



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



GABRIEL THADEU PEREIRA DE ALMEIDA

**SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE REJEITO
ORIUNDA DE DAM BREAK COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE FINOS**

Ouro Preto, MG

2023

Gabriel Thadeu Pereira de Almeida

**SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE REJEITO ORIUNDA
DE DAM BREAK COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE FINOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda

Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho

Coorientadora: M.Sc. Débora Magalhães Chácara

Ouro Preto, MG

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447s Almeida, Gabriel Thadeu Pereira de.
Simulações numéricas de propagação de onda de rejeito oriunda de dam break com diferentes concentrações de finos. [manuscrito] / Gabriel Thadeu Pereira de Almeida. - 2023.
72 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda.
Coorientadores: Ma. Débora Magalhães Chácara, Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Barragens de rejeitos. 2. Ondas - Propagação. 3. Fluidodinâmica computacional. I. Miranda, José Fernando. II. Chácara, Débora Magalhães. III. Oliveira Filho, Waldyr Lopes de. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 624.136:531.3

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Thadeu Pereira de Almeida

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE REJEITO ORIUNDA DE DAM BREAK COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE FINOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 31 de agosto de 2023

Membros da banca

Dr. José Fernando Miranda - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. Débora Magalhães Chácara - Universidade Federal de Ouro Preto

José Fernando Miranda, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/04/2024, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0694088** e o código CRC **93D1A9D3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Santíssima Trindade.

Agradeço a minha família. Aos meus pais, pelo amor e carinho que me dedicaram ao longo de toda vida. Aos meus irmãos, por serem fonte de apoio e confiança.

Agradeço a Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e a Ouro Preto, pelos ensinamentos.

Agradeço ao Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho. Por ter aceitado me orientar, pelo conhecimento que me transmitiu, por ter sido sempre tão solícito durante este trabalho. E pela paciência em me orientar, sou muito grato.

Agradeço à Débora. Pela dedicação, ajuda e conhecimentos compartilhados, tão valiosos para este trabalho.

Agradeço ao Luciano Santana, por seu apoio à pesquisa disponibilizando a licença do software Flow-3D® HYDRO, imprescindível na execução do presente trabalho.

Agradeço a República Serigy, por ser meu lar em Ouro Preto.

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação do uso de fluido dinâmica computacional (CFD) e propriedades reológicas em simulações do escoamento de rejeito no caso de ruptura de barragem. Os objetivos principais são: avaliar os cenários de propagação de onda de rejeito, com diferentes faixas de concentração de finos; e comparar as exigências legais, e os dados apontados pela literatura com os resultados/análises encontrados/avaliadas neste estudo. Empregaram-se os dados reológicos de rejeito fino originário do tratamento de minério de ferro de uma mina do Quadrilátero Ferrífero em várias faixas de concentração obtidos por Chácara (2020) ao realizar os ensaios rotacionais com tensão de cisalhamento controlada (CSR). Os dados foram manipulados através de regressões de potências de equações exponenciais para serem usados como dados de entrada do programa Flow-3D® HYDRO. Utilizando o Flow-3D® HYDRO, simularam-se seis cenários hipotéticos. Em quatro destes cenários havia um material com concentração de finos homogênea ao longo de todo o reservatório e em três cenários houve uma mudança da concentração de finos na metade da altura do reservatório. Avaliou-se a relação entre a concentração de finos do material e a distância percorrida, a velocidade, o tempo de chegada da onda e a altura dela em vários pontos no vale a jusante. Avaliou-se também o comportamento do material nos casos discricionários, onde havia duas concentrações de finos no reservatório. Realizou-se uma revisão bibliográfica da legislação vigente quanto à segurança de barragens com foco nos Estudos de Inundação, a fim de analisar se as leis estão acompanhando a literatura científica. Verificou-se que há significativa influência da concentração de finos no comportamento da propagação da onda e ausência de exigências legais de estudos reológicos do rejeito e de simulações numéricas de propagação de onda na confecção de Estudos de Inundação de Plano de Ação Emergencial de Barragens de Mineração.

Palavras-chave: fluidodinâmica computacional; rejeito; propagação de onda; Herschel-Bulkley; Flow-3D® HYDRO.

