

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

BREVE REVISÃO SOBRE REOLOGIA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NA MODELAGEM DE ROMPIMENTOS DE BARRAGENS COM O HEC-RAS

*Malena Lúcia Sousa Freire de Melo¹; Rodrigo Perdigão Gomes Bezerra² &
Julian Cardoso Eleutério³*

RESUMO

A reologia de fluidos hiperconcentrados é um tema importante no que tange a modelagem de inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos de mineração. Estudos recentes buscam caracterizar o comportamento de rejeitos e identificar incertezas relacionadas aos diferentes parâmetros reológicos, que levam a imprecisões nos resultados de simulações. Este estudo aborda uma breve revisão sobre reologia de rejeitos com foco na aplicação desses parâmetros em modelagem de inundações, em especial, para utilização do HEC-RAS na propagação de fluidos não-newtonianos. Foram definidos parâmetros reológicos de interesse com base nas abordagens padrão de inserção de parâmetros no módulo não-newtoniano do HEC-RAS e por meio de revisão de literatura foram levantadas faixas de valores. Verificou-se que os trabalhos que estudam as propriedades reológicas de rejeitos para aplicação em modelagem de inundações decorrentes de rompimentos de barragens são escassos. Um dos maiores desafios relativos a incertezas nas modelagens remete à elevada variabilidade dos parâmetros reológicos, e dessa forma, perspectivas interessantes para novos estudos são relativas a temas como variações probabilísticas dos parâmetros reológicos, que podem imprimir mais confiança nos resultados obtidos frente a modelagens determinísticas. Um cuidado necessário nesse tipo de análise se dá quanto ao sentido físico dos parâmetros reológicos que não pode ser abandonado em virtude da análise matemática, e nesse sentido, os valores levantados nesse trabalho permitem balizar alguns desses testes.

Palavras-Chave – Inundações, fluidos não-newtonianos, parâmetros reológicos.

INTRODUÇÃO

A disposição do material não aproveitável do processo de beneficiamento de minério em barragens de rejeitos ainda é muito comum por ser um método de descarte até então considerado mais simples e barato do que outras soluções tecnológicas. O crescimento da necessidade de matéria prima em uma sociedade contemporânea mais consumista causa o aumento do uso desses dispositivos de armazenamento. Como destacado por Pullum *et al.* (2018), o volume disposto é cada vez maior diante dos avanços tecnológicos que viabilizam economicamente o refinamento de minérios de baixo teor. Ainda que o risco de rompimento dessas estruturas seja relativamente pequeno, ele tem se demonstrado consideravelmente maior que o risco de ruptura de barragens de armazenamento de água, tendo historicamente apresentado incidência 10 vezes superior a esse último (DAVIES, 2002).

1) Aluna do programa de pós-graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Brasil, malena-melo@ufmg.br

2) Aluno do programa de pós-graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Brasil, rodrigo.pgb@gmail.com

3) Professor pesquisador no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, e no programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Brasil; julian.eleuterio@gmail.com

Foram observados 198 rompimentos de barragens de rejeitos no mundo entre os anos de 1910 e 1999, correspondendo a uma média de 2,2 rompimentos por ano (AZAM e LI, 2010). Só no Brasil, foram registrados 12 rompimentos de barragens nos últimos 35 anos (PALÚ e JULIEN, 2019). Mais recentemente, dois graves acidentes envolvendo barragens de rejeitos causaram perdas de vidas e danos ambientais e socioeconômicos no Brasil. O rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG, em 2015, causou a morte de 19 pessoas e graves danos ambientais ao longo da bacia do Rio Doce e sua foz. E em 2019, o rompimento da Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, causou 272 perdas de vida humanas, com ainda 11 pessoas desaparecidas, e impactos ambientais ao longo da bacia do Rio Paraopeba. Além do mais, esses acidentes também ocasionaram perdas econômicas significativas, tanto para as empresas responsáveis pelas infraestruturas quanto para a sociedade de forma geral (COELHO, 2018). Acidentes dessa natureza demonstram a relevância de estudos acerca das inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos com o propósito de mitigar os potenciais danos provocados pela propagação da onda de inundação ao longo do vale a jusante.

A modelagem de rompimentos de barragens de rejeitos é uma ferramenta fundamental para avaliar consequências de eventuais acidentes. Nessa seara, é necessário conhecer o comportamento do rejeito ao escoar para representar de forma fidedigna a propagação da inundação. A ciência que estuda o escoamento e a deformação dos fluidos é a reologia (JULIEN, 1995; MEZGER, 2006) e os parâmetros reológicos viscosidade, tensão de cisalhamento e taxa de deformação traduzem as características do escoamento. A viscosidade dinâmica é uma propriedade do fluido em movimento referente à resistência interna do fluido ao fluxo (MEZGER, 2006). A tensão de cisalhamento consiste na força por unidade de área necessária para realizar uma ação de cisalhamento (ZENGENI, 2016). E taxa de deformação ou gradiente de velocidade se refere a velocidade de movimentação entre as camadas do fluido que descreve o efeito de cisalhamento sofrido pelo fluido (ZENGENI, 2016).

