



Artigo Original

ÁREA DE PERIGO RESULTANTE DE FALHA EM BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

RESULTING HAZARDOUS AREA FROM MINE TAILINGS DAM FAILURE

Herman Ziyang Martins Ameno^{1,2,3}, Miho Ohara², Shinji Egashira², Naoko Nagumo², Nobutomo Osanai³

DOI: <https://doi.org/10.56914/vigiles.v4i1a1>

¹ Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais.

² International Centre for Water Hazard and Risk Management under the auspices of UNESCO, Public Works Research Institute

³ National Graduate Institute for Policy Studies

RESUMO

A mineração é uma importante atividade econômica para Minas Gerais, Brasil. Milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração são armazenados em barreiras artificiais de retenção chamadas barragens de rejeitos. Todavia, essas estruturas representam um risco significativo, pois os materiais empregados (rejeitos de mineração ou solo compactado) levantam incertezas quanto ao seu comportamento mecânico, seja pela baixa resistência ao cisalhamento, seja pela permeabilidade variável. Nos últimos 20 anos, pelo menos cinco barragens de rejeitos se romperam em Minas Gerais, causando mortes e danos. Atualmente, 221 barragens de rejeitos no estado podem colapsar e causar danos severos. Nesta pesquisa, o software International River Interface Cooperative (iRIC) e seu componente Morpho2DH foram selecionados para simular numericamente os fluxos de lama que assolaram Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019. O software emprega equações bidimensionais para fluxo de lama com profundidade integrada e o objetivo desta pesquisa é verificar a aplicabilidade deste software na elaboração de mapas com manchas de inundação para barragens de rejeitos.

Palavras-chave: Fluxo de lama; Barragem de rejeitos; Simulação numérica; Rompimento; *Dam-break*.

ABSTRACT

Mining is an important economic activity for Minas Gerais, Brazil. Millions of cubic meters of mine tailings are stored in artificial retention barriers called tailings dams. However, these structures represent a significant risk since the materials employed (tailings or compacted soil) raise uncertainties regarding their mechanical behavior, either due to their low shear strength or their variable permeability. In the last 20 years, at least five tailings dams collapsed in Minas Gerais, causing death and damage. Currently, 221 tailings dams in the state could fail, and potentially cause severe damage. In this research, the software International River Interface Cooperative (iRIC) and its tool Morpho2DH were selected to numerically simulate the mudflows that hit Mariana in 2015 and Brumadinho in 2019. The software employs depth-integrated two-dimensional governing equations for mudflow and the objective of this research is to verify the applicability of this software in the elaboration of hazard maps for tailings dams.

Keywords: Mudflow; Tailings dam; Numerical simulation; Rupture; *Dam-break*.

Recebido em: 04/03/2021 - Aprovado em: 27/05/2021

E-mail: herman.ameno@bombeiros.mg.gov.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019), a indústria de mineração empregou, até janeiro de 2019, cerca de 195 mil trabalhadores diretos. Em 2018, a produção mineral do Brasil movimentou cerca de US\$ 34 bilhões, enquanto em 2017 movimentou cerca de US\$ 32 bilhões. Em 2017, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2018), Minas Gerais foi responsável por quase metade da produção (equivalente a 47,2%) das substâncias metálicas mineradas no Brasil.

A mineração é fundamental para a economia de Minas Gerais e contribui substancialmente para a definição do perfil socioeconômico do estado. No cenário nacional, a liderança do estado em termos de produção é evidente, visto que praticamente metade da produção mineral nacional (sem petróleo e gás natural) vem de Minas Gerais. A indústria de mineração não só contribui para o PIB do estado, mas é um fator chave que estimula as atividades produtivas em outros setores da economia de Minas Gerais (IBRAM, 2015).

Em 2020, 433 barragens de rejeitos no Brasil tinham potencial para causar danos ao seu entorno: 256 com alto, 142 com médio e 35 com baixo potencial. Apenas em Minas Gerais, 221 barragens de rejeitos tinham potencial para causar danos ao seu entorno: 144 com alto, 56 com médio e 21 com baixo potencial (ANM, 2020a). Além disso, em Minas Gerais, 119 barragens de rejeitos têm potencial para causar danos às pessoas que vivem em seu entorno: 13 impactariam as vidas de mais de 5.000 pessoas; 21 barragens de 1.001 a 5.000; 05 de 501 a 1.000; 24 de 101 a 500; e 56 de 1 a 100 pessoas (ANM, 2020b).

A política de barragens de rejeitos começou a mudar mais significativamente a partir de 2019, após vários rompimentos. Mesmo com os avanços da legislação, um procedimento crucial precisa ser colocado em prática: o desaguamento de rejeitos. Conforme França e Trampus (2018), do Centro de Tecnologia Mineral, a principal causa de 47% dos acidentes em barragens de rejeitos é a perda de resistência estrutural devido ao excesso de água nos rejeitos. Segundo Austrália (2016), o desaguamento de rejeitos é essencial para reduzir potencialmente o volume de armazenamento e a infiltração de água e, também, permite um relevo mais estável que, no final, pode reduzir o risco de rompimento de barragens de rejeitos.

Pela atual legislação brasileira, as mineradoras são obrigadas, dependendo do porte das barragens de mineração sob sua responsabilidade, a elaborar um Plano de Ação de

Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Um dos documentos obrigatórios deste PAEBM é o mapa com a mancha de inundação de uma barragem, que é importante para que autoridades possam exigir, por exemplo, confecção de um mapa de perigo, ações de monitoramento da estabilidade do talude e instalação de um sistema de aviso prévio com sirene, treinamentos e simulados de evacuação para os moradores vizinhos e, ainda, uma zona-tampão. As mineradoras, muitas vezes, terceirizam esta empreitada e contratam escritórios de engenharia para confeccionar estes mapas. Entretanto, o *software* costumeiramente empregado por muitos escritórios, o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), e a metodologia de *Pseudo-Manning*, em muitos casos, não são os mais adequados pelo fato de utilizarem, nas simulações hipotéticas de rompimento de barragem, a água como substância e não o rejeito da mineração propriamente.

Deste modo, o objetivo deste estudo é verificar a aplicabilidade do *software* japonês público gratuito denominado iRIC (*International River Interface Cooperative*) e seu módulo Morpho2DH na elaboração de mapas com manchas de inundação para barragens de rejeitos. O *software* foi desenvolvido para avaliar os deslizamentos de terra que afetam as áreas habitadas de encostas, principalmente, durante a época de chuvas fortes que assolam o Japão entre julho e outubro. O Morpho2DH emprega equações bidimensionais para fluxo de lama com profundidade integrada e considera a mecânica do transporte de sedimentos nas simulações numéricas. Ademais, o Morpho2DH considera as características físicas particulares da lama (densidade, tensão de cisalhamento, limite de escoamento, ângulo de atrito interno, tamanho médio dos grãos) e não da água, como é o caso do HEC-RAS.

2 ÁREAS DE ESTUDO

Nesta pesquisa, primeiro houve a calibração do Morpho2DH utilizando dados do rompimento da barragem de Mariana em 2015 e, em seguida, houve a validação com o uso de dados do rompimento da barragem de Brumadinho em 2019.