ABSTRACT

This work deals with the application of computational fluid dynamics (CFD) and rheological properties in tailings flow simulations originated in case of dam breaks. The main objective is to analyze and compare propagating waves of tailings of various ranges of fine particles concentration and compare the knowledge built from the results and scientific literature with the current laws regarding tailings dam safety. The rheological data utilized was obtained by Chácaras (2020) by making rotational tests with controlled shear rate (CSR). The data was manipulated through power regressions of exponential equations to be able to be used as input in the Flow-3D® HYDRO software. Using Flow-3D® HYDRO, six hypothetical scenarios were simulated. Four of these scenarios had a material with homogenous fine particle concentration along the whole extension of the reservoir and three scenarios in which the concentration of the bottom half of the reservoir was different from the concentration of the upper half. The relationship between fine particles concentration and distance traveled, speed, time of arrival and wave height in various locations of the valley downstream from the dam was analyzed. Also, the behavior of the material in the discretionary scenarios, where there were two fine particles concentration in the reservoir. A revision of the current law regarding dam safety with focus on inundation studies was made, with the intention of analyzing if the law is following the scientific literature. It was verified the significant influence of the fines' concentration on wave propagation behavior and the absence of legal requirements for rheological studies of tailings and numerical wave propagation simulations in the preparation of Flood Studies for Mining Dam Emergency Action Plans.

Keywords: computational fluid-dynamics; tailing; wave propagation; Herschel-Bulkley; Flow-3D® HYDRO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Gráfico da taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento	17
Figura 2 — Diferenças entre a geometria definida e o objeto criado	23
Figura 3 — Modelo geométrico empregado por Chácara (2020) para as simulações numéricas (Chácara, 2020).	24
Figura 4 — Entrada de dados do modelo físico Rejeito	30
Figura 5 — Tabela de viscosidade dependente da taxa de cisalhamento	31
Figura 6 — Entrada de dados da viscosidade por correlação empírica	32
Figura 7 — Entrada de dados da viscosidade por dados tabelados.....	33
Figura 8 — Entrada de valores das concentrações de sólidos na condição inicial	34
Figura 9 — Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para o rejeito com 57% de sólidos	35
Figura 10 — Resultado obtido a partir do ajuste de curva não linear para o rejeito com 57% de sólidos	36
Figura 11 — Resultado do ajuste de curva da tensão de escoamento em função da concentração volumétrica de sólidos finos	37
Figura 12 — Imagem do modelo visual do Flow-3D® mostrando a geometria empregada nas simulações.....	38
Figura 13 — Flux Surface e History Probe em parte da geometria construída.....	39
Figura 14 — Condições de contorno	40
Figura 15 — Exemplo de saída bidimensional do Flow-3D® HYDRO	41
Figura 16 — Saída do Flow-3D® HYDRO do tipo <i>Text Output</i>	42
Figura 17 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações monofásicas a aproximadamente 4,2s	44
Figura 18 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações monofásicas a aproximadamente 25,2s	45
Figura 19 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações bifásicas a aproximadamente 4,2s	47
Figura 20 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações bifásicas a aproximadamente 25,2s	48
Figura 21 — Estado inicial do cenário contendo rejeito com concentração de 60% de sólidos sobre 75%	49

Figura 22 — Estado do cenário contendo rejeito com concentração de 60% de sólidos sobre 75% aos 42 segundos	49
Figura 23 — Hidrogramas das simulações monofásicas nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$	50
Figura 24 — Hidrogramas das simulações monofásicas nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$	50
Figura 25 — Hidrogramas das simulações monofásicas no plano $x = 500\text{m}$	51
Figura 26 — Hidrogramas das simulações bifásicas nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$	51
Figura 27 — Hidrogramas das simulações bifásicas nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$	52
Figura 28 — Hidrogramas das simulações bifásicas nos planos $x = 500\text{m}$	52
Figura 29 — Curvas de submergência dos cenários monofásicos nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$	53
Figura 30 — Curvas de submergência dos cenários monofásicos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$	53
Figura 31 — Curvas de submergência dos cenários monofásicos no plano $x = 500\text{m}$	54
Figura 32 — Altura do fluido em repouso no cenário de rejeito com 75% de sólidos.....	54
Figura 33 — Curvas de submergência dos cenários bifásicos nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$..	55
Figura 34 — Curvas de submergência dos cenários bifásicos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$	55
Figura 35 — Curvas de submergência dos cenários bifásicos no plano $x = 500\text{m}$	55
Figura 36 — Curvas de submergência do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$	56
Figura 37 — Curvas de submergência do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$	57
Figura 38 — Curvas de submergência do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos no plano $x = 500\text{m}$	57
Figura 39 — Hidrogramas das simulações do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$	58
Figura 40 — Hidrogramas das simulações do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$	58
Figura 41 — Hidrogramas das simulações do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos no plano $x = 500\text{m}$	58
Figura 42 — Volume de fluido no reservatório ao longo do tempo de simulação. Em um gráfico estão agrupados os casos monofásicos e no outro, os casos bifásicos.....	59

