

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ALTERNATIVAS PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS COM PROPAGAÇÃO DE FLUIDOS HIPERCONCENTRADOS NO SOFTWARE HEC-RAS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

Marcelle Gressler¹; Fernando Mainardi Fan² & Arthur da Fontoura Tschiedel³

Abstract: In compliance with ANM Resolution No. 95/2022, ore dam break simulations in Brazil must be performed using two-dimensional simulation and considering the fluid rheology. Since its 6th version, HEC-RAS, a software commonly applied for DamBreak simulations with Newtonian fluids, has implemented the possibility of simulating fluids with different rheologies. Therefore, this study aims to qualitatively examine the available alternatives in the model for simulating tailings in ore dams. Five modeling scenarios were compared: water (C1), two scenarios with an increased Manning coefficient in the downstream valley (C2 and C3), and two other scenarios considering the fluid rheological properties through two different methodologies (C4 and C5). The results indicate that C1, C4, and C5 exhibit the most similarity to each other, but they differ in terms of maximum speed in the region just downstream of the reservoir, which is typically utilized to delineate the Self-Rescue Zone (Zona de Autossalvamento – Brazilian Law 12.334/2010).

Resumo: Em atendimento à Resolução ANM nº95/2022, as simulações de *DamBreak* envolvendo barragens de minério no Brasil devem ser realizadas com simulação bidimensional e considerando a reologia do fluido. A partir de sua 6ª versão, o HEC-RAS, *software* comumente utilizado para estudos de *DamBreak* com fluidos newtonianos implementou a possibilidade de simulação de fluidos com diferentes reologias. Assim, este estudo se propõe a estudar qualitativamente as alternativas disponíveis no modelo para simulação de rejeitos. Foram comparados cinco cenários de modelagem: água (C1), dois cenários com aumento do coeficiente de Manning no vale de jusante (C2 e C3) e outros dois cenários considerando propriedades reológicas do fluido por duas metodologias diferentes (C4 e C5). Os resultados apontam que C1, C4 e C5 são os mais semelhantes entre si, mas apresentam diferenças nas velocidades máximas na região logo a jusante do reservatório, tipicamente utilizadas para delimitação da Zona de Autossalvamento.

Palavras-Chave – *DamBreak*; barragem de rejeitos; não-newtoniano;

1. INTRODUÇÃO

O setor mineral é um relevante ator da economia brasileira, sendo, em 2021, responsável por mais de 3% do PIB do país (SANTOS, 2021). Atrelada à exploração mineral, está a utilização de barramentos para a disposição dos rejeitos da produção, em meio aquoso. Atualmente, existem mais de 900 barramentos com esta finalidade no Brasil (ANM - SIGBM, 2022). Independente da finalidade do barramento, acidentes e incidentes relacionados às barragens tem potencial de gerar danos no vale de jusante, ocasionando perdas econômicas, ambientais e sociais. No caso específico das barragens de mineração, que contém rejeitos em seus reservatórios, poderá ocorrer, no caso de um rompimento, a liberação de fluidos com diferentes concentrações de partículas sólidas em suspensão e eventuais aditivos utilizados no processo.

1) Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), marcellegressler@gmail.com

2) Prof. Dr. Em Recursos Hídricos, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, fernando.fan@ufrgs.br

3) Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS). Hidrodinâmica Engenharia, arthurschiedel@hidrodinamicaeng.com.br

Devido a estes riscos, em 2010 foi instituída a Lei 12.334/2010, que embasa a Política Nacional de Segurança de Barragens. No caso de barragens de mineração, em 2022 foi promulgada a Resolução ANM nº 95, alterada pela Resolução ANM nº 130/2023, que consolida os atos normativos que dispõe sobre segurança de barragens de mineração e cita, no parágrafo 2º do artigo 6º, que, em casos de Dano Potencial Associado alto, o mapeamento do deslocamento da mancha de inundação para definição da Zona de Autossalvamento deve ser realizado por modelagem matemática bidimensional e que contemple, dentre outros aspectos, a caracterização geotécnica e a reologia dos fluidos simulados.

Assim, de forma a seguir as diretrizes estabelecidas por estes documentos, muitas vezes é necessária a realização simulações de *DamBreak*, e um dos softwares mais comumente utilizados é o HEC-RAS (USACE, 2022), que, a partir da sua versão 6.0 permite a simulação de fluidos com inserção de características reológicas, ou seja: não-newtonianos/hiperconcentrados.