2.1 Desastre de Mariana em 2015

Às 15h45min, do dia 5 de novembro de 2015, a barragem de rejeitos de Fundão, localizada no distrito de Bento Rodrigues, Mariana, Minas Gerais, rompeu. A barragem, de

propriedade da Samarco Mineração, iniciou suas atividades em 2008 e foi elevada ao longo dos anos pelo método de construção a montante. Antes da ruptura, ela possuía cerca de 500 m de comprimento de crista, 110 m de altura total, com uma elevação final de crista de 900 m acima do nível do mar. Antes do rompimento, a barragem ainda estava em operação para armazenar os rejeitos resultantes do beneficiamento do minério de ferro (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Cinco tremores foram sentidos na área pelo menos cerca de 2h45min antes do rompimento. Os terremotos variaram de 1,8 a 2,6 em magnitude e seus epicentros estavam entre menos de 2 km e 2,6 km da barragem (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Para Morgenstern *et al.* (2016), houve o deslizamento fluido de Fundão porque as condições necessárias para liquefação estavam presentes nesta barragem, a saber: os rejeitos arenosos eram contráteis, estavam saturados, e eram suscetíveis à grave perda de resistência durante a rápida ruptura. Além disso, houve ainda um mecanismo de gatilho (neste caso, os terremotos aceleraram o processo de ruptura que já existia e estava bem avançado).

Machado (2017) comparou alguns relatórios sobre o evento e calculou que a barragem de Fundão tinha 55 milhões de metros cúbicos de rejeitos, dos quais cerca de 32 milhões de metros cúbicos foram liberados após a ruptura. A onda de lama percorreu cerca de 6 km pelo vale à jusante, levando cerca de 25 minutos para chegar ao distrito de Bento Rodrigues. No total, 18 pessoas morreram e uma pessoa foi declarada desaparecida. Os sedimentos finos dos rejeitos atingiram riachos e rios e foram carregados por 640 km até o mar, poluindo a água e deixando cerca de 1 milhão de pessoas sem abastecimento de água por meses. Os danos humanos, econômicos e ambientais foram enormes.

Morgenstern *et al.* (2016) concluíram que o fluxo de lama em 5 de novembro de 2015 foi instigado por um mecanismo de extrusão lateral assentado no depósito rico em lama, em profundidade no maciço, que resultou em uma redução de confinamento lateral da areia saturada e contrátil sobrejacente. O mecanismo de extrusão criou um deslocamento por deslizamento suficiente para gerar instabilidade para desencadear o colapso.

2.2 Desastre de Brumadinho em 2019

Às 12h28min, do dia 25 de janeiro de 2019, no distrito de Córrego do Feijão, Brumadinho, Minas Gerais, a barragem de rejeitos B1 da Mina de Minério de Ferro Córrego

do Feijão entrou em colapso. A barragem inicial foi construída em 1976 e os alteamentos subsequentes (em um total de dez) foram feitos até 2016 usando o método de construção a montante. Em sua fase final, a barragem, de propriedade da Vale, tinha uma altura total de 86 m, com elevação de crista de 942 m acima do nível do mar e comprimento de crista de 720 m (ROBERTSON *et al.*, 2019).

A partir de 2016, o lançamento de rejeitos na barragem foi encerrado. Ainda assim, era monitorada por uma combinação de prismas ao longo da crista da barragem, inclinômetros para medir deformações internas, radar terrestre para monitorar as deformações de superfície da face da barragem e piezômetros para medir mudanças nos níveis internos de água. Nenhum desses instrumentos detectou significativas deformações ou alterações antes do rompimento. As análises de imagens de satélite após a ruptura indicaram pequenas deformações descendentes, lentas e contínuas de menos de 36 mm/ano na face da barragem no ano anterior à ruptura, com alguma aceleração da deformação durante a estação chuvosa. Na parte inferior da barragem, as deformações medidas nos 12 meses antes da ruptura incluíram deformações horizontais variando de 10 a 30 mm. Essas deformações são compatíveis com um recalque lento e de longo prazo da barragem e não seriam, por si só, indicativas de um precursor de rompimento (ROBERTSON *et al.*, 2019).

A barragem inicial não possuía recursos de drenagem interna para direcionar a percolação da bacia para a face da barragem, o que ajudaria a reduzir a pressão da água e aumentaria sua estabilidade. Em geral, o projeto dos nove alteamentos subsequentes incluiu recursos de drenagem interna (tubos, canais, filtros) para permitir secagem dos rejeitos adjacentes. Embora drenos de pé e tapetes drenantes tenham sido construídos na maioria dos alteamentos, a barragem de rejeitos possuía uma drenagem deficiente porque as bermas a montante foram construídas com materiais de baixa permeabilidade. Além disso, uma drenagem interna inadequada foi instalada durante a construção inicial da barragem e contribuiu para os altos níveis de água na barragem e bacia (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Uma revisão dos piezômetros instalados dentro da barragem mostrou que o nível de água dentro da barragem não reduziu significativamente, após o término da deposição de rejeitos que aconteceu em 2016. Os níveis de água na parte superior da barragem estavam caindo lentamente, mas permaneceram altos na região do pé da barragem. Isso aconteceu devido à alta precipitação durante a estação chuvosa combinada com a drenagem interna limitada da barragem (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Após a ruptura, cerca de 9,7 de 12,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos escoaram e destruíram as instalações da mineradora que estavam localizadas cerca de 1,3 km à jusante da barragem. A maior parte das 259 vítimas fatais e 11 desaparecidos eram funcionários da mina que estavam na cantina e escritórios administrativos. O fluxo de lama destruiu algumas partes do distrito de Córrego do Feijão, incluindo uma pousada próxima e várias propriedades rurais, bem como seções de uma ponte ferroviária e cerca de 100 m de via férrea. As áreas agrícolas no vale a jusante também foram afetadas (ROBERTSON *et al.*, 2019).

A pesquisa conduzida por Robertson *et al.* (2019) concluiu que a perda repentina de resistência e a ruptura resultante da barragem marginalmente estável foi devido a uma combinação crítica de deformações internas contínuas e uma redução de resistência devido à perda de sucção na zona não-saturada causada pela precipitação cumulativa desde que cessaram os lançamentos de rejeitos e incluindo a precipitação intensa no final do ano 2018. As deformações internas e a redução da resistência na zona não-saturada atingiram um nível crítico que resultou no fatídico rompimento em 2019.