Figura 43 — Comparação entre o volume de fluido no reservatório ao longo do tempo de simulação para comparação entre os cenários com concentrações discretas e cenário com concentração média..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Tipos de escoamento em função da concentração de sólidos.....	20
Tabela 2 — Resultados de ensaio rotacional CSR de rejeito contendo 57% de sólidos de Chácara (2020)	28
Tabela 3 — Concentrações de sólidos em diferentes unidades.....	34
Tabela 4 — Constantes do modelo de fluido Herschel-Bulkley para cada concentração de sólidos	36
Tabela 5 — Coeficientes empíricos	37
Tabela 6 — Cenários simulados.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{1,f}$ e $B_{1,f}$	Coefficientes empíricos da consistência
$A_{2,f}$ e $B_{2,f}$	Coefficientes empíricos da tensão de escoamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANP	Agência Nacional de Petróleo
c_f	Concentração volumétrica de finos
CFP	Computational fluid dynamics (Fluidodinâmica computacional)
CSR	Taxa de cisalhamento controlada
CSV	Comma-separated values (Valores separados por vírgula)
c_v	Concentração volumétrica de sólidos
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FAVOR	Fractional Area/Volume Obstacle Representation (Representação Fracional de Área e Volume de Obstáculos)
G_s	Gravidade específica dos sólidos
K	Consistência
mc	Teor de umidade
n	Índice de escoamento
NBR	Norma técnica brasileira
PAE	Plano de Ação Emergencial
PAEBM	Plano de Ação Emergencial de Barragens de Mineração
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
STL	Stereolithography file (Arquivo de estereolitografia)
t	Tempo

V_a	Volume de ar
V_s	Volume de sólidos
V_w	Volume de água
W_s	Massa de sólidos
W_w	Massa de água
ZAS	Zona de Autossalvamento
ZSS	Zona de Segurança Secundária
η	Viscosidade
ρ_b	Peso específico
τ	Tensão de cisalhamento
τ_y, τ_0	Tensão de escoamento

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1. Relevância deste trabalho	14
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivos gerais	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
2. Revisão Bibliográfica.....	16
2.1. Reologia.....	16
2.1.1. Viscosidade.....	16
2.1.2. Fluidos não-Newtonianos	16
2.1.3. Fluido de Herschel-Bulkley	17
2.1.4. Características do rejeito	18
2.1.5. Classificação do fluxo	19
2.1.6. Reometria.....	20
2.2. Barragens de rejeito	21
2.3. Fluido dinâmica computacional.....	21
2.3.1. FLOW-3D®	22
2.4. Legislação.....	24
2.4.1. Política Nacional de Segurança de Barragens	24
2.4.2. Estudo de inundação	25
2.4.3. Responsabilidade dos empreendedores.....	26
3. Materiais e Métodos	28
3.1. Material simulado	28
3.2. Simulações numéricas	29
3.2.1. FLOW-3D® HYDRO	29
4. Resultados e Discussão	43
4.1. Resultados obtidos	43

4.1.1. Hidrograma.....	49
4.1.2. Curva de submergência.....	52
4.2. Comparação entre casos com fases discretas e casos com média de teor	55
4.3. Volume de fluido no reservatório	59
5. Conclusão.....	61
5.1. Exigências legais.....	61
5.2. Sugestões para futuras pesquisas	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS	67

1. Introdução

Barragens são estruturas civis construídas para retenção e reserva de água e outros materiais tanto líquidos quanto sólidos ou mistura de ambos (BRASIL, 2010). Estas estruturas são construídas levando-se em conta a topografia dos arredores, de maneira a criar um reservatório ao combinar a barragem com as características topográficas circundantes (KERR e ULRICH, 2011).

No contexto da mineração, as barragens são construídas para formar reservatórios onde são depositados os rejeitos. O rejeito é todo material sem valor econômico advindo do processo de beneficiamento de minério (CHÁCARA, 2020). Ele é composto por água e partículas finas em suspensão. Este material é transportado e depositado em reservatórios formados por barragens (DUARTE, 2008).

