilizada como base para os modelos hidráulicos é gratuita, gerada pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros. Esta topografia foi disponibilizada pelo website *Earth Explorer* (USGS, 2016). Foi gerado a partir desta topografia o MDE (Modelo Digital de Elevação).

O volume da ruptura e o tempo para conformação do hidrograma foram determinados pelos relatórios e relatos das testemunhas presentes no momento da ruptura da Barragem do Fundão (MORGENSTERN et al, 2016). As referências convergem para o valor de rejeito desprendido da Barragem do Fundão de 32 Mm³. Considerou-se também que 1,2 Mm³ de material ficaram retidos na Barragem Santarém, que não sofreu ruptura. O hidrograma propagado para jusante contempla, portanto, este cenário, com retenção da parcela do material e posterior galgamento da Barragem Santarém.

A caracterização geotécnica e reológica dos rejeitos foi realizada a partir do material coletado desprendido da barragem em três pontos a jusante desta. Foram realizados ensaios de caracterização e reológicos que permitiram definir a Concentração Volumétrica do fluido propagado e as curvas de Viscosidade versus Concentração Volumétrica (Machado, 2017), que permitiram a definição dos parâmetros dos modelos.

A reconstituição da mancha de inundação efetivamente observada decorrente da ruptura foi realizada a partir da imagem de altíssima precisão, disponibilizada pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG). Esta imagem foi obtida no dia 06/11/2015, imediatamente após a ruptura da Barragem do Fundão. A imagem (TIFF) é proveniente do satélite ARYA, com células de 5 cm de lado e três bandas. A partir desta imagem, foi possível delinear, com precisão, as áreas afetadas na área do estudo, inclusive a visualização e possibilidade de diferenciação entre os rejeitos propagados, árvores/vegetações arrastadas, automóveis e destroços de construções civis.

O primeiro modelo hidráulico adotado foi o HEC-RAS 5.0.1, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*). Trata-se de um software livre, de ampla utilização no meio técnico. A grande dificuldade 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. Adotou-se, então, a metodologia de ajuste baseada no princípio da similaridade proposta por Ventura (2011) permitindo ajustar os coeficientes adimensionais das equações, notadamente quanto ao Coeficiente de Manning. O esquema de cálculo é implícito, tendo sido adotado intervalo de tempo de 1s, para garantir a estabilidade do modelo e a condição de Courant. O MDE foi importado através da plataforma RASMapper adotando-se Grid inicial de 15m, discretizando-se em tamanhos menores para a melhor descrição da topografia em locais específicos. Na região dos cursos de água, utilizam-se elementos denominados *breaklines*, que permitem orientar a malha ortogonalmente ao alinhamento, para permitir uma melhor visualização dos níveis de água na calha menor.

O segundo modelo hidráulico utilizado, FLO-2D PRO, é um modelo bidimensional, comercial, que possui recursos de modelagem que incluem o transporte de sedimentos e corrida de lama, fluxos não-Newtonianos *mudflow* ou *mud flood*, incluindo a incorporação dos parâmetros reológicos do material que compõe o fluido. O modelo realiza a solução do modelo reológico quadrático pela alteração do termo de perda de carga na equação do momento, utilizado para a representação do escoamento de fluidos não-Newtonianos, deduzido a partir das tensões cisalhantes (FLO-2D, 2009). O peso específico da mistura (γ_m), a tensão limite de escoamento (τ_y) e a viscosidade (η) são parâmetros que variam de acordo com a concentração volumétrica (C_v).

O modelo FLO-2D importa a topografia, através de pontos com coordenadas X, Y e Z equivalentes às coordenadas e à elevação, respectivamente descritas em um arquivo de texto (txt). Diferentemente do HEC-RAS, não é possível criar Grid de tamanhos variados, sendo todos os elementos quadráticos, de mesmo valor de lado, sendo adotado o valor de 15m para a malha. Da mesma forma, o modelo ajusta automaticamente o intervalo de cálculo de forma a atender às condições de estabilidade estipuladas.

Resultados obtidos

A Figura 3 ilustra os resultados na área de Bento Rodrigues das simulações realizadas no HEC-RAS e no FLO-2D.

De forma geral, as áreas inundadas pelo fluido hiperconcentrado nos dois tipos de simulação são semelhantes, apresentando diferenças em alguns pontos, inclusive nas velocidades e tempo de chegada de onda. Pelas profundidades apresentadas na Figura 4 é coerente tal observação.



Figura 3.– Manchas de Inundação das simulações realizadas na área de Bento Rodrigues.

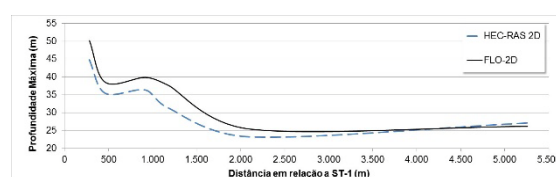


Figura 4.– Perfil profundidade por distância.

Os desempenhos das simulações hidráulicas dos 2 cenários foram avaliados por meio da comparação entre a mancha real (área inundada real) e as manchas de inundações resultantes das simulações hidráulicas. Foi realizada a análise pixel-a-pixel, denominada comparação binária (Aronica et al, 2002), e a análise “falso positivo e falso negativo” (Machado, 2017).

Os resultados apontam desempenhos bastante similares, evidenciando que a utilização de modelos mais completos, consequentemente mais complexos, implica inevitavelmente em aumento dos esforços e tempos computacionais. É necessário avaliar o quão efetivo seria a incorporação da maior complexidade na modelagem, à luz da qualidade e a disponibilidade de dados de entrada, como a topografia e a reologia dos rejeitos

Referencias bibliográficas

- Aronica, G.; Bates, P. D.; Horritt, M. S. (2002). “Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE”. *Hydrological Processes*, Vol. 16, Nº. 10, pp. 2001-2016.
- FLO-2D Software (2009). “FLO-2D Pro Documentation. Nutrioso, AZ: FLO-2D Software”.
- USSD – United States Society on Dams (2013) – “Changing Times — The Challenges and Risks of Managing Aging Infrastructure Under a New Financial Reality”. *Proceedings of 33rd Annual USSD Conference, Phoenix, Arizona*. Phoenix, USA.
- 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 (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 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. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com/>. Acesso em: 07 setembro 2016.
- USGS (2016). United States Geological Survey. Aster Global DEM. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 02 maio 2016.
- Ventura. (2011) – “Sediment/Debris Bulking Factors and Post-fire Hydrology for Ventura County”. *Relatório final*. 184 p. WEST Consultains, inc Ventura County Watershed Protection District.