3 METODOLOGIA

A Figura 1 ilustra as etapas adotadas para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa. Atualmente, estão disponíveis poucos modelos numéricos gratuitos que conseguem simular processos de erosão/deposição de fluxos de lama. Assim, para o presente estudo, o Morpho2DH, um dos componentes do iRIC, foi escolhido. Em seguida, nas etapas de calibração e validação deste *software*, foram realizadas simulações numéricas com dados obtidos, respectivamente, da barragem de Fundão em 2015 e da barragem B1 em 2019, com o objetivo de comparar visualmente os fluxos de lama relatados e os simulados em cada caso.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Equações para fluxo de lama

O modelo Morpho2DH emprega equações de conservação de massa e momento para o fluxo de lama na forma bidimensional com profundidade integrada e, ainda, a equação de conservação de massa para o sedimento do leito. A equação de conservação de massa para o corpo em fluxo é descrita com um termo de erosão à direita:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

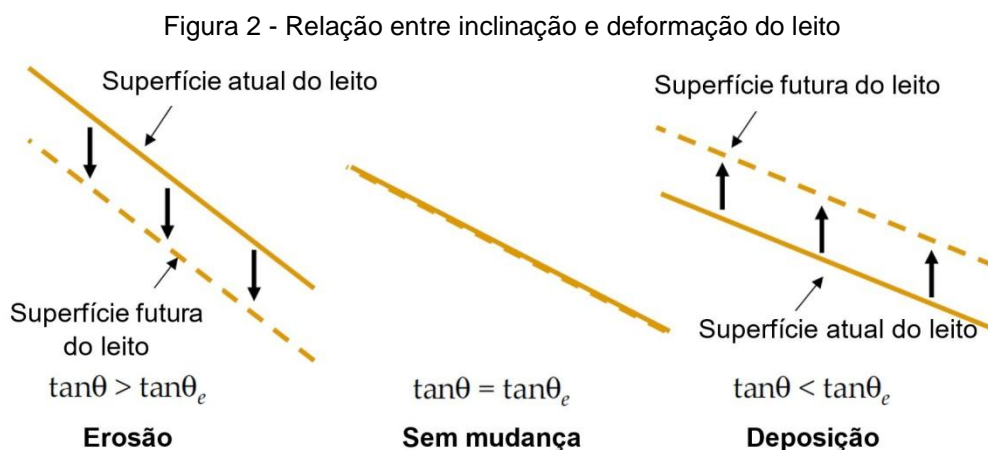
em que t é o tempo, h é a profundidade do fluxo, enquanto u e v são as velocidades das profundidades médias nas direções x e y , respectivamente. Takebayashi e Fujita (2020), ao explicar as equações desenvolvidas em 2004, por Egashira e Itoh, afirmaram que o termo do lado direito indica a fonte da massa e expressa o desenvolvimento e decrescimento de um fluxo de lama por uma troca de mistura de água e sedimento entre a superfície do leito e o fluxo de lama, em que c_* é a concentração de sedimento na camada de deposição estática (camada do leito) e E é a taxa de erosão do leito. Quando as características coesivas da camada do leito sobre o leito rochoso podem ser desprezadas e existe a condição de equilíbrio do leito, em que a taxa de erosão do leito é igual à taxa de deposição de sedimentos, a taxa de erosão do leito pode ser estimada por meio das seguintes equações (EGASHIRA e ITOH, 2004):

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan \tan (\theta - \theta_e) \quad (2)$$

em que θ , a inclinação do leito na direção do fluxo, é calculada usando a seguinte equação:

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

em que θ_x é a inclinação do leito na direção x , e θ_y é a inclinação do leito na direção y , e θ_e é a inclinação de equilíbrio do leito. A Figura 2 mostra a relação entre a deformação do leito e a inclinação do leito. Quando a inclinação do leito é mais acentuada do que a de equilíbrio, a superfície do leito sofre erosão e os materiais erodidos são levados para o fluxo de lama. Quando a inclinação do leito é igual à inclinação de equilíbrio do leito, a superfície do leito não se deforma e a massa do fluxo de lama permanece inalterada. Quando a inclinação do leito é mais suave do que a inclinação de equilíbrio do leito, os materiais no fluxo de lama se depositam no leito e a sua massa se reduz.

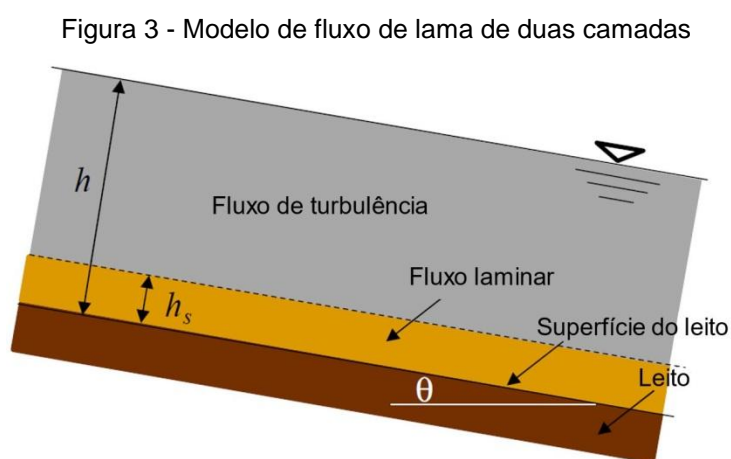


Fonte: Takebayashi e Fujita (2020).

Conforme ilustra a Figura 3, quando o tamanho do sedimento é pequeno, a camada do fluxo de turbulência se forma sobre a camada de fluxo laminar perto do leito, que se torna, então, um fluxo de lama. Considerando a formação dos fluxos laminar e de turbulência, e referindo-se à profundidade média e à concentração de sedimentos \underline{c} , a inclinação de equilíbrio do leito θ_e na direção do fluxo é obtida da seguinte forma:

$$\tan\theta_e = \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho-1}\right)\underline{c}}{\left(\frac{\sigma}{\rho-1}\right)\underline{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan\phi_s \quad (4)$$

em que Φ_s é o ângulo de repouso.



Fonte: Takebayashi e Fujita (2020).

As equações de conservação de momento são as seguintes (EGASHIRA e ITOH, 2004):

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (5)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (6)$$

em que g é a aceleração da gravidade e Z_b é a elevação do leito. Para a pressão P , é assumida a pressão estática. A densidade do fluxo de lama ρ_m é definida da seguinte forma:

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\underline{c} + \rho \quad (7)$$

em que ρ é a densidade da água e σ é a densidade do sedimento, enquanto τ_{bx} e τ_{by} são a tensão de cisalhamento nas direções x e y , respectivamente. A dissipação de energia das bases de movimento sólidas e fluidas é considerada para estimar a tensão de cisalhamento. Quando a região de fluxo de turbulência é dominante, a tensão de cisalhamento é a seguinte:

$$\tau_{bx} = \{\tau_y + \rho f_b(u^2 + v^2)\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (8)$$

$$\tau_{by} = \{\tau_y + \rho f_b(u^2 + v^2)\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (9)$$

em que τ_y é a tensão de escoamento:

$$\tau_y = \left(\frac{\underline{c}}{c_*}\right)^{\frac{1}{n}} (\sigma - \rho)\underline{c}gh \cos \theta \tan \phi_s \quad (10)$$

em que f_b é o coeficiente de resistência:

$$f_b = \frac{C_{mu}}{8} \alpha^2 \quad \alpha^2 = \frac{\kappa}{6} \quad (11)$$

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ \kappa_f \frac{(1 - \frac{\underline{c}}{2})^{\frac{5}{3}}}{\underline{c}^{\frac{2}{3}}} + \kappa_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) \underline{c}^{\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \quad (12)$$

A equação de elevação do leito é a seguinte (EGASHIRA e ITOH, 2004):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \quad (13)$$

Essas equações fazem parte do modelo de análise numérica instalado no Morpho2DH, que foi desenvolvido em 2014, por um grupo de pesquisa coordenado pelo Professor Hiroshi Takebayashi do Instituto de Pesquisa de Prevenção a Desastres da Universidade de Quioto.