A concentração de particulados finos altera as propriedades reológicas do rejeito. A mistura hiperconcentrada passa a se comportar como um fluido não-Newtoniano (PÉREZ, 2021). Fluidos não-Newtonianos são aqueles que não estão sujeitos à Lei de Viscosidade de Newton e possuem um comportamento de tensão-deformação não-linear (MOON et al., 2019).

A Lei nº 12.334/2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o art. 3º desta lei enumera os objetivos da PNSB. Estes objetivos são, dentro outros, observância dos padrões de segurança de barragens, fomento a proteção contra acidentes e desastres e redução da possibilidade destes ocorrerem. O art. 6º da Lei 12.334 institui os instrumentos da PNSB e, dentre eles, o Plano de Segurança de Barragens (PSB) que inclui o Plano de Ação Emergencial (PAE). O empreendedor deve confeccionar o PSB contendo informações técnicas sobre a barragem e o PAE contendo ações a serem tomadas em casos emergenciais (DNPM, 2017).

O Estudo de Inundação é um estudo que caracteriza potenciais impactos oriundos de uma ruptura de barragem de rejeito (DNPM, 2017). Sua elaboração e inclusão no PAE passou a ser obrigatória por resolução da Agência Nacional de Mineração em 2020 (ANM, 2020). Entretanto, não é estabelecido em lei os parâmetros específicos ou metodologia de criação e validação destes estudos.

Os desastres ocorridos em Mariana e Brumadinho em 2015 e 2019, respectivamente, mostram o potencial destrutivo de um rompimento de barragem. Contabilizando ambos, foram

285 mortos e 4 desaparecidos além do dano material e ambiental (G1 MG, 2016; MANSUR e ANDRADE, 2022).

Quando ocorre a ruptura de uma barragem de rejeito, o material contido no reservatório escoou pela área a jusante da barragem. O comportamento deste e qualquer escoamento é objeto de estudo da reologia, ramo da física que estuda deformação e fluxo de matéria (MEZGER, 2017), e da fluido dinâmica, a ramo da mecânica dos fluidos que descreve o fluxo dos fluidos (JOHNSON, 2016).

Na segunda metade do século XX, com o advento da era digital, computadores passaram a ser empregados na resolução numérica de equações diferenciais na matemática, física e engenharia (CHUNG, 2002). A aplicação de computadores na resolução de problemas de fluxos e escoamentos deu origem à fluido dinâmica computacional. Pode-se dizer que este ramo da ciência é o conjunto de técnicas que auxiliam um computador a resolver problemas relacionados ao escoamento de fluidos (BHATTI et al., 2020).

1.1. Relevância deste trabalho

Considerando o histórico recente de acidentes envolvendo rompimentos de barragens de rejeito, a enorme perda de vida e material que ocorreram, as mudanças na legislação decorrente destes desastres (SENADO NOTÍCIAS, 2020) e a ausência de metodologia concretamente estabelecida na legislação vigente (PAIVA, 2020), este trabalho é relevante porque defende que se faz necessária a compreensão reológica do rejeito. Além de apontar que o uso da fluido dinâmica computacional pode ajudar a compreender melhor o comportamento da propagação de onda material oriunda da ruptura de uma barragem e, ao munir-se deste conhecimento, pode-se apontar práticas que objetivem a segurança dos trabalhadores, da população e de ambientes periféricos observando os critérios e preceitos da legislação com parâmetros e metodologias cientificamente validadas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

Analisar cenários de propagação de onda de rejeito com diferentes características reológicas oriunda de rompimento de barragem, e comparar os resultados obtidos dos cenários e a literatura científica com a legislação vigente referente à segurança de barragens.

1.2.2. Objetivos específicos

- Fazer levantamento de dados reológicos de materiais constituintes de barragens de rejeito de minério de ferro;
- Manipular os dados de forma a serem empregados na confecção das simulações numéricas de propagação de onda de rejeito proveniente de ruptura de barragem;
- Configurar e realizar as simulações numéricas utilizando o software de fluidodinâmica computacional Flow-3D ® HYDRO®;
- Comparar os resultados obtidos das simulações entre si para a compreensão do comportamento das ondas com diferentes características reológicas;
- Discutir a literatura acadêmica e o conhecimento adquirido através das simulações numéricas realizadas com a legislação vigente.