O rejeito é uma combinação de materiais finos e água e dependendo das proporções em termos de concentração de sólidos, as propriedades dos rejeitos se assemelham a fluidos não-newtonianos (hiperconcentrados). Os fluidos não-newtonianos podem não apresentar relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, onde os valores de viscosidade sofrem alterações com a variação da taxa de cisalhamento (FERREIRA, 2005). Mesmo quando essa relação é linear, os fluidos não-newtonianos diferem dos newtonianos por demandarem uma tensão de cisalhamento para início do escoamento. Segundo O'Brien e Julien (1985), o termo fluxo hiperconcentrado se refere comumente a fluxos de lama ou fluxos de detritos.

Diversos modelos simulam a propagação de fluidos hiperconcentrados, como por exemplo, FLO-2D, RIVERFLOW2D e FLWAV, e mais recente, o HEC-RAS 6.0, foco do presente estudo visto que que em versões anteriores não permitia a simulação de fluido não-newtoniano. O conhecimento dos parâmetros reológicos viscosidade aparente, tensão inicial de cisalhamento e taxa de deformação é importante para bem representar o comportamento do rejeito ao escoar, possibilitando a aplicação de modelos em estudos prospectivos de rompimento de barragens. Segundo Wang *et al.* (2018), a maioria dos estudos reológicos são relacionados ao escoamento da polpa de rejeitos por tubulações, no transporte da mina para o lago de rejeito, o que traz incertezas em relação às características dos materiais e sua forte heterogeneidade quando dispostos no lago. O potencial das barragens de rejeitos de fluir ou sofrer deformações excessivas são questões relevantes na compreensão dos riscos associados a essas estruturas. Além disso, a evolução de uma onda de rejeitos em caso de rompimento de barragens de disposição de rejeitos é fundamentalmente dependente das características do fluido. Portanto, o entendimento da reologia desses materiais é imprescindível por ser a ciência que versa sobre esses efeitos (CHÁCARA e OLIVEIRA FILHO, 2021).

Assim, este trabalho tem por objetivo realizar uma breve revisão sobre reologia de rejeitos de mineração com foco na aplicação desses parâmetros em modelagem de inundações provenientes de rompimentos de barragens de rejeito, em especial, com uso do HEC-RAS na simulação de fluidos

não-newtonianos. Busca-se assim a determinação de faixas de variação possíveis para os parâmetros reológicos segundo valores observados na literatura para desenvolvimento de análises de incertezas em modelagens de inundações prospectivas do tipo *Dam-break*.

REJEITOS DE MINERAÇÃO E DISPOSIÇÃO EM BARRAGENS

No processo de obtenção do minério por meio da exploração das jazidas, têm-se como subprodutos também, materiais com baixo valor agregado: os estéreis, que resultam dos processos de decapeamento da mina e os rejeitos, que são provenientes dos processos de beneficiamento de minério (FERREIRA, 2016). A composição e a concentração de sólidos dos rejeitos variam de acordo com o minério explorado e os processos utilizados no seu beneficiamento. Por exemplo, o rejeito de minério de ferro é composto majoritariamente pelos minerais hematita (principal componente) e quartzo (HUANG *et al.*, 2013), e segundo Dias (2017), a goetita também constitui os rejeitos desse minério.

Os métodos para disposição de rejeitos estão sendo revisados no mundo todo com a intenção de reduzir a quantidade de água presente nessas misturas (CHÁCARA e OLIVEIRA FILHO, 2021). A redução da água e conseqüente aumento da viscosidade dos rejeitos é buscada como solução ambiental para evitar acidentes catastróficos, limitando o escoamento desse material em um eventual rompimento (PULLUM *et al.*, 2018). O estudo de Pullum *et al.* (2018) apresenta os métodos tradicionais, vantagens e desvantagens e novos métodos que buscam a redução da água no resíduo, com uso de espessantes para desidratar os rejeitos. O desafio dessa abordagem, segundo os autores, consiste na manutenção da viabilidade do bombeamento do material até a lagoa de rejeito. No entanto, grande parte dos rejeitos de mineração são lançados em misturas com água dentro de lagos de acumulação constituídos por barramentos que são alteados sucessivamente com propósitos econômicos, que terminam por armazenar materiais saturados e pouco resistentes em razão da sua condição não drenada (FERREIRA, 2016). A quantidade de água existente no rejeito implica em um material com diferentes condições e comportamentos, e os rejeitos espessados ou pastosos geralmente possuem um comportamento viscoplástico não-newtoniano (CHÁCARA e OLIVEIRA FILHO, 2021).