3.2 Simulador numérico Morpho2DH

Neste estudo, Morpho2DH v.1.0, um dos módulos do iRIC 3.0.19 Revisão 6325, foi selecionado. Ele é um solucionador de fluxo de detritos horizontal bidimensional e análise de fluxo de lama que consegue reproduzir os processos de transporte e deposição de fluxos de detritos e lama devido a deslizamentos de terra. Para simulações numéricas, dados topográficos e dados reológicos são parâmetros obrigatórios.

3.2.1 Calibração e validação do *software*

A confiabilidade da simulação numérica de fluxo de lama depende da calibração e validação adequadas do modelo, Morpho2DH. Dados como fluxo de lama, topografia, concentração de sedimentos, diâmetro médio de grãos, volume liberado de lama, área inundada e áreas de deposição e erosão da lama foram empregados para calibrar e validar o modelo. Nesta pesquisa, a calibração e validação incluem a comparação visual do fluxo de lama relatado e simulado.

3.2.2 Dados topográficos

Os dados topográficos de determinada região da Terra podem ser expressos em um Modelo Digital de Elevação (MDE), que consiste em matrizes de valores de elevação regularmente espaçados, que são referenciados horizontalmente a uma projeção *Universal Transverse Mercator* ou a um sistema de coordenadas geográficas. As células da grade são espaçadas em intervalos regulares ao longo de perfis sul para norte que são ordenados de oeste para leste (US GEOLOGICAL SURVEY, 2020).

O *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), processa, arquiva e distribui vários produtos de dados de MDE que foram gerados a partir de sensores ópticos e de radar de abertura sintética (SAR). O *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Global MDE* (ASTGTM) versão 3, que foi lançado publicamente pelo LP DAAC em agosto de 2019, foi selecionado para calibração. O arquivo em formato *raster* tem uma resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m de postagem horizontal no equador) e foi gerado usando mais de 1,88 milhão de cenas do satélite *Level 1A Terra ASTER* obtidas entre 1º de março de 2000 e 30 de novembro de 2013 (LP DAAC, 2019).

A barragem de Fundão em Mariana foi erguida em 2008 e recebeu carregamentos até o seu rompimento em 2015. Dessa forma, o arquivo *raster* original ASTGTM foi atualizado no *software* ArcGIS para a condição que a barragem de rejeitos tinha antes da ruptura. Informações contidas nos relatórios de Morgenstern *et al.* (2016) foram consideradas para aumentar virtualmente a altura da barragem para a cota de 898 m acima do nível do mar.

Para a validação, os dados da barragem B1 foram fornecidos pela Vale, empresa proprietária da barragem que se rompeu. Neste caso, para esta pesquisa, a empresa forneceu dois arquivos de MDE com resolução de 1 m por 1 m: primeiro, um que foi feito em 2016, após o encerramento das atividades da barragem e, segundo, um que foi produzido após a ruptura da barragem. A empresa subtraiu um arquivo do outro e elaborou um mapa contendo a erosão e a deposição de lama após este evento.

3.2.3 Dados reológicos

Reologia é o ramo da física que trata da deformação e do fluxo de materiais sólidos e líquidos. Em outras palavras, a reologia é a ciência que estuda o fluxo da matéria, principalmente no estado líquido, mas também como "sólidos moles" ou sólidos sob condições em que respondem com fluxo plástico em vez de deformar elasticamente em resposta a uma força aplicada (SCHOWALTER, 1978).

Para a calibração do Morpho2DH, a pesquisa reológica feita por Morgenstern *et al.* (2016) e Machado (2017) foi importante para definir as características dos rejeitos que foram lançados pela barragem de Fundão, em 2015. Dados como concentração de sedimentos (entre 0,4 e 0,5), diâmetro médio dos grãos (0,1 mm), volume de lama liberado e densidade dos rejeitos foram obtidos nos estudos conduzidos pelos autores mencionados acima. É relevante afirmar que, no caso real, o talude principal da barragem desabou de imediato e por completo.

Os dados obtidos de Robertson *et al.* (2019) sobre a barragem B1 e os cálculos efetuados posteriormente foram vitais para realizar a validação. Dessa forma, a concentração de sedimentos (entre 0,4 e 0,5), o diâmetro médio dos grãos (0,1mm), o volume de lama liberado e a densidade dos rejeitos foram adquiridos desta pesquisa. Este evento foi registrado em um vídeo de alta resolução que mostra o colapso total do talude da barragem de uma só vez.

Quanto à densidade, Morgenstern *et al.* (2016) obteve amostras de rejeito de Fundão em que a densidade variava de 1,63 a 2,3 g/cm³, a depender do estado (seco, molhado) e da composição (areias, siltes, etc.). Machado (2017) elaborou amostras de rejeito com o material que colheu na região do rompimento de Fundão e obteve, em uma delas, densidades que variavam de 1,98 a 2,21 g/cm³, de acordo com a concentração do rejeito. Robertson *et al.* (2019) obteve amostras de rejeito da B1 e a densidade média calculada, a partir de diversas amostras, foi de 2,65 g/cm³. No Morpho2DH, não é possível alterar a densidade como uma variável pelo fato do código de programação do *software* ser fechado e, assim, o valor empregado nos cálculos estima-se ter sido por volta de 2.1 g/cm³ que comumente é adotado no Japão para a densidade média do solo.

3.2.4 Configurações do Morpho2DH

Nas condições de cálculo do Morpho2DH, vários parâmetros podem ser ajustados. Para todos os casos (calibração e validação), a concentração de sedimentos foi definida como padrão (constante), a concentração de sedimentos por deposição estática foi definida como valor padrão (0,6), a relação de sedimentos do comportamento líquido foi definida no valor padrão (0,2), a relação da profundidade do fluxo laminar foi definida no valor padrão (0,4), e o coeficiente de resistência também foi definido no valor padrão (72). Parâmetros como valor de concentração de sedimentos, profundidade mínima do fluxo e ângulo de atrito interno (ϕ) foram alterados para cada caso.

No Morpho2DH, para a calibração, foram criadas grades de 15 m por 15 m, com um total de 177.741 células consistindo de 681 na direção x e 261 na direção y. Para a validação, foram utilizadas grades de 10 m por 10 m com um total de 187.110 células consistindo em 810 na direção x e 231 na direção y.