2. Revisão Bibliográfica

Nesta seção está apresentada uma revisão bibliográfica acerca de temas como reologia, barragens de rejeito, fluidodinâmica computacional e legislação brasileira que regulamenta a segurança de barragens.

2.1. Reologia

Segundo Mezger (2017), reologia é um ramo da física que se ocupa em estudar a deformação e o fluxo de qualquer material.

2.1.1. Viscosidade

Mezger (2017) define a viscosidade de um material como a resistência ao escoamento causado pelo atrito interno deste. Este atrito origina-se nas colisões entre as partículas e moléculas que constituem um material. A Agência Nacional de Petróleo (ANP) por meio da Portaria ANP nº 80, de 30 de abril de 1999, define viscosidade de um fluido como “a medida da sua resistência ao escoamento a uma determinada temperatura” (ANP, 1999).

Fluidos que obedecem a Lei de Viscosidade de Newton, expressa na Equação 1, são chamados de fluidos Newtonianos. Nesta lei, a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento são linearmente proporcionais (MOON et al., 2019).

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento; η é a viscosidade; e $\frac{du}{dy}$ é a taxa de cisalhamento.

2.1.2. Fluidos não-Newtonianos

Moon et al. (2019) explicam que para fluidos Newtonianos, a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é constante. Esta razão constante é a viscosidade (η). Porém fluidos não-Newtonianos não estão sujeitos à Lei de Viscosidade de Newton, então a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento não é uma constante. Portanto, no caso de fluidos não-Newtonianos, dá-se o nome de viscosidade aparente (MOON et al., 2019).

A Figura 1 apresenta um gráfico mostrando a variação da taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento para um fluido Newtoniano e diferentes tipos de fluidos não-Newtonianos, sendo estes: (A) Plástico de Bingham; (B) Fluido Pseudoplástico; (C) Fluido Dilatante; e (D) Fluido Newtoniano (ATEEQ, 2015).

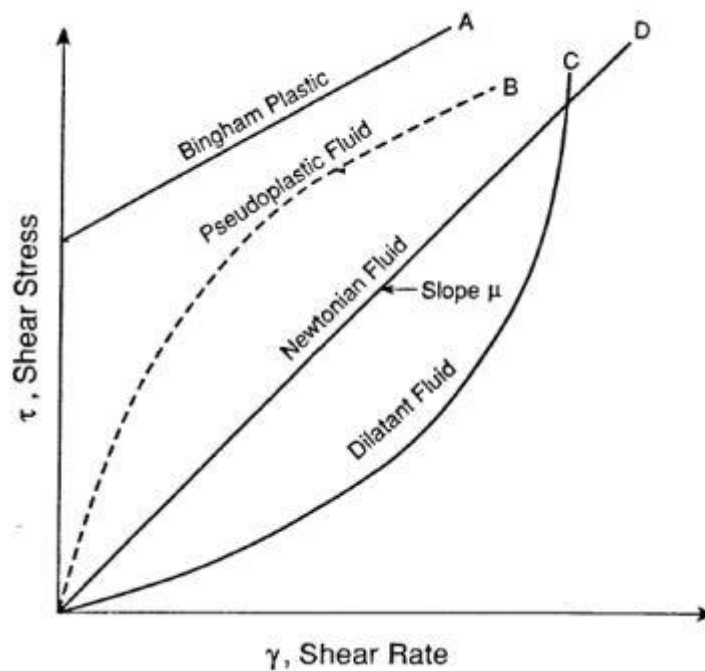


Figura 1 — Gráfico da taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento

2.1.3. Fluido de Herschel-Bulkley

Alexandrou et al. (2000) definem fluido de Herschel-Bulkley como uma classe de fluidos não-Newtonianos que para deformar precisa sofrer uma tensão superior à tensão limite, chamada tensão de escoamento. Quando a tensão exercida sobre um fluido de Herschel-Bulkley não supera a tensão de escoamento, o fluido comporta-se como um sólido.

Quando a tensão de escoamento é excedida, o fluido escoando podendo assumir o comportamento de um fluido dilatante ou de um fluido pseudoplástico (ALEXANDROU et al., 2000).