Assim, considerando a relevância da realização de estudo coerentes de rompimentos de barragens de rejeitos, especialmente para o atendimento às legislações relacionadas com a segurança socioambiental do vale de jusante, o presente trabalho realizou simulações hidrodinâmicas bidimensionais (2D) no *software* HEC-RAS versão 6.2.1 para avaliar o rompimento de uma barragem de rejeitos a partir da comparação de cinco cenários para a propagação do fluido hiperconcentrado no vale de jusante.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Fundamentos para consideração da reologia dos fluidos no HEC-RAS

O'Brien et. al. (2011) afirma que o comportamento reológico de fluidos hiperconcentrados por partículas em suspensão varia em sua forma de controle da coesão, que é a característica de força de atração entre os componentes de um corpo: em fluidos menos concentrados, há predominância da dissipação de energia na forma de atrito com as superfícies por onde escoam. Por outro lado, em fluidos com grande concentração de sólidos suspensos, a dissipação de energia passa a ocorrer de forma intrínseca ao fluido, aumentando a predominância na dispersão de energia por colisões entre as partículas em relação ao atrito.

O *software* HEC-RAS tem sido amplamente aplicado em simulações hidrodinâmicas do rompimento de barragens de água. Entretanto, não permitia a simulação de fluidos não-newtonianos até o lançamento da versão 6.0, em 2020. Assim, uma prática adotada era a utilização de coeficientes de Manning elevados (2.1.1), com o objetivo de simular os efeitos da propagação desses fluidos em interação com a planície. A partir da versão 6.0, há a possibilidade de inserção de características reológicas de fluidos e da consideração de diferentes metodologias para a simulação de fluidos hiperconcentrados (2.1.2).

2.1.1. Simulação de fluidos hiperconcentrados com aumento do coeficiente de Manning

Esta metodologia foi descrita por VENTURA (2011), tendo sido aplicada em estudos como o de MACHADO et. al (2017), baseados na equação 1, que resulta em um valor multiplicador do coeficiente de Manning original definido para o local. Ressalta-se que esta equação é aplicada para fluidos em regime turbulento.

$$n_{bulked} = \left(\frac{\nu}{\nu_{bulked}} \right)^{1/9} * n \quad 1 \quad \nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 2$$

Onde: n_{bulked} é o coeficiente de Manning para o escoamento hiperconcentrado ($s.m^{-1/3}$); ν é a viscosidade cinemática da água (m^2/s) e ν_{bulked} é a viscosidade cinemática do escoamento hiperconcentrado (m^2/s), μ é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s) e ρ é a massa específica (kg/m^3).

2.1.2. Simulação de fluidos hiperconcentrados com inserção de propriedades reológicas no software HEC-RAS

As metodologias disponíveis para inserção das tensões de cisalhamento no HEC-RAS são descritas por USACE (2022) e Gibson et. al (2020) e são baseadas na DebrisLib (FLOYD et. al, 2020). Elas variam principalmente em função da concentração percentual volumétrica de partículas no fluido e, conseqüentemente, da forma de interação entre as partículas no que diz respeito à dissipação de energia - e de sua respectiva tensão de cisalhamento. A Figura 1 apresenta o equacionamento utilizado pelo modelo, separando suas parcelas em relação à classificação (ver Tabela 1). A Tabela 1, complementar à Figura 1, apresenta um resumo das metodologias conforme descritas por Gibson et. al (2020), USACE (2022) e FLOYD et. al (2020), além de apresentar melhor detalhamento na descrição dos métodos e as concentrações volumétricas para cada faixa simulada.

Figura 1 - Equação para modelagem de fluidos não-newtonianos no HEC-RAS separada em parcelas de acordo com a concentração do fluido simulado (ver Tabela 1)

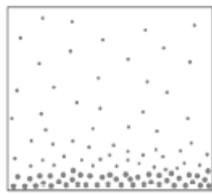
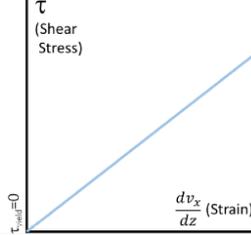
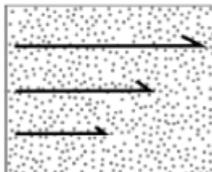
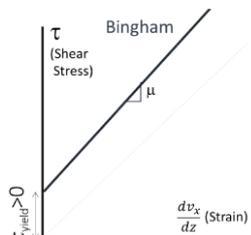
$$\tau = \underbrace{\tau_y + \mu * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)}_{01 - Plásticos de Bingham} + \underbrace{\rho_m * l_m^2 * \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2}_{02 - Mudflow} + \underbrace{0,01\rho_s * \left(\left(\frac{0,615}{C_v}\right)^{1/3} - 1\right)^{-2} * d_s^2 \left(\frac{dV_x}{dz}\right)^2}_{03 - Fluxos de detritos}$$

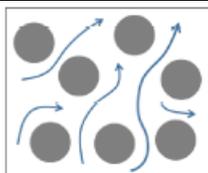
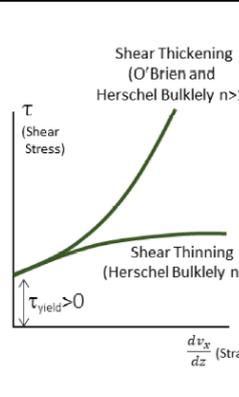
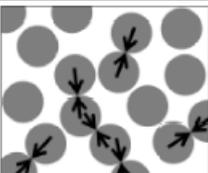
Concentração de sólidos em suspensão

Fonte: adaptado de USACE (2022).