3.3 Imagens de satélite

O *software Google Earth Pro* fornece uma série de imagens de satélite de um mesmo lugar da Terra em datas diferentes. Essas imagens foram importantes por permitiram uma comparação da situação antes e depois do rompimento das barragens de rejeitos. Para a calibração, eles foram úteis por serem o único meio disponível para comparar os fluxos de lama relatados e simulados da barragem de Fundão. Para o processo de validação, a Vale forneceu fotos em alta resolução antes e depois da ruptura

da barragem B1, em que foi possível fazer a comparação visual dos fluxos de lama relatados e simulados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do Modelo

Um conjunto de parâmetros foi utilizado no Morpho2DH para coincidir os fluxos de lama relatados e simulados que atingiram o distrito de Bento Rodrigues em 2015. Após várias tentativas, a combinação de parâmetros que produziu os resultados em que a mancha simulada mais se aproxima da mancha de inundação do evento real é destacada na Tabela 1.

Para concentração de sedimentos, foi utilizado o valor de 0,4 que está dentro dos valores considerados por Machado (2017). O ângulo de atrito interno que, em ensaios de laboratório, varia de 17 a 40, segundo o tipo de solo, foi reduzido ao valor irreal de 0,01 para que a simulação do fluxo de lama se espalhasse mais pelo terreno, assim como no evento real.

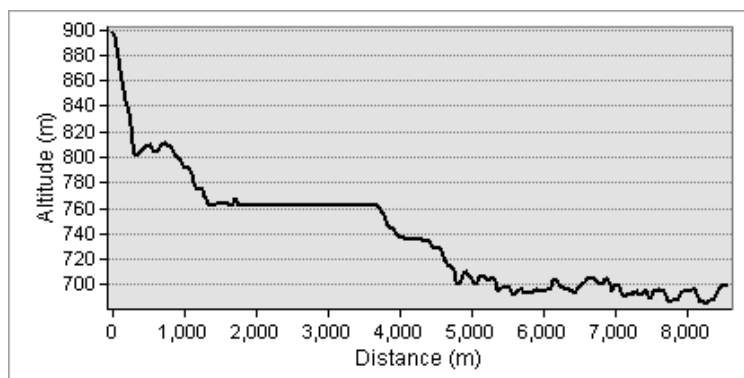
Tabela 1 - Parâmetros calibrados no Morpho2DH

Parâmetros	Valores
Concentração dos sedimentos	0,4
Profundidade mínima do fluxo	0,1 m
Ângulo de atrito interno (ϕ)	0,01
Profundidade máxima de erosão	15 m

Fonte: Elaborado pelos autores.

Desde a crista da barragem (altitude de 898 m acima do nível do mar) até o ponto selecionado no mapa em que uma parte considerável de rejeitos se depositou (elevação de 670 m acima do nível do mar), a distância é de cerca de 9.000 m. Assim, de montante a jusante, ao longo do vale onde se encontra o Córrego Santarém, o perfil longitudinal é de cerca de 0,025 de inclinação (Figura 4).

Figura 4 - Perfil longitudinal antes do colapso da barragem de Fundão em 2015

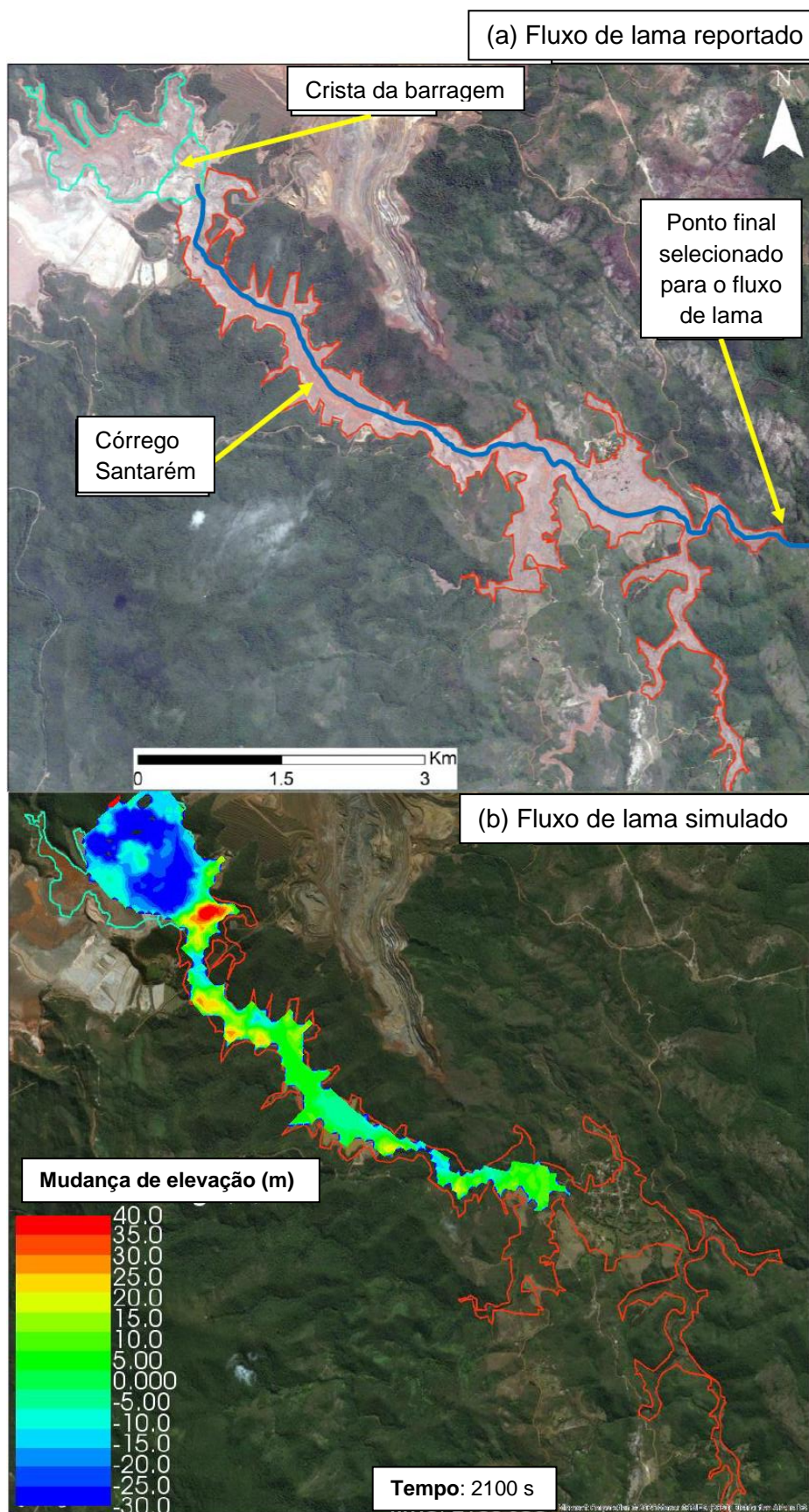


Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 5, as linhas azuis claras representam os contornos da barragem de Fundão, enquanto as linhas vermelhas mostram as áreas atingidas pelo fluxo de lama. O fluxo de lama simulado no Morpho2DH atingiu 7 km dos 9 km de extensão do canal principal, onde está localizado o Córrego Santarém (representado pela linha azul escuro), o que perfaz um total de 78%.