MODELO HEC-RAS E MODELOS REOLÓGICOS MATEMÁTICOS

Modelos reológicos são utilizados para descrever o escoamento dos fluidos, utilizando a mecânica dos fluidos (SILVA, 2020). Os modelos reológicos podem estar acoplados a modelos hidrodinâmicos permitindo a simulação de escoamentos hiperconcentrados (não-newtonianos). Com foco no modelo HEC-RAS, os efeitos não-newtonianos foram incorporados nas equações hidráulicas por meio do fracionamento do termo da declividade da linha de energia (USACE, 2020). A concepção básica consiste na adição de um termo que contabiliza as perdas internas viscosas e inerciais do fluido não-newtoniano – denominado por declividade de lama e detritos (S_{MD}) – à declividade da linha de energia (S_f), que compreende a perdas por atrito obtidas essencialmente pela equação de Manning, na equação de conservação de momento newtoniana no HEC-RAS, conforme equações a seguir (USACE, 2020).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad (1)$$

$$S_{MD} = \frac{\tau_i}{\gamma R} \quad (2)$$

Em que: Q é a vazão; t é o tempo; x é a distância na direção do escoamento; g é a aceleração da gravidade; A é a área molhada da seção transversal; z é a profundidade da lâmina d'água; τ_i é uma tensão de cisalhamento interna do fluido que resulta dos modelos reológicos; γ é o peso específico do fluido; e R é o raio hidráulico.

As equações de escoamento bidimensional não-newtoniano do modelo HEC-RAS são as equações de águas rasas (*shallow water equations*) ou equações de Saint Venant e a equação de onda de difusão. Pelo rigor de cálculo, as simulações de inundações causadas por rompimentos de

barragens preferencialmente devem ser realizadas com as equações de Saint Venant. O HEC-RAS resolve as equações de águas rasas, em duas dimensões, para a propagação da onda de cheia de escoamento de fluidos não-newtonianos. A simulação bidimensional ocorre pela resolução das equações de conservação de massa e conservação de momento (USACE, 2020). A equação de conservação de massa é dada por (USACE, 2020):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (hV) = q \quad (3)$$

Em que: η é a elevação da superfície do escoamento; t é o tempo; h é a profundidade da água; V é o vetor velocidade; e q é um termo de fonte ou sumidouro que contabiliza eventuais fluxos internos e externos.

A equação de conservação de momento usada no modelo HEC-RAS para escoamento bidimensional de fluido não-newtoniano, pode ser escrita como (HERGARTEN e ROBL, 2015 *apud* USACE, 2020):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -g \cos^2 \varphi \nabla \eta + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - \frac{\tau}{\rho_m R \cos \varphi |V|} \quad (4)$$

Em que: g é a aceleração da gravidade; v_t é uma viscosidade turbulenta; τ é a tensão basal total, soma da tensão turbulenta (τ_t) e da tensão de lama e detritos (τ_{MD}), que inclui todas as tensões não-newtonianas; ρ_m é a densidade da mistura água-sólido; R é o raio hidráulico; $|V|$ é a magnitude do vetor velocidade; φ é a inclinação da superfície da água; e ψ é o ângulo de inclinação da direção da velocidade.

A escolha do modelo reológico matemático mais adequado para descrever o escoamento de um fluido não-newtoniano depende das características do escoamento. De acordo com O'Brien e Julien (1985), com base na concentração de sedimentos e no tamanho das partículas é possível classificar a mistura fluido-sedimento. No entanto, a divisão dos tipos de fluxos hiperconcentrados em classificações estabelece limites artificiais e descontinuidades matemáticas, sendo um tanto arbitrária (USACE, 2020).

O'Brien e Julien (1985) descreveram os tipos de fluxos em função da concentração, volumétrica e mássica, de sedimentos (argilas e areias finas). Com base em diversos experimentos, os tipos de escoamento delineados conforme a concentração volumétrica foram: inundação de água, com concentração volumétrica (C_v) menor que 0,20; inundação de lama, onde $0,20 \leq C_v < 0,45$; fluxos de lama, sendo $0,45 \leq C_v < 0,50$; e deslizamentos de terra, em que $0,50 \leq C_v < 0,90$ (O'BRIEN e JULIEN, 1985). Os autores dividiram ainda esses intervalos segundo as características do escoamento, como por exemplo, a fluidez do escoamento, coesão e sedimentação das partículas.

No modelo HEC-RAS, a classificação utilizada partiu de quatro tipos de escoamentos não-newtonianos: fluxo hiperconcentrado, fluxo de lama e detritos, avalanche de neve e fluxo clástico (USACE, 2020). Segundo Rickenmann (1991), os limiares da classificação de fluxo hiperconcentrado e de lama e detritos é a concentração volumétrica, sendo respectivamente, $C_v > 30\%$ e $C_v > 60\%$. Com base na literatura e em experimentos realizados, o HEC-RAS admite a seguinte classificação de fluxo não-newtoniano: (1) fluxo hiperconcentrado, quando $C_v > 5\%$ e existe tensão de escoamento e perdas viscosas; (2) fluxo de lama, quando há turbulência entre partículas; (3) fluxo de detritos, quando o número de Bagnold (N_{BAG}) é maior que 40 e ocorre colisão entre grãos; e (4) fluxo clástico, quando o número de atrito (N_{fri}) é superior a 100 e o processo de perda interna do material é uma matriz rígida (USACE, 2020; GIBSON *et al.*, 2020). O número de Bagnold é definido pela razão entre a tensão inercial do grão e a tensão de cisalhamento viscosa, e o número de atrito, é a razão da tensão de atrito entre grãos pela tensão de cisalhamento viscosa (IVERSON, 1997).