Onde: τ é a tensão cisalhante que deve ser aplicada para locomoção do fluido; τ_y é a taxa de tensão de cisalhamento interna; μ é a viscosidade dinâmica; ρ_m é a massa específica da mistura; ρ_s é a massa específica do sólido, d_s é o diâmetro representativo dos grãos; l_m é a velocidade de mistura de Prandtl e C_v é a concentração volumétrica do fluido.

Tabela 1 - Resumo das metodologias de simulação de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS a partir da versão 6.0

Classificação do fluido e parcela da equação aplicada	Processo	Figura esquemática das carac. do fluido e interação dominante entre as partículas	Gráfico do modelo reológico*	Lim. de conc. de sólidos
Transporte de sedimentos – sem aplicação (simulação Newtoniana)	Fluido Newtoniano: relação linear entre a força a ser aplicada no fluido e a tensão de cisalhamento.			$C_v^{**} < 5\%$
Fluidos hiperconcentrados – parcela 01	Plástico de Bingham: a relação entre a força a ser aplicada no fluido e a tensão de cisalhamento segue linear, entretanto o coeficiente angular da relação aumenta em função da viscosidade dinâmica do fluido. Além disso, deve ser vencida a			$C_v^{**} > 5\%$

Classificação do fluido e parcela da equação aplicada	Processo	Figura esquemática das carac. do fluido e interação dominante entre as partículas	Gráfico do modelo reológico*	Lim. de conc. de sólidos
	resistência à tensão cisalhante inicial.			
Mudflow – parcela 02	Há um aumento da influência da turbulência entre partículas sobre o comportamento do fluido			Nº de Bagnold** * > 40
Fluxo de detritos – parcela 03	A colisão entre os grãos governa o comportamento do fluido, com a dissipação de energia por este contato se tornando dominante sobre a perda de energia por atrito.			

*"Shear stress" é a tensão de cisalhamento, enquanto "Strain" é a tensão a ser aplicada, em tradução livre, foi utilizada como a "força a ser aplicada" no restante da tabela.

** C_v é a concentração volumétrica

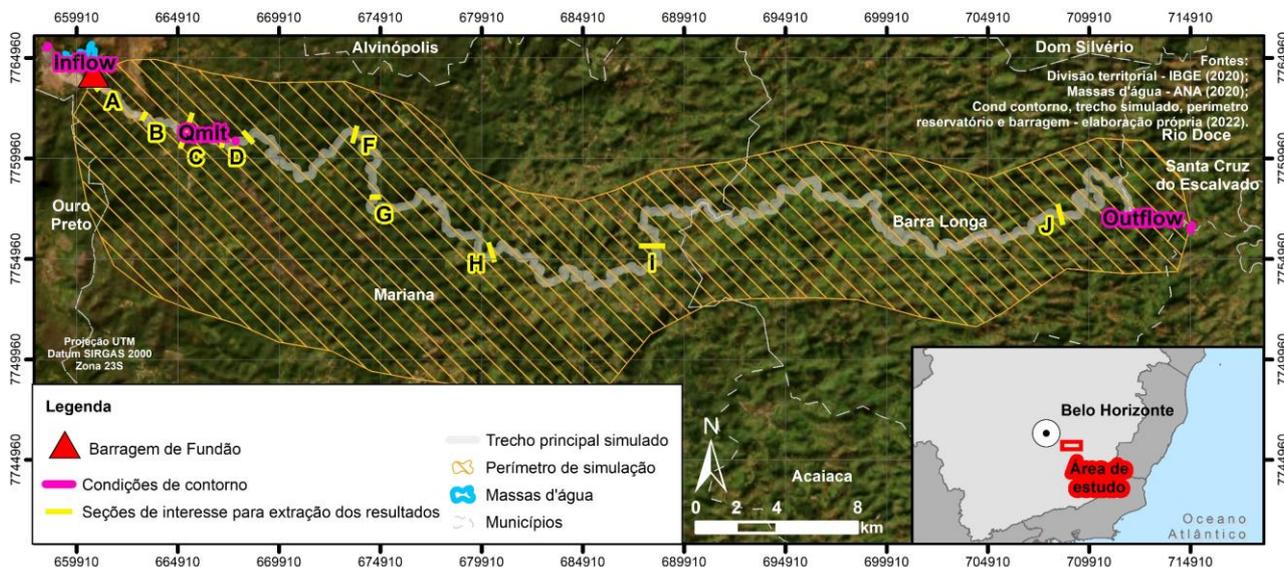
** O número de Bagnold é um número adimensional utilizado para caracterização reológica do fluido: até certo limite, há predominância da dissipação de energia por atrito, após, a dissipação predominante ocorre por colisões entre as partículas em suspensão (SOTERRONI, 2007).

