

Avaliação da influência dos parâmetros reológicos do rejeito na extensão e lateralidade do Runout

Marcos Túlio Fernandes

Engenheiro Geotécnico, Progen, Nova Lima, Brasil, marcostuliofernandes@hotmail.com

Daniel de Oliveira Dourado

Engenheiro de Recursos Hídricos, Vale, Nova Lima, Brasil, daniel.dourado@vale.com

Glaucimar Lima Dutra Fernandes

Analista de Gestão de Riscos, Vale, Itabira, Brasil, galdutra@hotmail.com

Willyan Giorgio Debastiani

Engenheiro de Recursos Hídricos, Vale, Nova Lima, Brasil, willyan.debastiani@vale.com

RESUMO: A avaliação do impacto da ruptura de uma barragem de rejeitos é realizada por meio de estudos de *dam break*. O comportamento do fluxo de rejeitos depende da concentração volumétrica de sólidos no reservatório, podendo ser newtoniano ou não-newtoniano. Para avaliar como a variação da granulometria e plasticidade afeta a tensão de escoamento, viscosidade e, conseqüentemente, a extensão e a lateralidade do runout, foi conduzido um estudo de caso com testes de sensibilidade. Foram realizados ensaios reológicos com amostras de rejeitos classificadas como siltes argilosos, siltes arenosos e areias siltosas, coletadas no reservatório de uma barragem de contenção de rejeitos. A partir destes ensaios foram realizadas simulações variando a tensão de escoamento e viscosidade do material no software HEC-HAS. Os resultados indicaram que as amostras de rejeitos siltes argilosos apresentaram comportamentos distintos em comparação às amostras de rejeitos siltes arenosos e areias siltosas, mesmo com a mesma concentração volumétrica, destacando a importância da avaliação da proporção de cada material no reservatório. Nos ensaios com *blends* destes materiais, observa-se que o material mais arenoso teve uma influência predominante no comportamento da curva de fluxo. Quanto à influência das variações das curvas reológicas no runout, observou-se que o aumento das tensões de escoamento e viscosidade provocaram uma redução da lateralidade da mancha, principalmente em regiões onde ocorre uma redução da velocidade. Os tempos de chegada dos materiais também foram afetados, tendo uma redução quando comparado o fluxo de rejeitos com o fluxo de água, demonstrando a importância de se considerar os parâmetros reológicos em modelagens de ruptura hipotética.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios reológicos, Análise de Dam Break, Propriedades reológicas de rejeitos.

ABSTRACT: The assessment of the impact of a tailings dam breach is conducted through dam break studies. The behavior of the tailings flow depends on the volumetric concentration of solids in the reservoir, which can be newtonian or non-newtonian. To evaluate how variations in particle size distribution and plasticity affect yield stress, viscosity, and consequently, the extent and lateral spread of the runout, a case study with sensitivity tests was conducted. Rheological tests were performed on samples classified as clayey silts, sandy silts, and silty sands, collected from the tailings containment dam reservoir. Based on these tests, simulations were conducted varying the yield stress and viscosity of the material using HEC-HAS software. The results indicated that clayey silt tailings samples exhibited distinct behaviors compared to sandy silt and silty sand tailings samples, even with the same volumetric concentration, highlighting the importance of evaluating the proportion of each material in the reservoir. In tests with blends of these materials, it was observed that the more sandy material had a predominant influence on the flow curve behavior. Regarding the influence of variations in rheological curves on runout, it was observed that increasing yield stresses and viscosity led to a reduction in the lateral spread of the tailings, especially in regions where velocity decreases. The arrival times of the materials were also affected, with a reduction compared to water flow, emphasizing the importance of considering rheological parameters in hypothetical breach modeling.

KEYWORDS: Rheological tests, Dam Break Analysis, Rheological Properties of Tailings.