Apoiado nessa classificação, o HEC-RAS dispõe de quatro modelos reológicos distintos, sendo recomendados os modelos matemáticos mais adequados para representar o comportamento da mistura sólido-água (USACE, 2020; GIBSON *et al.*, 2020): o modelo de Bingham para o fluxo hiperconcentrado, os modelos O'Brien (Quadratic) e Generalized Herschel-Bulkley para o fluxo de lama e de detritos, e o modelo Clastic-Grain Flow (modelo geotécnico de Mohr-Coloumb) para o

fluxo clástico. Frequentemente, os modelos reológicos usados para representar o escoamento de rejeitos de minério são os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley (Bingham generalizado) (ZENGENI, 2016; CONTRERAS *et al.*, 2020; SILVA, 2020; LIGIER, 2020). Resultados experimentais de laboratório de Qian e Wan (1986) *apud* Julien (1995) confirmaram que sob taxas de deformações observadas em campo, fluidos com altas concentrações de partículas finas se comportam como fluidos plásticos de Bingham. Nesse trabalho, o enfoque é dado a esses modelos pela composição dos rejeitos de minério, que são fluidos hiperconcentrados de partículas finas.

O modelo de Bingham foi desenvolvido em 1922 com base no fenômeno de limite de escoamento, idealizado por Bingham, no qual existe um valor residual para a tensão de cisalhamento que deve ser excedido para que o material apresente um comportamento viscoso. O fluido plástico de Bingham apresenta a característica de se comportar como um sólido até que uma tensão de cisalhamento mínima seja ultrapassada, tendendo a não deformar com a aplicação de pequenas tensões de cisalhamento (FERREIRA, 2007). No modelo de Bingham, a relação tensão de cisalhamento e taxa de deformação é linear, conforme equações a seguir (BINGHAM, 1922 *apud* JULIEN, 1995).

$$\tau = \tau_y + \mu_m \frac{dv_x}{dz}, \quad \tau > \tau_y \quad (5)$$

$$\frac{dv_x}{dz} = 0, \quad \tau < \tau_y \quad (6)$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento; τ_y é a tensão de cisalhamento inicial ou limite; μ_m é a viscosidade dinâmica da mistura ou viscosidade plástica; e dv_x/dz é a taxa de deformação ou gradiente de velocidade.

O modelo de Herschel e Bulkley foi desenvolvido em 1926, com base no modelo de Bingham, com o objetivo de incorporar a curva de fluxo não-linear para tensões superiores a τ_y (TARCHA, 2014). Nesse modelo reológico a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação apresentam uma relação não-linear, sendo uma proposta generalizada do fluido plástico de Bingham. Essa relação depende do expoente adimensional n , característico para cada fluido e determinado experimentalmente (FERREIRA, 2007). Esse coeficiente é chamado de índice de comportamento no qual seu valor indica a característica do fluido: o fluido é pseudoplástico quando $n < 1$; newtoniano quando $n = 1$; ou dilatante quando $n > 1$ (TARCHA, 2014). Além do índice de comportamento n , o índice de consistência K também é um parâmetro empírico (O'BRIEN e JULIEN, 1988). Essa relação é dada por (HERSCHEL e BULKLEY, 1926 *apud* O'BRIEN e JULIEN, 1988; USACE, 2020):

$$\tau = \tau_y + K \left(\frac{dv_x}{dz} \right)^n, \quad \tau > \tau_y \quad (7)$$

$$\frac{dv_x}{dz} = 0, \quad \tau < \tau_y \quad (8)$$

Em que: K é o índice de consistência e n é o índice de comportamento.

Na simulação de inundações, as incertezas associadas à caracterização reológica de fluidos hiperconcentrados e aos modelos, interferem no objetivo de simular o mais fielmente possível a propagação da inundação. Dessa forma, a análise de sensibilidade dos modelos de propagação de ondas de inundação é uma ferramenta importante para avaliar os impactos dessas incertezas nos resultados simulados. Para isso, é fundamental se obter a caracterização dos parâmetros reológicos e suas faixas de variação em função de incertezas de diferentes ordens.