Fonte: adaptado de Gibson et. al (2020), USACE (2022) e FLOYD et. al (2020).

2.2. Área de estudo

A área de estudo trata-se de um cenário de local fictício com dimensões baseadas na barragem de Fundão, a fim de que o modelo se mantivesse com dimensões físicas de uma barragem de rejeitos. Entretanto, como o objetivo do estudo não é simular e acertar o evento de rompimento, mas sim avaliar as diferenças entre metodologias do modelo hidrodinâmico em si, a simulação não foi realizada de forma que possa responder perguntas sobre este evento em específico. A área de estudo é apresentada na Figura 2, juntamente com a topologia do modelo e as seções de resultados, descritas no item 2.3.

Figura 2 – Localização da área de estudo, extensão do perímetro simulado, calha principal, condições de contorno e seções de resultados.



2.3. Topologia do modelo, condições de contorno, dados de entrada e seções de resultados

O modelo simulado foi o HEC-RAS, na versão 6.2. Em modelagem bidimensional, cujo equacionamento está descrito em USACE (2021), com a poligonal simulada (Figura 2) de células de 80 m e comprimento do trecho principal de 70 km a jusante. Ele foi montado a partir da inserção uma área de armazenamento (*storage area*), correspondente à CAV (MACHADO, 2017) do reservatório. O barramento simulado tinha sua cota da crista em 900 m (altura de 90 m), comprimento de 400 m, largura em contato com o solo de 130 m (BRANDÃO, 2019; SANDRONI, S; GUIDO, G, 2021). Além disso, foram inseridas as três condições de contorno (Figura 2): *Inflow* – condição de contorno externa de montante, posicionada a montante do reservatório, com vazão de entrada igual à zero, inserida apenas para possibilitar a modelagem do reservatório; Q_{mlp} – condição de contorno interna, onde foram inseridas as vazões médias de longo período regionalizadas para a bacia a partir das vazões específicas do rio do Carmo (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010) e *Outflow* – condição de contorno externa de jusante, baseada na declividade do local (0,0004 m/m – dado obtido a partir do MDE com base em geoprocessamento).

As seções de interesse para extração de resultados (Figura 2) foram selecionadas de forma a abranger seções cujo comportamento hidráulico fosse diferenciado entre si: seções mais abertas, ou mais fechadas ou com diferentes declividades.

2.3.1. Parâmetros de entrada

A topografia do vale de jusante foi inserida no modelo a partir do Modelo Digital de Elevação do SRTM de 30 m (FARR et al., 2007) e de um *stream burning* da calha principal de 3 m de profundidade, conforme características das estações fluviométricas 56336001 e 56337000. O coeficiente de Manning o canal foi adotado $0,03 \text{ s.m}^{-1/3}$ e para a planície de $0,06 \text{ s.m}^{-1/3}$ (USACE, 2021). E o tempo de formação da brecha foi estabelecido considerando que o rompimento ocorreu por liquefação, assim, foi de 1 min (baseado em vídeos do rompimento de barragens de rejeitos disponibilizados no YouTube por CASSIO, E. I e FORNI, J. J). A declividade dos taludes foi de 0,5 e largura do fundo de 50 m.

As características reológicas do fluido consideraram uma concentração volumétrica de 23% de rejeito em suspensão (BRANDÃO, 2019; FERREIRA, 2016; MORGENSTERN et al., 2016; MACHADO, 2017). A metodologia do aumento do coeficiente de Manning (2.1.1) foi realizada com base nos estudos de DIAS (2017) e de COELHO (1982), que sugerirem que para a concentração de 23% em volume (45% em peso), a tensão de escoamento é de 50 Pa e a taxa de formação viscosa é de 0,9 1/s. Já a aplicação das metodologias disponíveis no HEC-RAS 6.1 (2.1.2) considerou que a massa específica ponderada do minério é de $1599,24 \text{ kg/m}^3$, a tensão de escoamento é de 20,94 Pa e a viscosidade dinâmica é de 0,16 Pa.s.