1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil está atualmente em fase de desenvolvimento de novas tecnologias voltadas a disposição de rejeitos, devido aos acontecimentos de ruptura de barragens que ocorreram nos últimos anos. Contudo, por muitos anos, a disposição de rejeitos em barragens foi a alternativa mais utilizada para disposição deste subproduto do processo de beneficiamento do minério. Para gerenciamento destas estruturas e melhor definição de planos de emergência, para caso venha a ocorrer uma falha, a elaboração de estudos de ruptura hipotética se torna algo essencial (Gildeh *et al.*, 2020).

Na elaboração destes estudos o entendimento do comportamento reológico do material é fundamental para a definição de qual modelo será adotado, sendo esta uma recomendação realizada pela Agência Nacional de Mineração (ANM), via Resolução 130 de 24 de fevereiro de 2023. O comportamento desenvolvido durante o fluxo é altamente influenciado pela concentração volumétrica de sólidos. Concentrações volumétricas abaixo de 20%, demonstram comportamento de fluxo de água, valores superiores a 20% e inferiores a 45%, resultam em comportamento de inundação de lama, e valores entre 45% e 55%, comportamento de fluxo de lama. Concentrações acima de 55% o contato entre as partículas é predominante, como ocorre em fluxo de detritos e escorregamentos de solo (CDA, 2021; O'Brien, 1986).

Em barragens de mineração, devida a elevada concentração volumétrica de sólidos, o comportamento quase sempre é não-newtoniano. Julien e Lan (1991) descrevem que um modelo para fluxo com elevada concentração volumétrica deve incluir elementos que descrevem a coesão entre partículas, viscosidade entre as partículas e ambiente fluido, efeito do impacto entre partículas e turbulência. Portanto, a realização de ensaios reológicos é fundamental para determinar as propriedades reológicas da mistura, que servirão para alimentar os modelos de análise do fluxo.

Para avaliar a influência das propriedades reológicas do material na lateralidade e extensão do runout, foram conduzidas simulações variando os parâmetros reológicos no software HEC-RAS. As curvas de relação entre tensão de escoamento e viscosidade com a concentração volumétrica de sólidos, foram definidas por meio de ensaios reológicos, realizados com reômetro do tipo palheta e cilindros concêntricos, conduzidos em amostras de rejeitos coletadas de uma barragem da Mineradora Vale, localizada em Minas Gerais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2 Obtenção dos parâmetros reológicos

As amostras ensaiadas foram obtidas de uma campanha de investigação realizada no reservatório de uma barragem de rejeitos, localizada em Minas Gerais, a fim de subsidiar a realização de um estudo de ruptura hipotética. Nesta campanha, foram coletadas 18 amostras de rejeitos com o emprego do equipamento CPTu, utilizando o amostrador do tipo *direct push*. Estas amostras se distribuem tanto em espacialidade no reservatório quanto em profundidade.

Além dos ensaios de reologia, também foram realizados ensaios de caracterização dos materiais. Devido à variação granulométrica dos rejeitos, observada após os ensaios de caracterização, também foram realizados ensaios com *blends* dos materiais siltes argilosos e siltes arenosos, nas proporções de 1:1, 1:2, 1:3 e 1:5.

Os ensaios reológicos foram conduzidos com o reômetro de palhetas sob taxa controlada, conforme exemplo exposto na Figura 1. A fim de se obter a curva de variação das propriedades com a concentração volumétrica de sólidos (C_v), para cada amostra foram realizados cinco ensaios com C_v variando entre 25 e 60%, a depender do comportamento do material ao ser homogeneizado. A definição dos valores de tensão de escoamento e viscosidade foi feita pela interpretação da curva de fluxo, obtida para cada concentração volumétrica, considerando a reologia de Bingham.

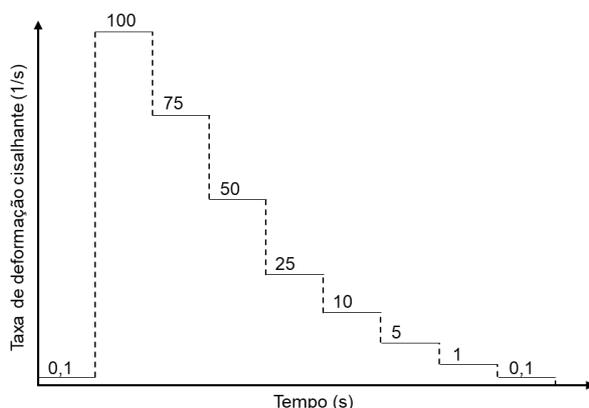


Figura 1. Exemplo de sequência de taxas de cisalhamento para realização dos ensaios.