PARÂMETROS REOLÓGICOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Na modelagem de inundações que envolvem fluidos hiperconcentrados, os parâmetros reológicos são importantes, pois descrevem o comportamento desses fluidos ao escoar. Os parâmetros ou propriedades reológicas dos rejeitos de mineração concernem à associação entre a tensão e a

deformação no escoamento, que traduzem as características físicas e cinemáticas, bem como propriedades mecânicas desse material. Assim, a determinação de parâmetros reológicos permite o cálculo da velocidade do fluxo de rejeitos, vazão e impacto do fluxo do material e possibilita a prevenção e controle de acidentes de barragens de rejeitos (WANG *et al.*, 2018). De acordo com Zengeni (2016), alguns dos fatores que interferem nas propriedades reológicas são a taxa de cisalhamento, concentração de sólidos, pH e temperatura, dos quais considera esse último o fator que as propriedades são mais sensíveis. Dessa forma, estudos recentes buscam caracterizar o comportamento de rejeitos e identificar as incertezas relacionadas aos diferentes parâmetros reológicos, que levam a imprecisões na modelagem de inundações.

Faitli e Gombkötő (2015) executaram testes reológicos em suspensões finas de materiais industriais: areias, cinzas volantes, perlita, rejeitos e lama vermelha. As medições foram realizadas com os equipamentos viscosímetro rotacional e viscosímetro de tubo. Foram obtidos valores de viscosidade e tensão de cisalhamento inicial a partir de fluidos com comportamentos newtonianos e plásticos de Bingham com variação da concentração volumétrica. Dentre os materiais estudados, é interessante para este trabalho os valores obtidos da caracterização reológica dos rejeitos de mina de metal base em Gyöngyösorszi.

Zengeni (2016) desenvolveu correlações das tensões de escoamento e viscosidades plásticas com o modelo de Bingham em função da concentração mássica para aplicação no transporte de rejeitos de ouro por tubulações. O objetivo dessa avaliação foi de possibilitar a estimativa das propriedades reológicas de fluidos hiperconcentrados com base em propriedades físicas e reológicas da mistura. O autor realizou o ajuste de 30 amostras de rejeitos de ouro de diferentes minas, segundo o modelo de Bingham. As equações ajustadas foram então aplicadas com base em outras seis amostras com o propósito de avaliar os erros das equações de previsão de tensão de escoamento e viscosidade.

Wang *et al.* (2018) avaliaram os fatores que influenciam nas propriedades reológicas de rejeitos da mineração de ouro, cobre e ferro. O equipamento utilizado na determinação dos parâmetros foi um reômetro cilíndrico coaxial. Os autores avaliaram a influência de quatro fatores nas propriedades reológicas dos rejeitos, viscosidades e tensões de cisalhamento: tipo de minério, tamanho da partícula do rejeito, concentração volumétrica e taxa de cisalhamento. Os autores ajustaram os resultados por meio da função exponencial de Bingham. Os resultados mostraram que, comparados aos demais rejeitos estudados, os rejeitos de minério de ferro apresentaram maior viscosidade e maior tensão de cisalhamento. Os fatores tamanho da partícula e taxa de cisalhamento causam maior influência na viscosidade e taxa de cisalhamento quando associados a concentrações volumétricas maiores.

Jeong (2019) mediu as tensões de escoamento de rejeitos de mina de pirofilita retirados de depósitos abandonados e potencialmente vulneráveis em Busan, República da Coreia. As medições das propriedades reológicas, tensões de cisalhamento e viscosidades, foram realizadas com um sistema de medição de esferas, adequado para partículas grandes. Os dados medidos foram ajustados segundo os modelos reológicos de Bingham, Bilinear, Bingham Modificado, Hershel-Bulkley e Power Law e assim o autor obteve os valores de parâmetros reológicos de cada modelo.

A variabilidade dos parâmetros reológicos foi estudada por Contreras *et al.* (2020), que desenvolveram uma metodologia baseada em estatística de dados medidos para estimar as incertezas na caracterização reológica e a variabilidade dos parâmetros derivados dos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley. Os autores realizaram medições e abordaram erros e incertezas em medições de caracterização reológica de fluidos minerais concentrados. A partir dos dados experimentais, os autores calcularam estatisticamente o quadro de variabilidade das medições com o uso da distribuição de t de Student com intervalos de confiança de 95%. No estudo da variação dos parâmetros de reologia, a contribuição de Contreras *et al.* (2020) se dá na simulação de todas as curvas experimentais possíveis dentro do quadro de variabilidade calculado estatisticamente. Assim, os autores admitiram distribuições estatísticas para cada parâmetro reológico e realizaram a simulação de Monte Carlo para avaliar a variabilidade desses parâmetros.

Ligier (2020) apresentou a implementação de modelos reológicos no modelo hidrodinâmico TELEMAC-2D. A aplicação considerada pelo autor consiste principalmente na modelagem de fluxos de lama, de rompimentos de barragens de rejeitos por meio de liquefação e com concentrações volumétricas acima de 40%. O autor acoplou no TELEMAC-2D os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley e apresentou quatro exemplos de validação e aplicação do modelo hidrodinâmico. Uma das aplicações foi a modelagem do rompimento da barragem de Brumadinho que foi comparada pelo autor com observações de campo e outras simulações realizadas. Assim, o autor apresenta os parâmetros reológicos utilizados na retroanálise da ruptura da barragem de rejeitos de Brumadinho.