2.4. Cenários simulados

Cenário 1 (C1) – cenário pensado com o objetivo de ser o controle para as simulações, tendo sido realizado com o Manning local (canal: 0,03 e planície: 0,06) e fluido propagado como água (não-newtoniano);

Cenário 2 (C2) – cenário correspondente à metodologia de aumento de Manning descrita por VENTURA (2011) para representação do fluido hiperconcentrado. Manning para fluido “hiperconcentrado” (canal: 0,06 / planície: 0,12) e reologia de fluido newtoniano.

Cenário 3 (C3) – cenário-teste com coeficiente de Manning aumentado em 6x. Manning para fluido “hiperconcentrado” (canal: 0,18 / planície: 0,36) e reologia de fluido newtoniano;

Cenário 4 (C4) – cenário correspondente à metodologia simulação para fluido não-newtoniano (plástico de Bingham), considerando como dado prévio a tensão de cisalhamento, a concentração

volumétrica e a viscosidade dinâmica. Manning determinado para o local (canal: 0,03 / planície: 0,06), reologia para fluido hiperconcentrado e simulação para plástico de Bingham;

Cenário 5 (C5) – cenário correspondente à metodologia simulação para fluido não-newtoniano (plástico de Bingham), considerando como dado prévio apenas a concentração volumétrica do fluido. Manning determinado para o local (canal: 0,03 / planície: 0,06), reologia para fluido hiperconcentrado e simulação para plástico de Bingham;

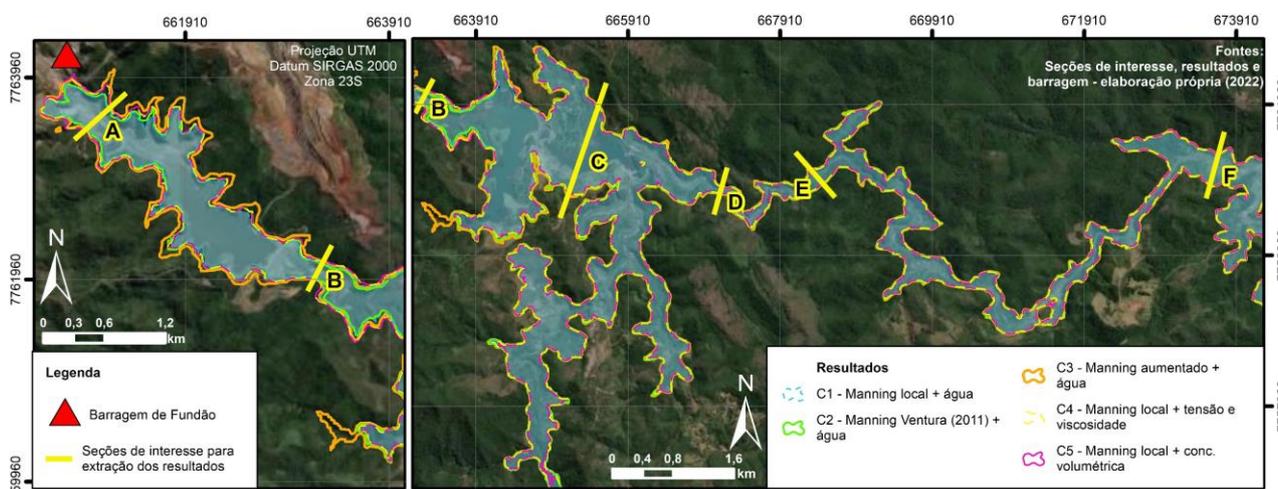
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Manchas de inundação

No que diz respeito às áreas das manchas de inundação, os resultados obtidos foram muito semelhantes para todas as simulações (C1 = 29,6 km²; C2 = 27,6 km²; 28,5 km²; C3 = 26,9 km²; C4 = 26,6 km² e C5 = 26,9 km²), com ligeiro aumento nas obtidas pelos cenários que consideraram o coeficiente de Manning. Este resultado provavelmente ocorreu devido ao aumento do atrito da água com a superfície, que pode gerar uma redução da velocidade do escoamento e um aumento na acumulação das lâminas d'água, efeitos que podem ter gerado um maior espalhamento do fluido.

A Figura 3 apresenta uma aproximação das manchas, que permite observar que a maior diferença entre as áreas resultantes ocorreu nas regiões logo a jusante do reservatório. Também se observa que os demais cenários (C1, C4 e C5) apresentam resultados de áreas praticamente coincidentes entre si. Ainda, a partir da seção C, onde há uma região de planícies geradas pelos reservatórios existentes no local simulado e, portanto, geração de grande dispersão da mancha, observa-se que as áreas passam a ficar mais próximas entre si, apresentando poucas diferenças concentradas em suas extremidades. Ao final da extensão de simulação as manchas praticamente coincidem entre si.