A obtenção do resultado de 78% pode ser justificada pela desatualização do MDE, uma vez que as imagens de satélite disponíveis para a área foram obtidas muito antes da configuração real que tinha a mesma logo antes do rompimento em 2015. Isto é, as imagens foram obtidas num período bastante anterior ao rompimento da barragem e havia discrepâncias entre a representação virtual (MDE) e a real. Outro fator importante é a resolução disponível (30m x 30m, aproximadamente) que pode comprometer o resultado final. Por fim, o *software* foi desenvolvido para deslizamentos de terra em encostas japonesas e as equações que o compõem foram desenvolvidas com base em estudos de laboratório para este tipo de situação, que difere da dinâmica de um rompimento de barragem de rejeitos.

Figura 5 - Comparação da barragem de Fundão do (a) fluxo de lama relatado e (b) fluxo de lama simulado



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 Validação do modelo

Para validação, os parâmetros calibrados previamente foram aplicados aos dados da barragem B1 que afetou Brumadinho em 2019. O objetivo foi, novamente, coincidir os fluxos de lama relatados e os simulados. O conjunto de parâmetros está relacionado na Tabela 2.

Para concentração de sedimentos, usou-se o valor de 0,4 que está dentro do esperado, de acordo com cálculos feitos do trabalho de Robertson *et al.* (2019). O ângulo de atrito interno, mais uma vez, foi reduzido ao valor irreal de 0,01 para que a simulação do fluxo de lama obtivesse resultados que coincidissem com os reais.

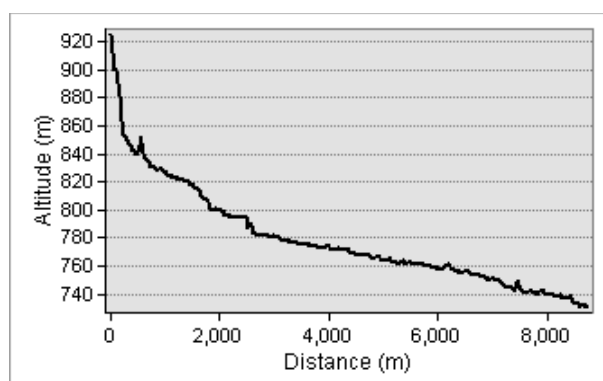
Tabela 2 - Parâmetros validados no Morpho2DH

Parâmetros	Valores
Concentração dos sedimentos	0,4
Profundidade mínima do fluxo	0,1 m
Ângulo de atrito interno (ϕ)	0,01
Profundidade máxima de erosão	15 m

Fonte: Elaborado pelos autores.

Da crista da barragem B1 (altitude de 942 m acima do nível do mar) até o ponto mais distante em que a parte majoritária dos rejeitos alcançou (altitude de cerca de 700 m acima do nível do mar), a distância é de cerca de 9.000 m. Portanto, de montante para jusante, o perfil longitudinal tem uma inclinação de cerca de 0,025 (Figura 6).

Figura 6 - Perfil longitudinal antes do colapso da barragem B1 em 2019



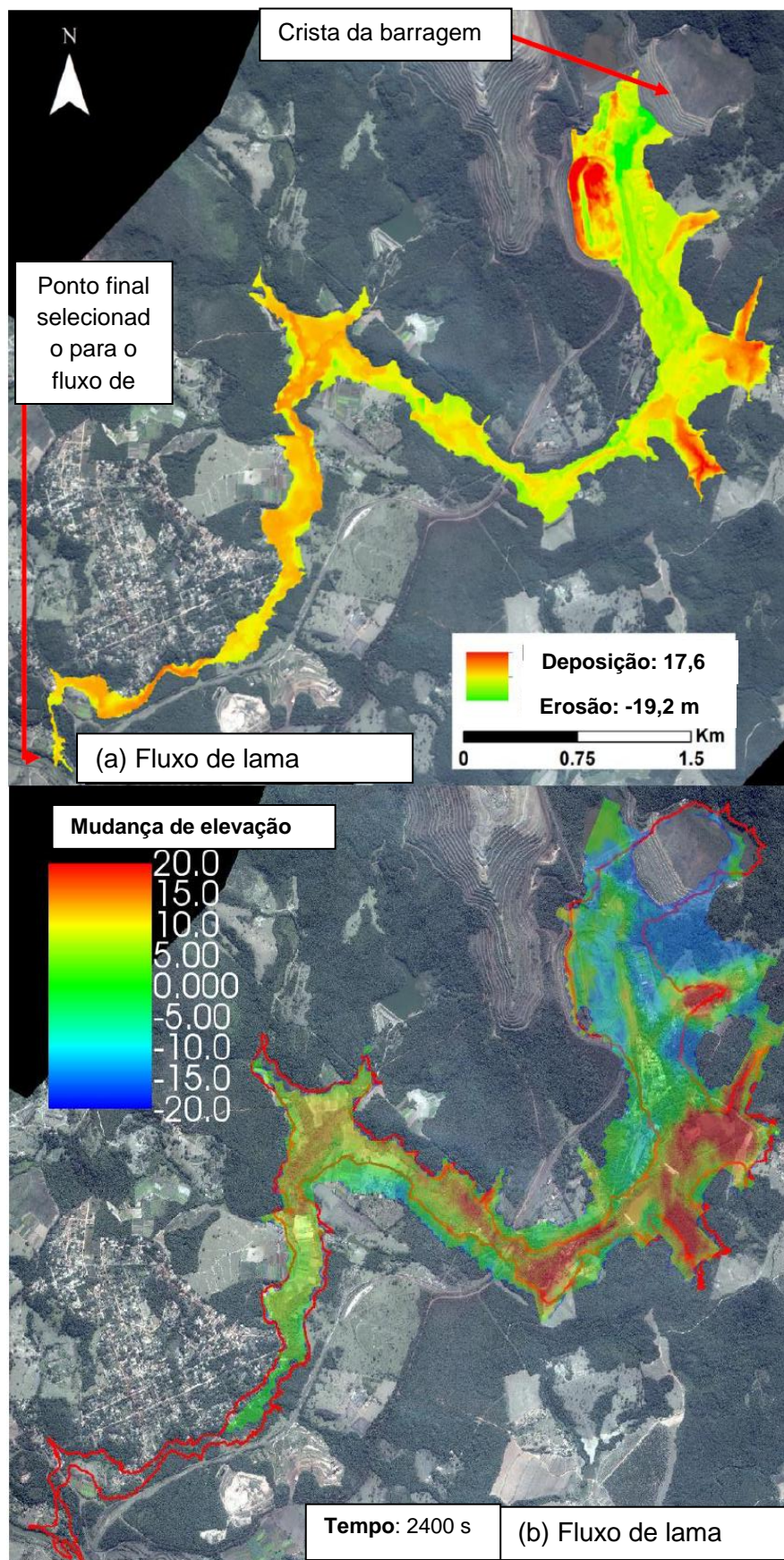
Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 7, comparando-se os dois mapas, é possível analisar que o escoamento de lama simulado no Morpho2DH atingiu, no canal principal, cerca de 7,6 km em 9 km de

extensão, o que perfaz um total de 85% de distância alcançada. A melhora no resultado obtido nessa simulação, em comparação à de Mariana (78%), pode ser justificada pelo uso de um MDE mais preciso (resolução de 1m x 1m) e, também, mais atualizado que foi elaborado um pouco antes do rompimento e, assim, apresenta menos discrepâncias entre o real e o virtual.