Outros autores já desenvolveram estudos semelhantes no passado, como Jeyapalan *et al.* (1983) que realizaram uma série de experimentos reológicos, aplicaram o modelo plástico de Bingham e compararam os resultados das análises com movimentos de fluxos observados em casos reais de rompimentos de barragens. O'Brien e Julien (1988) descreveram as propriedades físicas de fluxos de lamas com C_v entre 0,10 e 0,45, a partir de medições laboratoriais das propriedades reológicas. Mais recente, Machado (2017) executou ensaios reológicos de rejeitos de minério de ferro coletados ao longo do trecho inundado pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG e realizou a retroanálise do acidente considerando fluido hiperconcentrado no modelo FLO-2D. No mesmo ano, Deng *et al.* (2017) efetuaram uma série de testes reológicos com rejeitos de uma mina de ouro com o objetivo de avaliar o atendimento aos requisitos de bombeamento da mistura.

Zegers *et al.* (2020) não tiveram como objeto de estudo rejeitos de minério, contudo realizaram uma interessante análise de sensibilidade do modelo FLO-2D a parâmetros reológicos de escoamentos naturais de lama. O objetivo dos autores foi avaliar a influência da variação desses parâmetros nos resultados de extensão da inundação, velocidade e profundidade máximas, e volume de sedimentos depositado ao longo da propagação da inundação. O método utilizado por Zegers *et al.* (2020) para realizar a análise de sensibilidade foi a Avaliação Distribuída de Análise de Sensibilidade Local (DELSA), que é um método local-global híbrido. Para variação dos parâmetros, os autores usaram o método *Latin Hypercube Sampling* (LHS), um método estatístico que gera uma amostra quase aleatória de valores de parâmetros a partir de uma distribuição multidimensional, que provou ser mais eficiente que outros métodos, como por exemplo, a amostragem de Monte Carlo. Os autores apresentaram faixas de valores de parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley levantadas a partir de estudos anteriores, com foco em inundações naturais em locais com topografia acentuada e eventos de chuva que causaram carreamento de sedimentos. Nos resultados obtidos por Zegers *et al.* (2020), observou-se que modelo FLO-2D é sensível principalmente ao parâmetro beta 1 que compõe a curva reológica da viscosidade, afetando sobretudo os resultados da profundidade do fluxo simulado.

Na Tabela 1 estão dispostos, com base nos estudos descritos, intervalos de valores de parâmetros reológicos, com o propósito futuro de desenvolver análises de incertezas em simulações de inundações causadas por rompimentos de barragens de rejeitos com o HEC-RAS. Na escolha dos parâmetros consideraram-se os dados de entrada necessários na modelagem de fluido não-newtoniano com o HEC-RAS para os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley. De acordo com a USACE (2020), para o modelo reológico de Bingham são necessários dois parâmetros, a tensão de cisalhamento inicial e a viscosidade plástica. Para a tensão de cisalhamento limite a abordagem padrão é o método exponencial em função da concentração volumétrica e dos parâmetros empíricos ou coeficientes de calibração a e b . Segundo a USACE (2020), a maioria dos modelos não-newtonianos são muito sensíveis à concentração volumétrica (C_v). A equação exponencial é a apresentada a seguir.

$$\tau_y = ae^{bC_v} \quad (9)$$

No cálculo da viscosidade plástica, a abordagem padrão é o método Maron e Pierce que é muito utilizado por não serem necessários dados de entrada (USACE, 2020). Mesmo assim, a viscosidade dinâmica é calculada com base na proporção entre C_v e $C_{v\text{máx}}$ (concentração volumétrica máxima),

onde este último é um parâmetro editável que sempre deve ser maior que C_v (USACE, 2020). No modelo reológico de Herschel-Bulkley são necessários três parâmetros: a tensão de cisalhamento limite, o índice de consistência (K) e o índice de comportamento (n) (USACE, 2020).

Tabela 1 – Intervalos de parâmetros reológicos para uso na modelagem de inundações