O comportamento de um fluido de Herschel-Bulkley depende da relação entre a taxa de deformação e a viscosidade aparente, expressa pela Equação 2 (MOON et al. 2019). Onde: τ_0 é a tensão de escoamento; K é a consistência; e n é o índice de escoamento.

$$\tau = \tau_0 + K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (2)$$

Pode-se calcular a viscosidade aparente de um fluido de Herschel-Bulkley a partir da manipulação das Equações 1 e 2, obtendo a igualdade expressa na Equação 3.

$$\eta = \tau_0 \left(\frac{du}{dy} \right)^{-1} + K \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \quad (3)$$

Estudos reológicos feitos com rejeitos de minérios mostram que estes materiais são altamente viscosos e possuem comportamento pseudoplástico, portanto podem ser modelados com um fluido de Herschel-Bulkley. Nos cenários realizados neste trabalho, os materiais se comportam como um fluido de Herschel-Bulkley, porque o software Flow-3D® HYDRO modela o rejeito como este tipo de fluido (FLOW-3D® HYDRO, 2020).

2.1.4. Características do rejeito

Segundo Kerr e Ulrich (2011), o rejeito é composto de sólido, líquido e gás. O líquido mais comum é água e o gás é ar atmosférico, eles ocupam os vazios entre as partículas de sólido.

A massa do rejeito é o somatório das componentes M_s e M_w , que representam respectivamente a massa dos sólidos e a massa da água. O volume é V_s , V_w e V_a , respectivamente os volumes dos sólidos, da água e do ar que compõe o rejeito (KERR e ULRICH, 2011).

A partir destas medidas pode-se calcular os índices físicos imprescindíveis para a compreensão e estudo do rejeito de minério. A concentração mássica de sólidos (C_m) é a razão entre a massa de sólidos e a massa de total do material (KERR e ULRICH, 2011), é expressa em porcentagem e pode ser definida pela Equação 4.

$$C_m = \frac{M_s}{M_s + M_w} \quad (4)$$

O teor de umidade (*moisture content, mc*), isto é, a razão entre a massa de água e a massa de sólidos (KERR e ULRICH, 2011), que é expresso em porcentagem e pode ser definido pela Equação 5.

$$mc = \frac{M_w}{M_s} \quad (5)$$

A massa específica (ρ) do rejeito é definida como a massa total do rejeito contido em uma unidade de volume (KERR e ULRICH, 2011), e pode ser calculado pela Equação 6.

$$\rho = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_w + V_a} \quad (6)$$

A massa específica dos sólidos (ρ_s) do rejeito é a razão entre a massa de sólidos e o volume de sólidos (KERR e ULRICH, 2011), e pode ser expressa pela Equação 7.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (7)$$

A concentração volumétrica de sólidos em uma unidade de volume de rejeito pode ser calculada através da Equação 8 ou 9.

$$C_V = \frac{V_s}{V_s + V_w + V_a} \quad (8)$$

$$C_V = \frac{C_m}{\rho_s} \quad (9)$$

Com a concentração volumétrica (C_V) encontra-se o valor do percentual de sólidos em um material, parâmetro usual para simulações numéricas (PAIVA, 2020).

2.1.5. Classificação do fluxo

O escoamento da mistura de água e finos, chamada rejeito, é um fluxo hiperconcentrado, isto é, “movimento de um fluido em que uma alta concentração de material sólido é transportado” (GARCÍA et al., 2008). O’Brien e Julien (1985) classificaram o fluxo hiperconcentrado quanto à concentração de sedimentos finos em quatro tipos de escoamentos: escoamento aquoso (*water flood*), *mud-flood*, *mudflow* e deslizamento de terra (*landslides*). A densidade real dos grãos, G_s , utilizado pelos autores para os ensaios é 2,65.

O *mud-flood* possui concentrações volumétricas de sólidos variando entre 20% e 45% (WINTERWERP et al., 1990) e não apresentam tensão de escoamento finita. O *mudflow* é caracterizado por possuir entre 45% e 55% de volume composto por sólidos, suporta tensões sem ceder ao escoamento, apresentando alta tensão de escoamento (GARCÍA et al., 2008).

Já os deslizamentos de terra (*landslides*), como o nome sugere, são deslizamentos de grandes volumes de terra e pouco volume de água (BAGNOLD, 1956).

A classificação elaborada por O’Brien e Julien (1985) é apenas uma das várias criadas para interpretar o escoamento de fluidos hiperconcentrados, os valores de concentração volumétrica não são fixos, podendo um material escoar de maneira inesperada com base em sua faixa de teor de sólidos (GARCÍA et al., 2008). A Tabela 1 foi formulada com base na classificação de O’Brien e Julien (1985).