Como a Vale forneceu dados relativos à erosão e deposição na área, após o rompimento da barragem, foi possível comparar a erosão e a deposição dos fluxos de lama relatados e simulados para este evento. No mapa produzido após a simulação, é possível observar algumas áreas de transbordamento, principalmente no canal esquerdo, logo após a barragem. Em algumas zonas, a erosão é subestimada, enquanto em outras regiões, a deposição é superestimada.

Figura 7 - Comparação da barragem B1 do (a) fluxo de lama relatado e (b) fluxo simulado

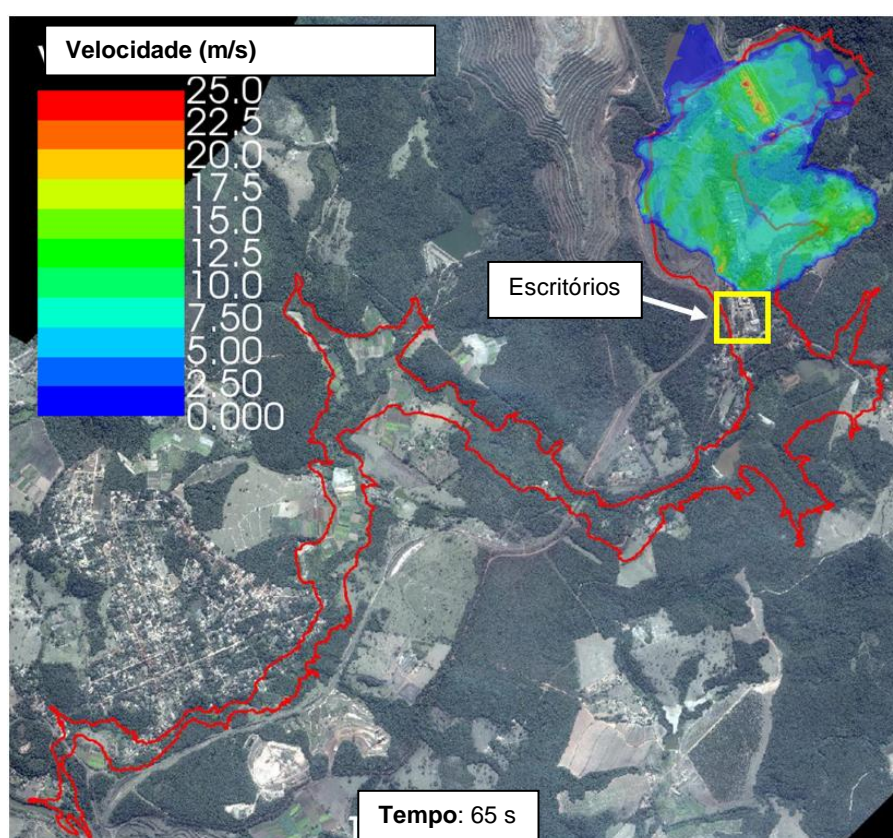


Fonte: (a) Vale. (b) Elaborado pelos autores.

No evento de 2019, da crista da barragem até o local onde ficavam os escritórios, a distância era de cerca de 1.300 m. Na Figura 8, na simulação, para o fluxo de lama atingir essa área, foram necessários cerca de 65 segundos, o que dá uma velocidade estimada de 20 m/s em média. Diferentes autores obtiveram, nas mesmas etapas de suas simulações, valores semelhantes para a velocidade inicial e para o tempo de chegada a essa região:

- Yu; Tang; Chen (2020) estimou uma velocidade de 15 m/s a 20 m/s e;
- Branquinho *et al.* (2019) calculou um tempo de chegada de 61 segundos e velocidade entre 19 m/s e 22 m/s.

Figura 8 - A velocidade do fluxo de lama simulado na barragem B1



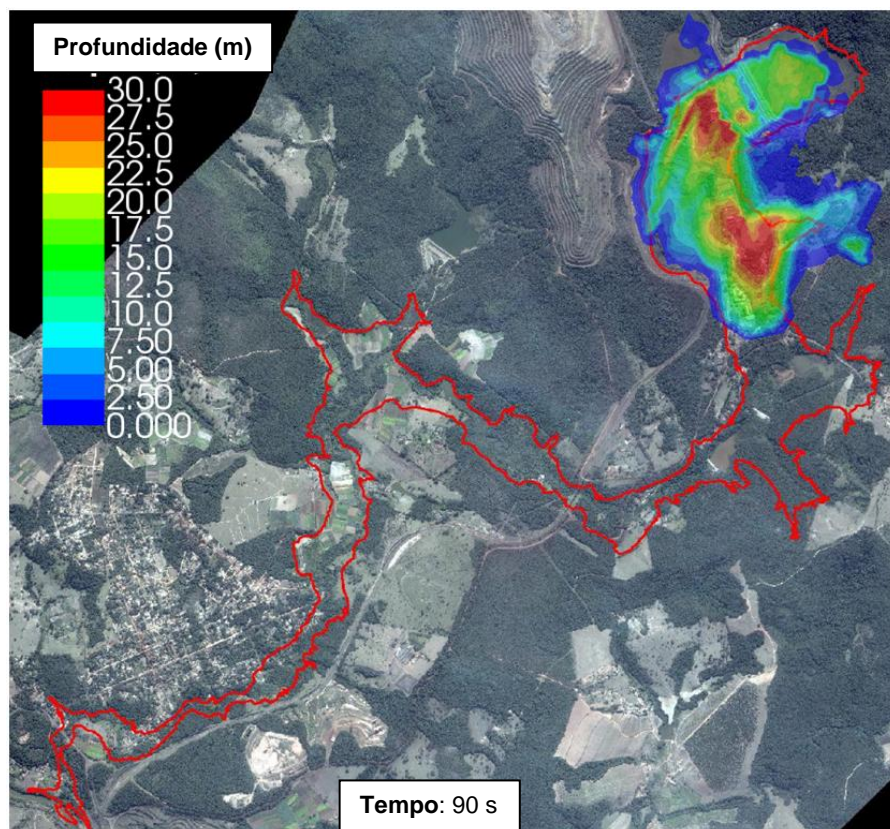
Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme relatado por Robertson *et al.* (2019), no desastre de 2019, o material liberado formou uma onda de lama com uma altura de cerca de 30 m. Nas simulações realizadas por Branquinho *et al.* (2019), até o ponto em que os escritórios estavam localizados, o *software* Flo2D obteve profundidades para o fluxo de lama variando de 20 m a 30 m, na parte mais profunda.

Na Figura 9, nas simulações do Morpho2DH, a profundidade do fluxo de lama obtida oscilou, da mesma forma, em uma faixa entre 20 m e 30 m, na parte mais profunda. Em

ambos os *softwares*, embora a distribuição de profundidade simulada em algumas áreas seja diferente, em geral, o padrão dos resultados é semelhante.