Parâmetro	Valores	Unidades (Observações)	Referência	Rejeitos	Equação ajustada
C_v	18,0 - 52,5	%	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	-
	9,3 - 48,4		Zengeni (2016)	Ouro	-
	34,75 - 54,87		Machado (2017)	Ferro	-
	47,0		Ligier (2020)	Ferro	-
$C_{v\max}$	53,0	%	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	-
μ	0,002 - 0,311	Pa.s	Zengeni (2016)	Ouro	Bingham
	0,0071 - 0,4457		Machado (2017)	Ferro	Quadrática
	1,09 - 1,46		Jeong (2019)	Pirofilita	Bingham
	50,0		Ligier (2020)	Ferro	Bingham
τ_y	26,0 - 638,0	Pa	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Bingham
	0,5 - 181,0		Zengeni (2016)	Ouro	Bingham
	0,09 - 118,00		Machado (2017)	Ferro	Quadrática
	12,0 - 23,0		Jeong (2019)	Pirofilita	Herschel-Bulkley
	9,7 - 251,9		Contreras <i>et al.</i> (2020)	Sintético	Herschel-Bulkley
	100,0 - 1000,0		Ligier (2020)	Ferro	Bingham
a	1,0	Pa (Cv decimal)	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Exponencial
	1,00E-07	Pa (Cv %)	Machado (2017)	Ferro	Exponencial
	~0,04 - 3,40		Wang <i>et al.</i> (2018)	Cobre	Exponencial
	~0,40 - 3,45		Wang <i>et al.</i> (2018)	Ferro	Exponencial
b	12,2	-(Cv decimal)	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Exponencial
	39,278	-(Cv %)	Machado (2017)	Ferro	Exponencial
	~0,003 - 0,050		Wang <i>et al.</i> (2018)	Cobre	Exponencial
	~0,003 - 0,055		Wang <i>et al.</i> (2018)	Ferro	Exponencial
K	0,69 - 1,96	-	Jeong (2019)	Pirofilita	Herschel-Bulkley
n	0,84 - 1,14	-	Jeong (2019)	Pirofilita	Herschel-Bulkley
	0,50 - 1,50	-	Ligier (2020)	Teórico	Herschel-Bulkley

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos que estudam as propriedades reológicas dos fluidos para aplicação em modelagem de inundações decorrentes de rompimentos de barragens são escassos. No que concerne a modelagem de inundações de escoamento hiperconcentrado, adicionam-se novas incertezas à análise de risco, sendo necessária a avaliação dos modelos hidrodinâmicos e possíveis sensibilidades dos modelos a parâmetros, que influam nos resultados de profundidades, velocidades e tempos de chegada. Neste estudo foi elaborada uma breve revisão sobre a reologia de rejeitos de mineração e sua aplicação na modelagem de inundações, com intuito de utilização dos parâmetros em estudos de rompimentos de barragens. Os principais estudos abordados foram os de Faitli e Gombkötő (2015), Zengeni (2016), Machado (2017), Wang *et al.* (2018), Jeong (2019) e Ligier (2020), Contreras *et al.* (2020), Zegers *et al.* (2020), e Chácara e Oliveira Filho (2021).

Um dos maiores desafios relativos a incertezas nas modelagens de escoamentos hiperconcentrados se dá na elevada variabilidade dos parâmetros reológicos. Silva (2020) enfatizou a importância da calibração dos modelos reológicos para propagação da onda de inundação, como por exemplo, estudos de retroanálise dos casos em Mariana/MG e Brumadinho/MG. Isso dado que, esses acontecimentos tiveram comportamentos muito diferentes, mesmo que em ambos casos o tipo de rejeito era minério de ferro, no mesmo estado (Minas Gerais) e do mesmo grupo econômico.

Nesses casos a concentração volumétrica e a densidade podem ter conduzido a resultados muito distintos (SILVA, 2020). Os modelos reológicos também devem ser avaliados com o objetivo de selecionar o mais acertado para representar o fluido em estudo e nesse sentido, existem estudos antigos como Jeyapalan *et al.* (1983) e estudos recentes como Wang *et al.* (2018) e Jeong (2019).

A versão atual do HEC-RAS (6.0) dispõe de quatro modelos reológicos, possibilitando a simulação e mapeamento de inundações considerando a premissa de escoamento não-newtoniano. Essa novidade abre também uma perspectiva ampla em termos de pesquisa visto que o modelo HEC-RAS é gratuito e amplamente utilizado em escala mundial, apresentando também a possibilidade de automação de processos (BEZERRA e ELEUTÉRIO, 2021; DA SILVA *et al.*, 2021).