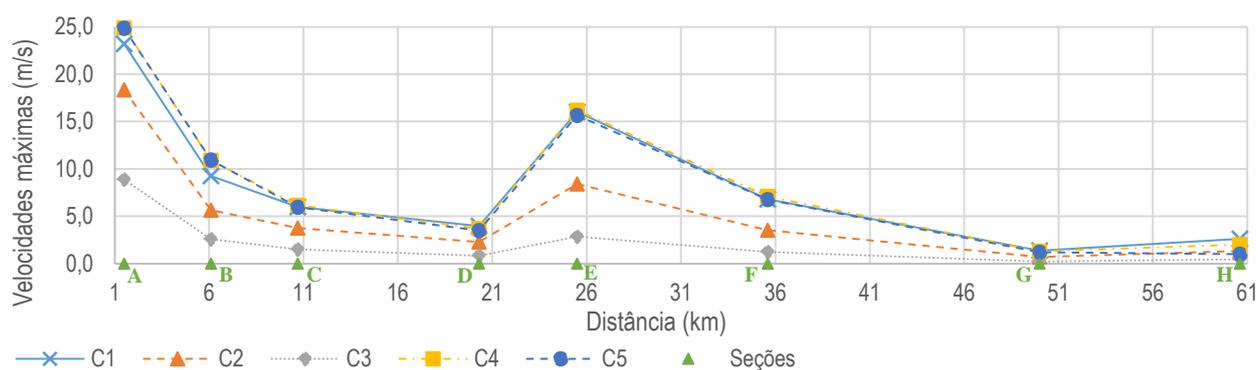
Figura 3 – Comparação entre as manchas simuladas nas proximidades de seções com características diferentes entre si – seções A, B, C, D, E e F



3.2. Velocidades máximas do escoamento e hidrogramas

Quanto às velocidades máximas, observa-se que, em geral, foram maiores para os cenários C4 e C5 (não-newtonianos) e menores para os cenários com o Manning aumentado (C2 e C3), corroborando com a hipótese de que o aumento a mancha de inundação ocorre em função do atrito com a superfície e do aumento da lâmina d'água. Quanto à razão para serem maiores nos cenários de inserção do comportamento não-newtoniano (C4 e C5), considera-se que a diferença pode ocorrer devido ao peso e diferenças de densidade e força geradas pelas partículas suspensas.

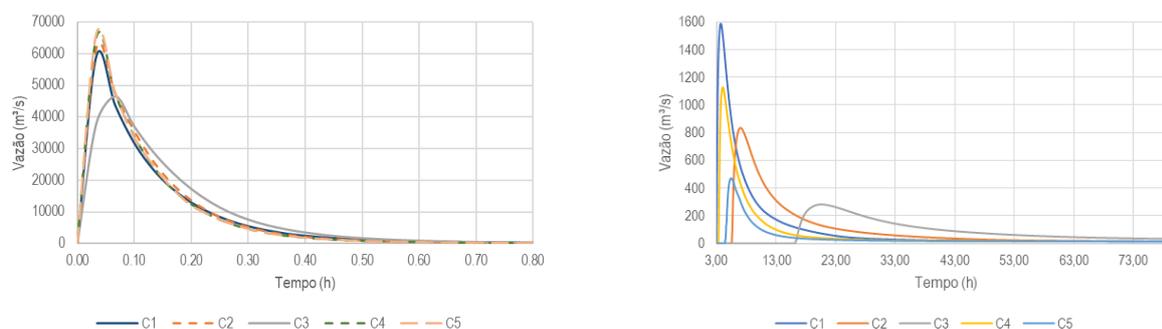
Figura 4 – Comparação entre as as velocidades máximas atingidas nas seções em cada um dos cenários



Observa-se, ainda, que a partir da seção C as velocidades dos cenários C4 e C5 se tornam, em geral, menores do que as dos demais cenários. Com os resultados aqui obtidos e a extensão das análises realizada, não foi possível determinar as causas para esta inversão de resultados, que podem estar sendo influenciados tanto pela topografia quanto pelas instabilidades locais do modelo e outros fatores, como as características reológicas inseridas nos C4 e C5.