Tabela 1 — Tipos de escoamento em função da concentração de sólidos

Tipo de Escoamento	Concentração volumétrica (C_v)	Concentração mássica (C_m)	Características do Escoamento
Deslizamento (<i>Landslides</i>)	0,53 – 0,90	0,75 – 0,96	Não há escoamento; falha por deslizamento de blocos
	0,50 – 0,53	0,73 – 0,75	Falha por deslizamento de blocos com deformação interna; <i>creep</i> antes da falha
<i>Mudflow</i>	0,48 – 0,50	0,72 – 0,73	Escoamento evidente; deformação plástica sob próprio peso; coeso; não espalha sobre a superfície
	0,45 – 0,48	0,69 – 0,72	Início do espalhamento; coeso
<i>Mud-Flood</i>	0,40 – 0,45	0,65 – 0,69	Mistura-se facilmente; exhibe propriedades fluidas na deformação; espalha-se sobre superfícies horizontais, mas o fluído apresenta ângulo de repouso; sedimentação de granulometrias grosseiras; ondas aparecem, mas dissipam rapidamente
	0,35 – 0,40	0,59 – 0,65	Sedimentação clara; espalhamento quase completo sobre superfícies horizontais; aparecimento da fase líquida na superfície; ondas propagam por distâncias consideráveis
	0,30 – 0,35	0,54 – 0,59	Separação de água na superfície; duas fases; ondas se propagam facilmente; sedimentação de partículas granulares
	0,20 – 0,30	0,41 – 0,54	Ação de onda clara; superfície fluida; sedimentação de todas as partículas em condições de repouso do fluído
Escoamento aquoso (<i>Water Flood</i>)	< 0,20	< 0,41	Escoamento de água com partículas em suspensão e sedimentadas no fundo

2.1.6. Reometria

Reometria é o conjunto de técnicas utilizadas para mensurar as propriedades reológicas de um material (MEZGER, 2017).

Uma das técnicas para obtenção de dados é através do emprego de um reômetro em ensaios rotacionais com tensão de cisalhamento controlada (CSR). Como o nome sugere, neste tipo de ensaio controla-se a taxa de cisalhamento e obtém-se como resultado a tensão cisalhante. A partir de ambas, calcula-se a viscosidade (CHÁCARA, 2020).

2.2. Barragens de rejeito

A NBR 13028-2017 (ABNT, 2017) que trata da elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos descreve os termos e as definições para a compreensão do documento. Rejeito é definido como “todo e qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios”; disposição de rejeitos como “forma planejada e organizada de acumular rejeitos com minimização de riscos estruturais e ambientais”; e barragens para disposição de rejeitos como “estruturas utilizadas para reter de forma planejada, projetada e controlada, volumes de rejeitos advindos do processo de beneficiamento de minério”.

A mineração envolve processos físicos e químicos que separam o mineral de interesse (ESPÓSITO, 2000). Rejeitos formam um dos maiores volumes de materiais descartados de atividades mineiras, sendo o estéril outro resíduo de volume comparável, e possuem propriedades químicas e físicas que variam de acordo com o minério e com os processos no beneficiamento. A combinação destes dois fatores torna a disposição de rejeitos um dos maiores desafios de administração de risco enfrentados na atividade mineira (KERR e ULRICH, 2011).

Vários acidentes ocorridos em instalações de disposição de rejeitos já resultaram em mortes, danos materiais irreparáveis e devastação ambiental. Entretanto, existem maneiras seguras de construir, desenvolver, operar e descomissionar uma barragem, o desafio é manter consistência na aplicação destas, ao longo de toda a vida útil da barragem.

2.3. Fluido dinâmica computacional

Bhatti et al. (2020) definem a fluido dinâmica computacional (computational fluid dynamics ou CFD) como sendo o conjunto de técnicas que auxiliam um computador a resolver problemas relacionados ao escoamento de fluidos. O emprego de computadores na resolução numérica de equações diferenciais se tornou prática comum na segunda metade do século XX (CHUNG, 2002).

Wendt (2009) explica que CFD é programada em uma estrutura de algoritmos numéricos que resolvem problemas de escoamento de fluidos. Estes algoritmos são configurados a partir de uma interface simples e amigável ao usuário de maneira a permitir que leigos consigam inserir os parâmetros de seus problemas e analisar os resultados após a simulação.