Perspectivas interessantes para novos estudos são relativas a temas como variações probabilísticas dos parâmetros reológicos, que podem imprimir mais confiança nos resultados obtidos frente a modelagens determinísticas. A automatização de análises de incertezas por meio de linguagem computacional se torna um caminho promissor para abordar espectros importantes relacionados ao tema. Um cuidado necessário nesse tipo de análise se dá quanto ao sentido físico dos parâmetros reológicos que não pode ser abandonado em virtude da análise matemática, e nesse sentido, os valores levantados nesse trabalho permitem balizar alguns desses testes. Uma revisão de literatura mais ampla está em desenvolvimento para subsidiar esse tipo de estudo.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG, e à PRPq/UFMG pelo amparo concedido para o desenvolvimento das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- AZAM, S.; LI, Q. (2010). “*Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years*”. Geotech. News. 28.
- BEZERRA, R.; ELEUTÉRIO, J. (2021). “*Automatização de simulações probabilísticas de inundações com o Python e HEC-RAS 2D: incertezas no coeficiente de Manning*”. Submetido ao XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil.
- CHÁCARA, D. M.; OLIVEIRA FILHO, W. L. (2021). “*Rheology of mine tailings deposits for dam break analyses*”. REM - International Engineering Journal, 74(2), 235-243. Epub March 29, 2021. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020740098>.
- COELHO, T. P. (2018). “*Minério-Dependência em Brumadinho e Mariana*”. Revista Lutas Sociais. PUC-SP: São Paulo, 2018.
- CONTRERAS, S. *et al.* (2020). “*A new statistically-based methodology for variability assessment of rheological parameters in mineral processing*”. Minerals Engineering, Volume 156, 2020, 106494, ISSN 0892-6875.
- DA SILVA, A.; BEZERRA, R.; ELEUTÉRIO, J. (2021). “*Automatização do HEC-RAS para geração probabilística de hidrogramas de ruptura de barragens por galgamento*”. Submetido ao XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil.
- DAVIES, M. (2002). “*Tailings impoundment failures: are geotechnical engineers listening?*”. Geotechnical News, 20, 31–36.
- DENG, D. Q. *et al.* (2017). “*A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine*”. Journal of Environmental Management, Volume 196, 2017, Pages 100-109, ISSN 0301-4797.
- DIAS, N. A. (2017). “*Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional*”. 2017. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

- FAITLI, J.; GOMBKÖTŐ, I. (2015). “Some technical aspects of the rheological properties of high concentration fine suspensions to avoid environmental disasters”. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 23:2, 129-137.
- FERREIRA, D. S. (2016). “Análise do comportamento de aterro experimental executado sobre um depósito de rejeitos finos”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Geotecnia. 145pg, 2016.
- FERREIRA, E. E. et al. (2005). “Reologia de suspensões minerais: uma revisão” p. 83-87. Ouro Preto, Minas Gerais.
- FERREIRA, F. de O. (2007). “Abordagem matemática de roll waves em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre”. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira (SP), 2007.
- GIBSON, S. et al. (2020). “Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS”. *Earth Surf Process Landforms*. 46: 540– 553.
- HUANG, X. et al. (2013) “Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates”. *Construction and Building Materials*, vol. 44. 2013. pp. 757–764.
- IVERSON, R. M. (1997). “The physics of debris flows”. *Reviews of Geophysics*, 35, 245–296.
- JEONG, S-W. (2019). “Shear Rate-Dependent Rheological Properties of Mine Tailings: Determination of Dynamic and Static Yield Stresses”. *Applied Sciences*. 9(22):4744.
- JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. (1983). “Investigation of flow failures of tailings dams”. *J. Geotech. Eng. Div.* 109 (2) (1983) 172–189.
- JULIEN, P.Y. (1995). *Erosion and sedimentation*. Melbourne: Cambridge University Press. 280p.
- LIGIER, P. L. (2020): “Implementation of non-Newtonian rheological models in TELEMAC-2D”. In Online proceedings of the papers submitted to the 2020 TELEMAC-MASCARET User Conference October 2020. Antwerp: International Marine & Dredging Consultants (IMDC). S. 14-25.
- 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, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- MEZGER, T. G. (2006). *The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*. Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover, Germany.
- O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. (1988). “Laboratory analysis of mudflow properties”. *J. Hydraul. Eng.*, 114, 877–887, 1988.
- O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. (1985). “Physical Properties and Mechanics of Hyperconcentrated Sediment Flows”. *Proc. ASCE Hyd. Div. Spec. Conf on Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow Hazards*, Logan Utah, June 1984, 260–279.
- PALÚ, M. C.; JULIEN, P.Y. (2019). “A review of tailings dam failures in Brazil”. 24 to 28 November 2019, Conference: XXIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídrico. Foz do Iguaçu, Brasil.
- PULLUM, L.; BOGER, D. V.; SOFRA, F. (2018) “Hydraulic mineral waste transport and storage”. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 58, p. 157-185, 2018.
- RICKENMANN, D. (1991). “Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes”. *J. Hydraul. Eng.*, 117(11), 1419–1439.

SILVA, C. F. (2020). “*Barragens de rejeitos: Considerações sobre ruptura utilizando um fluido não-newtoniano*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

TARCHA, B. A. (2014). “*Desafios na medição da tensão limite de escoamento de óleos parafínicos*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2020). “*HEC-RAS 6.0, Mud and Debris Flow Manual (Beta Release Draft)*”. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2020.

WANG, X.; WEI, Z.; LI, Q. (2018). “*Experimental research on the rheological properties of tailings and its effect factors*”. *Environ Sci Pollut Res* 25, 35738–35747 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3481-1>.

ZEGERS, G. *et al.* (2020). “*Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling*”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 20, issue 7, NHESS, 20, 1919–1930, 2020.

ZENGENI, B. T. (2016). “*Bingham Yield Stress and Bingham Plastic Viscosity of Homogeneous Non-Newtonian Slurries*”. Bellville, Western Cape, South Africa: Cape Peninsula University of Technology.