Figura 9 - Profundidade do fluxo de lama simulado na barragem B1



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 CONCLUSÃO

No Brasil, principalmente em Minas Gerais, existem várias barragens de rejeitos que, em caso de rompimento, podem devastar vidas humanas e animais, bens, natureza e economia. Nos últimos 20 anos, algumas barragens se romperam e, por isso, a política a respeito delas começou a mudar de forma mais efetiva a partir de 2019. Ainda assim, existem lacunas que precisam ser eliminadas na legislação para evitar que esse tipo de desastre aconteça novamente.

O Governo de Minas Gerais deu o primeiro passo para mudar esse cenário em 25 de fevereiro de 2019. Nesta data, foi promulgada a Lei Estadual nº 23.291, que exige uma zona-tampão no Estado, mas apenas para a construção de novas barragens. Assim, comunidades que estão dentro de áreas de risco não seriam beneficiadas por esta Lei.

O segundo passo foi dado em 8 de agosto de 2019, quando a ANM promulgou a Resolução nº 13, que determina a abolição do método de construção a montante para

barragens de rejeitos em todo o país. Além disso, a Resolução nº. 13 obriga que esses tipos específicos de barragens tenham as suas estruturas reforçadas ou tenham estruturas de contenção construídas a jusante até 15 de setembro de 2021. Por fim, as empresas de mineração que têm barragens de rejeitos com o método de construção a montante devem descomissioná-las até 2027.

O objetivo desta pesquisa é estimular estudos semelhantes com outras barragens de rejeitos (em atividade ou não) que representam uma ameaça para os residentes em seu entorno. O Morpho2DH provou ser um *software* útil que pode ser usado para obter diferentes perspectivas de rompimentos das barragens de rejeitos. O Morpho2DH pode ser usado como ferramenta auxiliar para equipes de resgate por ser capaz de simular, com alguma precisão, a profundidade da lama na área que foi afetada por um fluxo de lama. A estimativa da profundidade fornece, às equipes de resgate, informações sobre o quanto precisariam escavar para encontrar pessoas ou bens soterrados pelo fluxo de lama. Ele pode ser usado para estabelecer a elaboração de mapas de perigo, delimitação de zonas-tampão e verificação da viabilidade de construção de muros de contenção para barrar o avanço de fluxos de lama.

O Morpho2DH e *softwares* semelhantes para modelagem numérica de fluxos de lama têm limitações, pois não conseguem distinguir, por exemplo, rejeitos soltos do solo compactado original. Em casos práticos, os rejeitos sofreriam mais com a liquefação e desencadeariam fluxos de lama mais facilmente, enquanto o solo compactado original tenderia a permanecer em sua posição inicial. Ou seja, uma área selecionada no *software* para a simulação de um fluxo de lama abrangeria não apenas rejeitos, mas, também, o solo compactado e, na verdade, seus comportamentos são diferentes. Também, é interessante proporcionar ao usuário deste *software* a opção de inserir a densidade do material para as simulações para que seja possível obter resultados que possam se equivaler mais aos eventos reais

Quanto aos resultados obtidos nesta pesquisa, é importante destacar as ressalvas existentes na utilização de MDEs gratuitos, caso da simulação numérica de Fundão, devido à desatualização e possível influência nos resultados. Logo, em estudos com um maior grau de detalhamento, para elaboração de mapas com manchas de inundação, a topografia de precisão deve ser um elemento obrigatório.

Para o futuro, incentivam-se estudos comparativos entre o Morpho2DH e outros *softwares* que estão disponíveis no mercado como HEC-RAS, Flo2D, RAMMS, SPH, entre outros. O objetivo é confrontar estudos de rompimento de barragens (*dam-break*) quanto à

área afetada, profundidade e velocidade do fluxo de lama para que pesquisadores, mineradoras, escritórios de engenharia e agências de Estado possam compreender sob diferentes perspectivas os efeitos de eventuais colapsos de barragens de rejeitos de mineração.

REFERÊNCIAS

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais substâncias metálicas**. 2018.

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Mapa - Cadastro Nacional de Barragens de Mineração**. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Mapa>. Acesso em: 16 jul. 2020. 2020a.

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Quantitativo de barragens de acordo com a população possivelmente afetada**. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 16 jul. 2020. 2020b.

ANM. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 13, de 08 de agosto de 2019: **Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências**. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2019.

AUSTRÁLIA. **Tailings Management Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry**. Department of Industry, Science, Energy and Resources. 2016.

BRANQUINHO, Gabriela; RODRIGUES, Bruno; TRANCOSO GOMES, Roberto Arnaldo; FONTES GUIMARÃES, Renato; CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio. Modelagem Preliminar da Ruptura da Barragem de Brumadinho/MG. *In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA*, 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: UFC, 2019. p. 1-12.

EGASHIRA, Shinji; ITOH, Takahiro. 土石流の数値シミュレーション [Simulação numérica de fluxo de detritos]. 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌 [Journal of Computational Fluid Dynamics, Japan Fluid Force Society], 第 12 巻 第 2 号 2004 年 11 月 [v. 12, n. 2, 2004]. Disponível em: <http://www2.nagare.or.jp/jscfd/j-jscfd/122/p122-2.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2020.

FRANÇA, Silvia Cristina Alves; TRAMPUS, Bruna Câmara. **Desaguamento de rejeitos minerais para aplicação de métodos de disposição alternativos às barragens de rejeito convencionais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. 59 p. (Série Tecnologia Ambiental, 102).

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Panorama da Mineração em Minas Gerais / Instituto Brasileiro de Mineração, Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro de Metais**. Brasília: IBRAM, 2015.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório Anual de Atividades**. Brasília: IBRAM, 2019.

LP DAAC. **ASTER Global Digital Elevation Model V003**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>. Acesso em: 22 jun. 2020.

MACHADO, Nathália Couto. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

MINAS GERAIS. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019: **Institui a política estadual de segurança de barragens**. Diário do Executivo, Belo Horizonte, 2019.

MORGENSTERN, Norbert Rubin; VICK, Steven G.; VIOTTI, Cássio B.; WATTS, Bryan D. **Fundão Tailings Dam Review Panel** - Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 2016. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com/>. Acesso em: ago. 2019.

ROBERTSON, Peter K.; DE MELO, Lucas; WILLIAMS, David J.; WILSON, G. Ward. **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I**. 2019. Disponível em: <http://www.b1technicalinvestigation.com/>. Acesso em: ago. 2019.

SCHOWALTER, William R. **Mechanics of Non-Newtonian Fluids**. Pergamon Press, Oxford-Frankfurt, 1978. DOI: 10.1002/cite.330510727.

TAKEBAYASHI, Hiroshi; FUJITA, Masaharu. Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model. **Geosciences**, v. 10, n. 2 2020. DOI: 10.3390/geosciences10020045.

US GEOLOGICAL SURVEY. **What are digital elevations?** 2020. Disponível em: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-digital-elevation-models-dems?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products. Acesso em: 22 jun. 2020.

YU, Dayu; TANG, Liyu; CHEN, Chongcheng. Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailing dam failure across complex terrain. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 20, p. 727–741, 2020. DOI: 10.5194/nhess-20-727-2020.