2.3 Modelagem da ruptura hipotética

A modelagem da ruptura hipotética foi realizada no software HEC-RAS versão 6.4.1. No software foi criada uma barragem padrão com elevação de crista na 1.274,50 m e elevação de fundo na 1.224,00 m, totalizando 50,50 metros de altura. O reservatório desta barragem possui um volume de aproximadamente 40.000.000 m³.

Como o intuito é avaliar a influência das tensões de escoamento e viscosidades nos resultados, buscou-se não variar os demais parâmetros de entrada, para que estes não interfiram nos resultados. A geometria da brecha de ruptura foi definida por meio das equações de Froehlich (2008). O modo de falha adotado foi galgamento com progressão senoidal de formação da brecha. O valor de manning do modelo foi considerado o mesmo em toda a superfície topográfica, sendo este um valor constante de 0,04. Na Tabela 1 é possível visualizar os principais parâmetros adotados na modelagem.

Tabela 1. Resumo dos principais parâmetros de entrada.

Parâmetros	Valor
Largura inferior final	60
Inclinação lateral direita/esquerda	1/1
Tempo de formação da brecha	0,7h
Valor de Manning	0,04

Foram realizadas simulações considerando o modelo plástico de Bingham, no qual a tensão de cisalhamento (τ) e função da tensão de escoamento (τ_y), da viscosidade (μ) e da taxa de cisalhamento (dv_x/dz) atuante, conforme pode ser visto na Equação 1.

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{dv_x}{dz} \quad (1)$$

Ao todo foram considerados quatro cenários, sendo eles: cenário 1: consideração de fluido como água, comportamento newtoniano; cenário 2: reologia referente aos materiais siltes argilosos; cenário 3: reologia referente ao *blend* 1:5; e cenário 4: reologia referente ao *blend* 1:1. A concentração volumétrica de sólidos adotada no modelo foi constante, com valor de 45%. Os valores de tensões de escoamento e viscosidades foram definidos considerando esta concentração volumétrica, aplicando as relações apresentadas no subitem 3.1. Um resumo dos parâmetros reológicos adotados pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos valores de tensão de escoamento e viscosidade aplicados nos modelos.

Cenário	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
Cenário 2 (Silte argiloso)	457,697	0,589
Cenário 3 (<i>Blend</i> 1:5)	7,371	0,045
Cenário 4 (<i>Blend</i> 1:1)	22,907	0,147

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados dos ensaios de reologia

Na Tabela 3 estão expostos os resultados dos ensaios de caracterização das amostras. Como pode ser observado, as amostras de siltes argilosos tenderam a apresentar comportamento plástico. Por outro lado, as amostras de siltes arenosos e areias siltosas demonstraram, em sua grande maioria, comportamento não plástico, com algumas exceções, corroborando para uma maior dispersão dos resultados de reologia, refletindo em um menor coeficiente de correlação.

Tabela 3. Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.