A Figura 5 apresenta os hidrogramas da seção A e da seção H e permite avaliar impacto das diferentes dispersões de energia e quantidade de fluido ao longo da simulação: o C1 praticamente não dispersou volume e foi o mais rápido; o C2 dispersou volume, gerando profundidades mais elevadas a montante e, por isso, escoou mais devagar, chegando na seção H depois de 7h do rompimento, assim como o cenário C3 atingiu a seção H apenas depois de mais de 20 h do rompimento; o C4, cujas tensões de cisalhamento simuladas são menores do que o C5, também conservou boa quantidade de volume de água, levando 4 h para percorrer a distância simulada, enquanto o cenário 5 levou 5h e 25 min, perdendo cerca de metade do seu volume dispersando na mancha. Comparativamente, os cenários que consideram fluidos não-newtonianos (C4 e C5) acabam por dissipar menos volume, mantendo um comportamento mais próximo ao da água, e escoando mais rápido do que os cenários com aumento do Manning (C2 e C3).

Figura 5 – Comparação entre os hidrogramas nas seções A e H.

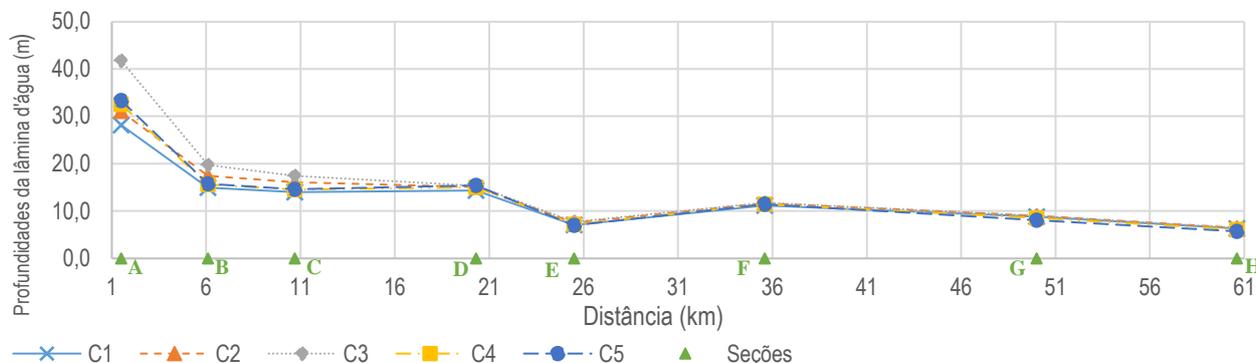


3.3. Profundidades máximas do escoamento

A Figura 6 apresenta as profundidades máximas atingidas em cada seção para os cinco cenários simulados e permite avaliar que nos C2 e C3 (Manning elevado) há acumulação de fluido na região logo a jusante do reservatório, com grande elevação dos níveis nas planícies. Os C4 e C5, correspondentes aos fluidos não-newtonianos, também apresentam profundidades maiores do que as da simulação com água (C1) – isto ocorre, provavelmente, porque há interação entre as partículas em suspensão, dificultando o escoamento do fluido e aumentando sua retenção em um local, elevando os níveis d'água. Além disso, a acumulação do volume destes fluidos pode estar ocorrendo entre o recebimento do esforço inicial até que vençam a tensão de cisalhamento - entretanto, mais a jusante

do barramento as profundidades destes cenários passam a ser menores do que nos cenários com aumento do Manning.

Figura 6 – Comparação entre as as profundidades máximas atingidas nas seções em cada um dos cenários



4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

De forma geral, pode-se identificar que os C1, C4 e C5 apresentaram maior semelhança entre si, provavelmente devido ao menor atrito com a superfície e, possivelmente, pela menor energia dissipadas devido aos coeficientes de Manning mais baixos destes cenários.

As manchas de inundação foram semelhantes entre si, com pequenos aumentos para os cenários de aumento do Manning, resultando em inundações maiores e, portanto, mais conservadoras. Esta análise é complementada pela avaliação das profundidades máximas nas seções de resultados, que também são mais elevadas nestes cenários. Além disso, estes cenários apresentaram menores velocidades máximas de escoamento em toda a extensão da simulação. Todas estas observações sobre o comportamento do fluido estão relacionadas à perda de energia do escoamento devido ao atrito com a superfície por onde ele escoava – este atrito gera um acúmulo de volumes a montante.

Quanto aos tempos de chegada da onda de cheia, os cenários mais conservadores em relação à segurança – ou seja, cujo deslocamento da onda cheia é mais rápido – são, primeiro, o C1, seguido pelos cenários C2 e C3.

Assim, uma das principais considerações deste estudo é que a metodologia de aumento do coeficiente de Manning, apesar de aumentar as áreas inundadas, gera resultados de velocidades de escoamento mais lentas. Isto pode ser não tão desejável em estudos aplicados ao mapeamento das zonas de risco, em especial das Zona de Autossalvamento (ZAS) – que, segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 14.066 de 2020), é definida como aquela região a jusante da barragem em que não há tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente.