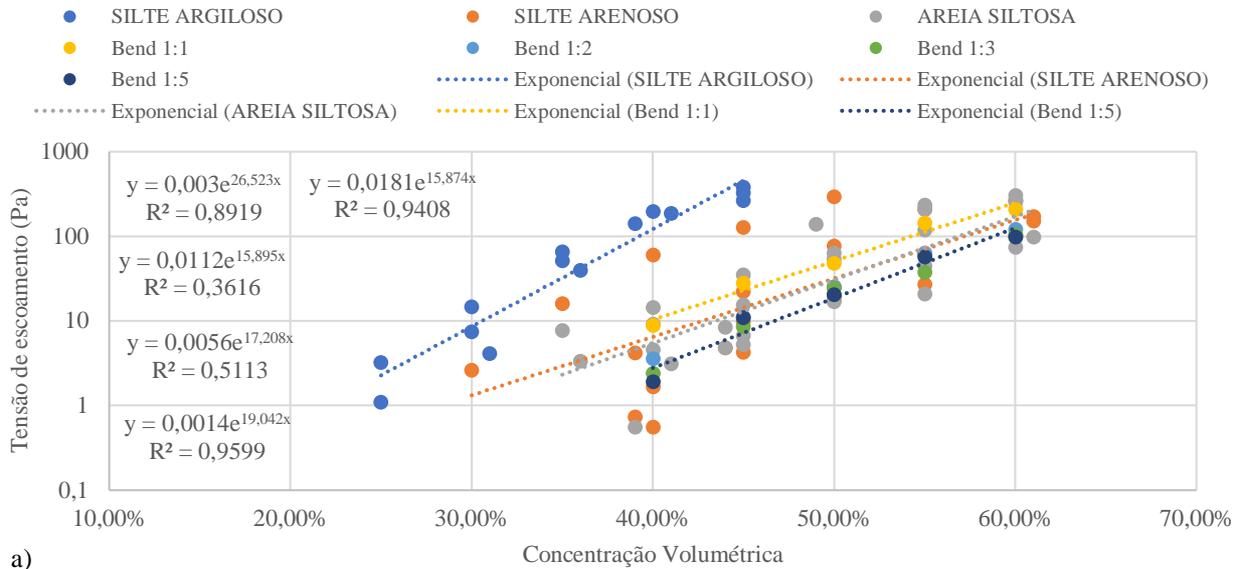
Classificação	Porcentagem dos materiais predominantes			Limites de Atterberg	
	%Argila	%Silte	%Areia Fina	LL (%)	LP (%)
Silte argiloso	17 a 23	71 a 76	-	19 a 26	14 a 19
Silte arenoso		48 a 62	21 a 45	15 a 16*	9 a 12*
Areia siltosa		26 a 43	44 a 60	14*	9 a 10*
<i>Blend</i> 1:1	1 fração Silte argiloso e 1 fração Silte arenoso				
<i>Blend</i> 1:2	1 fração Silte argiloso e 2 frações Silte arenoso				
<i>Blend</i> 1:3	1 fração Silte argiloso e 3 frações Silte arenoso				
<i>Blend</i> 1:5	1 fração Silte argiloso e 5 frações Silte arenoso				

*Alguns ensaios não apresentaram LL ou LP

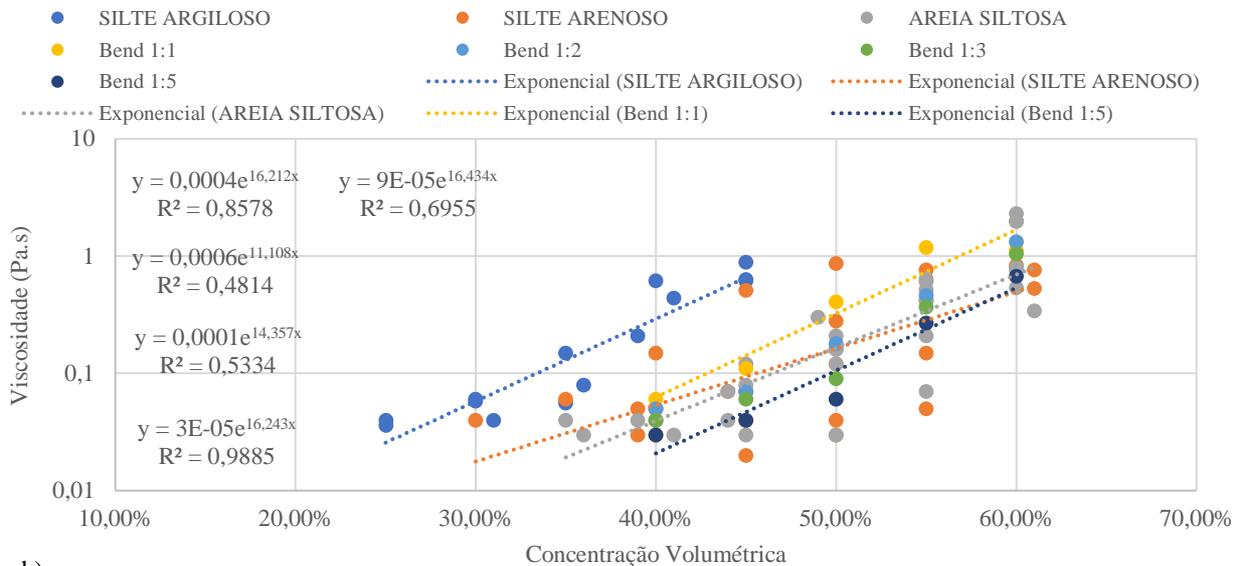
Na Figura 2 é possível visualizar os resultados dos ensaios de reologia. Nota-se que as amostras de materiais siltes argilosos foram as que apresentaram maiores valores de tensão de escoamento e viscosidade, muito devido à parcela de plasticidade. As amostras de areias siltosas e siltes arenosos apresentaram relações bem similares. Nas amostras ensaiadas com os *blends*, constatou-se que quanto maior a fração de silte arenoso, menor tende a ser os valores de tensão de escoamento e viscosidade, sendo observado que a curva do *blend* 1:5 foi o limite inferior encontrado e a curva do *blend* 1:1 o limite médio. Isto demonstra que a redução da plasticidade, provocada pela mistura de material granular, pode acarretar uma redução considerável nos parâmetros de resistência durante o fluxo, comprovando a importância de um programa de investigação no reservatório que permita realizar a devida caracterização dos materiais e avaliar a proporção da sua presença no meio. Na Tabela 4 é possível visualizar os parâmetros encontrados nas regressões apresentadas na Figura 2.

Tabela 4. Parâmetros dos ajustes das curvas reológicas obtidas para cada material.

Solo	Tensão de escoamento			Viscosidade		
	α_1	β_1	R^2	α_2	β_2	R^2
Silte Argiloso	0,003	26,523	0,892	0,000	16,212	0,858
Silte Arenoso	0,011	15,895	0,362	0,001	11,108	0,481
Areia Siltosa	0,006	17,208	0,511	0,000	14,357	0,533
<i>Blend</i> 1:5	0,001	19,042	0,960	0,000	16,243	0,989
<i>Blend</i> 1:1	0,018	15,874	0,941	0,000	16,434	0,696



a)



b)

Figura 2. Resultados dos ensaios reológicos: a) relação entre tensão de escoamento e concentração volumétrica; b) relação entre viscosidade e concentração volumétrica.

3.2 Impacto da variação dos parâmetros reológicos na lateralidade do runout

Na Figura 3 é possível visualizar os resultados de máxima elevação observada nas simulações. Os resultados obtidos com os dados reológicos dos *blends* 1:1 e 1:5 foram muito similares, não havendo diferenças significativas no runout, sendo apresentado no mapa apenas o resultado do *blend* 1:5.

Nota-se que há uma tendência da lateralidade e profundidade do escoamento com água ser maior que o não-newtoniano, algo já esperado, tendo em vista que no escoamento não-newtoniano o fluxo somente ocorre se as tensões de cisalhamento forem superiores à tensão de escoamento do material. Esta diferença pode estar muito associada a forma de mobilização deste material ao longo do reservatório durante a formação da brecha, que tende a ser mais lenta nos fluxos não-newtonianos.

A lateralidade da mancha do material silte argiloso foi muito próxima da obtida com o *blend* 1:5 em alguns locais, sendo observada grande diferença nos remansos, onde há uma queda na velocidade e, conseqüentemente, na taxa de cisalhamento, refletindo em um menor alcance dos resultados encontrados com o material silte argiloso, conforme visto na Figura 3. Posto isto, a condição do reservatório durante o evento

de ruptura pode condicionar não somente o aumento do volume mobilizado, mas também alterações significativas na dinâmica de fluxo provocada pela redução da concentração volumétrica e dos parâmetros de resistência dos materiais.