Como perspectivas futuras, propõe-se que sejam realizados estudos no sentido de (1) realizar análises de sensibilidade no modelo às diferentes variáveis de entrada, a fim de obter uma quantificação da influência dos parâmetros nos resultados obtidos; (2) Avaliar os efeitos destas diferentes abordagens metodológicas em relação às manchas observadas na realidade, após acidentes, com comparação dos resultados obtidos para verificação da melhor metodologia para um caso concreto; (3) Analisar outras metodologias disponíveis no modelo para simulação de fluidos não-newtonianos, bem como diferentes concentrações de fluidos hiperconcentrados. Nesse sentido, uma pergunta que segue não respondida pelo presente estudo, mas pode ser caso de estudo é: qual dos dois cenários (C4 ou C5) que consideram a reologia do fluido melhor representa a realidade? (4) Avaliar a possibilidade de inserir a incorporação de material ao longo da propagação da onda de cheia, uma vez que ocorre o arrasto de materiais pela onda de cheia, aumentando a massa específica relativa da onda propagada; (5) Avaliar a simulação com as mesmas condições e diferentes concentrações volumétricas, ou

mesmo alterando as demais propriedades reológicas, como o a massa específica relativa, a taxa de deformação viscosa e as viscosidades dinâmicas. Ainda, sugere-se que a metodologia aqui utilizada seja reaplicada para áreas de estudos diferentes, especialmente no que diz respeito à topografia, com ênfase em vales não-encaixados, de modo a verificar se o comportamento aqui observado se mantém em locais com características geomorfológicas distintas como, por exemplo, cursos d'água de larguras mais expressivas.

Por fim, salienta-se que este estudo não teve como objetivo determinar com fidelidade os resultados da hipotética ruptura da barragem de Fundão, mas sim de utilizar o local como uma base real na definição de dimensões para estudo de caso. Portanto, as manchas de inundação geradas estão atreladas às considerações, simplificações e decisões tomadas neste estudo e não refletem a realidade do local.

5. REFERÊNCIAS

BRANDÃO, Mariana Ribeiro de Lima. Modelagem Hidrodinâmica Uni e Bidimensional Aplicada ao Rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Coordenação técnica de Marina Dalla Costa. – Brasília: ANM, 2020.

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

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

BRASIL. Resolução nº 95 da Agência Nacional de Mineração, alterada pela Resolução nº 130/2023, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. 07 de fev. de 2022. Diário Oficial da União. 2022.

CASSIO, E. I. MOMENTO EXATO DA BARRAGEM DO FUNDÃO SE ROMPENDO. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=NgVB190kemY>. > Acesso em 30/07/2022.

Consórcio Ecoplan-Lume. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Doce - Relatório final, volume I. IGAM - Contrato 043/2008. Jun. 2010.

DIAS, Neemias Almeida, 1990- Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional / Neemias Almeida Dias. – 2017. 90 f. : il

FARR, T.G., ROSEN, P.A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SCHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D., & ALSDORF, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. Review of Geophysics, 45:RG2004.

FERREIRA, D. S. 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.

Floyd, I. E., Sanchez, A., Gibson, S., and Savant, G.: A Modular, Non-Newtonian, Model, Library Framework (DebrisLib) for Post-Wildfire Flood Risk Management, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2020-509>, 2020.

FORNI, J. J. Rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, da Mineradora Vale. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=pTJCqOWTUqY>>. Acesso em 15 de set. de 2022.

GIBSON, S. FLOYD, I; HEATH, R. Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS. *Earth Surf Process Landforms* WILEY. 2020;46:540–553. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/esp.5044>>

MACHADO, N. C.; SALIBA, A. P.; BAPTISTA, M. B. Modelagem Hidráulica 1D e 2D de fluidos hiperconcentrados no HEC-RAS - estudo de caso da ruptura da barragem do Fundão. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, SC. 2017

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. Det al., Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 2016. 88 p. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 22 de out de 2022.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. Two –dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, v. 119, n. 2, p. 244-261, 1993.

SANDRONI, S; GUIDO, G. Barragens de Terra e Enrocamento. São Paulo: Oficina dos textos. 2021

SANTOS, R. C. V. CONTRIBUIÇÃO DO SETOR MINERAL NO PRODUTO INTERNO BRUTO BRASILEIRO. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/radar65art6>. Abr, 2021.

US Army Corps of Engineers (USACE) – Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual versão 6.0. maio, 2021

US Army Corps of Engineers (USACE). HEC-RAS Release Notes - HEC-RAS 6.0 New Features List. 2022. Disponível em: < <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasrn/hec-ras-6-0-new-features-list>> Acesso em Ago. de 2022.

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.