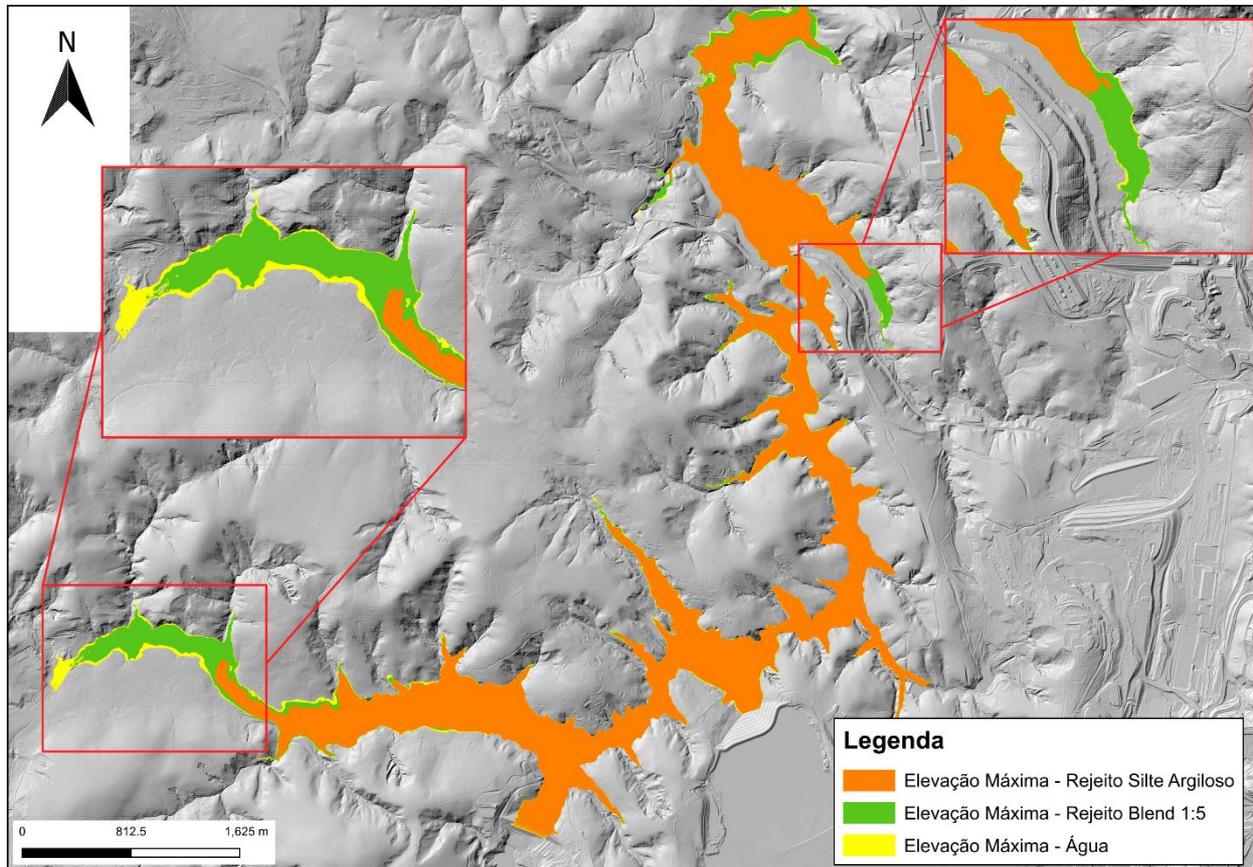


Figura 3. Envoltórias máximas de rupturas encontradas nas simulações realizadas.

3.3 Influência dos parâmetros de entrada nos tempos de chegada e velocidades do fluxo

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos tempos de chegada para cada simulação ao longo do eixo de propagação, cruciais para o entendimento do comportamento temporal do fluxo para diferentes materiais mobilizados. Os dados revelam particularidades significativas na mobilidade dos materiais, com implicações importantes para a gestão de desastres e a mitigação de seus impactos. Notavelmente, o material silte argiloso demonstra tempos de chegada menores nos primeiros quilômetros de simulação, no entanto, à medida que a distância aumenta, a resistência ao fluxo oferecida pelo material silte argiloso faz com que o tempo de chegada seja maior. Comportamento contrário pode ser observado para fluxos com água. Esta avaliação é fundamental e demonstra a influência da reologia destes materiais na definição do comprimento das zonas de autossalvamento, quando o critério mais conservador é o tempo de chegada de 30 min.

Os resultados com o *blend* 1:1 e *blend* 1:5, exibem comportamentos variáveis de mobilidade. Enquanto o *blend* 1:1 mostra tempos de chegada mais rápidos em distâncias mais curtas, quando comparado com a água, o *blend* 1:5 não apresentou este comportamento, tendo valores mais próximos do que o da água para a mesma distância. Essa diferenciação reflete a importância de considerar a composição dos materiais para compreender plenamente seus padrões de transporte em cenários de rupturas de barragens.

Tabela 5. Tempo de chegada para cada tipo de material mobilizado.

Material mobilizado	Tempo de chegada (min)		
	1 Km	3 Km	5 Km
Água	18,00	24,60	39,00
Blend 1:1	16,80	25,80	39,96
Blend 1:5	18,00	27,00	40,02
Silte argiloso	15,60	27,00	42,00

Os resultados apresentados na Tabela 5, sobre os tempos de chegada dos materiais mobilizados após uma ruptura de barragem, revelam uma relação direta com as velocidades do escoamento, sendo influenciadas pelas propriedades físicas dos materiais. Notavelmente, as simulações com o material silte argiloso exibem tempos de chegada mais rápidos em distâncias mais curtas, sugerindo inicialmente uma velocidade mais alta. No entanto, à medida que a distância aumenta, seu tempo de chegada se aproxima dos outros materiais, indicando uma perda de velocidade ao longo do trajeto. Esse fenômeno pode ser atribuído à maior viscosidade e tensão de escoamento dos materiais siltes argilosos, que tendem a retardar sua mobilidade em distâncias maiores.

4 CONCLUSÕES

Por meio das análises realizadas, foi possível observar a importância da consideração da reologia dos rejeitos na condução dos estudos de ruptura hipotética de barragens, refletindo em estudos que melhor representem o comportamento destes materiais durante o fluxo. Os ensaios reológicos demonstraram que a depender da granulometria e da plasticidade do material as curvas de fluxo podem possuir comportamentos bem distintos. Os rejeitos siltes argilosos apresentaram valores de tensão de escoamento e viscosidade bem maiores do que os rejeitos com maior fração de areia, expressando que a plasticidade de materiais mais finos pode conduzir a valores elevados de resistência ao fluxo. Constatou-se nos ensaios com os *blends* de materiais que a fração de areia predomina o comportamento do fluxo.

Com os resultados das simulações, foi possível identificar que comportamento de fluxos de fluidos não-newtonianos influenciam de forma relevante nos resultados das modelagens. Quando comparado os dois extremos das simulações realizadas, material de rejeito silte argiloso e de água, observam-se significativas mudanças na mancha em regiões de remanso ou em locais onde há redução significativa da velocidade. As simulações com rejeitos exibiram menores áreas impactadas, influenciando nas áreas mapeadas para a elaboração de planos de ação de emergência. O mesmo ocorre com os tempos de chegada dos materiais, que tendem a ser maiores quando se considera comportamento de fluxo não-newtoniano, interferindo, por exemplo, na definição das zonas de autossalvamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Canadian Dam Association (2021) *Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*.
- O'Brien, J.S. 1986. Physical Processes, Rheology, and Modeling of Mud Flows. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Julien, P., Lan, Y. (1991) Rheology of Hyperconcentrations. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 117, no. 3, p. 346-353.
- Froehlich, D. C (2008) Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(12), p. 1708-1721.
- Gildeh, H. K., Halliday, A., Arenas, A., Zhang, H. (2020). Tailings Dam Breach Analysis: A Review of Methods, Practices, and Uncertainties. *Mine Water and the Environment*. 40, p. 128–150.