2.3.1.FLOW-3D®

O FLOW-3D® é um software de fluidodinâmica computacional desenvolvido pela empresa Flow Science, Inc. O software possui diversos modelos físicos que adicionam diferentes mecanismos físicos aos cálculos das simulações. Estes modelos podem ser ativados ou desativados de acordo com a demanda do usuário e permitem a simulação de transferência de calor, dissolução de objetos e umidade, por exemplo.

Selecionados os modelos físicos a serem simulados, cria-se a geometria da região de fluxo a ser simulada. O FLOW-3D® permite criar a região através da combinação de formas geométricas e a importação arquivos STL (arquivos de modelagem 3D). A geometria criada é incorporada aos cálculos da simulação através do método FAVOR® (*Fractional Area/Volume Obstacle Representation*, Representação Fracional de Área e Volume de Obstáculos em tradução livre). Este método cria uma grade computacional que divide a geometria do objeto em frações de área das faces da grade. Se todos os cantos da face estão dentro da geometria, a face está inteiramente dentro da geometria, mas se todos os cantos estão fora da geometria, a face também está fora. Quando apenas alguns cantos da face estão dentro da geometria, o software assume que há uma conexão em linha reta entre as interseções da geometria com a grade computacional. A Figura 2 mostra a diferença entre a geometria definida pelo usuário e a geometria criada pelo método FAVOR. Diminuindo-se o tamanho da grade, aumenta-se a fidelidade da simulação.

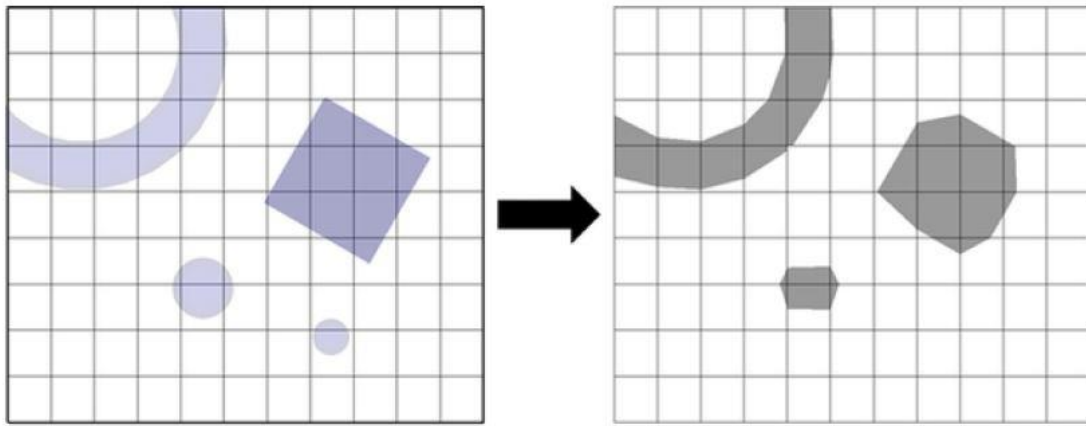


Figura 2 — Diferenças entre a geometria definida e o objeto criado (Manual FLOW Hydro)

A geometria é referenciada num sistema cartesiano XYZ. Após definida a geometria, é necessário definir as condições de contorno, isto é, a ação que os planos limítrofes da região terão sobre os cálculos da simulação.

2.3.1.1. Modelo base

Nos casos simulados por Chácara (2020), foram ativados os modelos físicos Elasto-visco-plasticidade; Gravidade e Referência não inercial; Viscosidade e Turbulência.

A região de fluxo criada foi um paralelepípedo de 600 metros de extensão no eixo X, 1 metro de largura no eixo Y e 10 metros de altura no eixo Z. Dos 600 metros de extensão no eixo X, 100 metros foram designados para ser o reservatório de material e os outros 500 metros foram dedicados ao vale a jusante da barragem. O reservatório possuía 1 metro de largura no eixo Y, o material contido nele atingia a cota de 10 metros.

As condições de contorno foram estabelecidas de maneira a manter o material dentro da região simulada, sem influenciar no seu escoamento. O limite x máximo e z máximo foram definidos como saída fluxo, permitindo que a onda de propagação carregue o material para além dos limites da região simulada. O material que deixa a região é desconsiderado nos cálculos. A **Figura 3** ilustra o modelo geométrico definido por Chácara (2020).

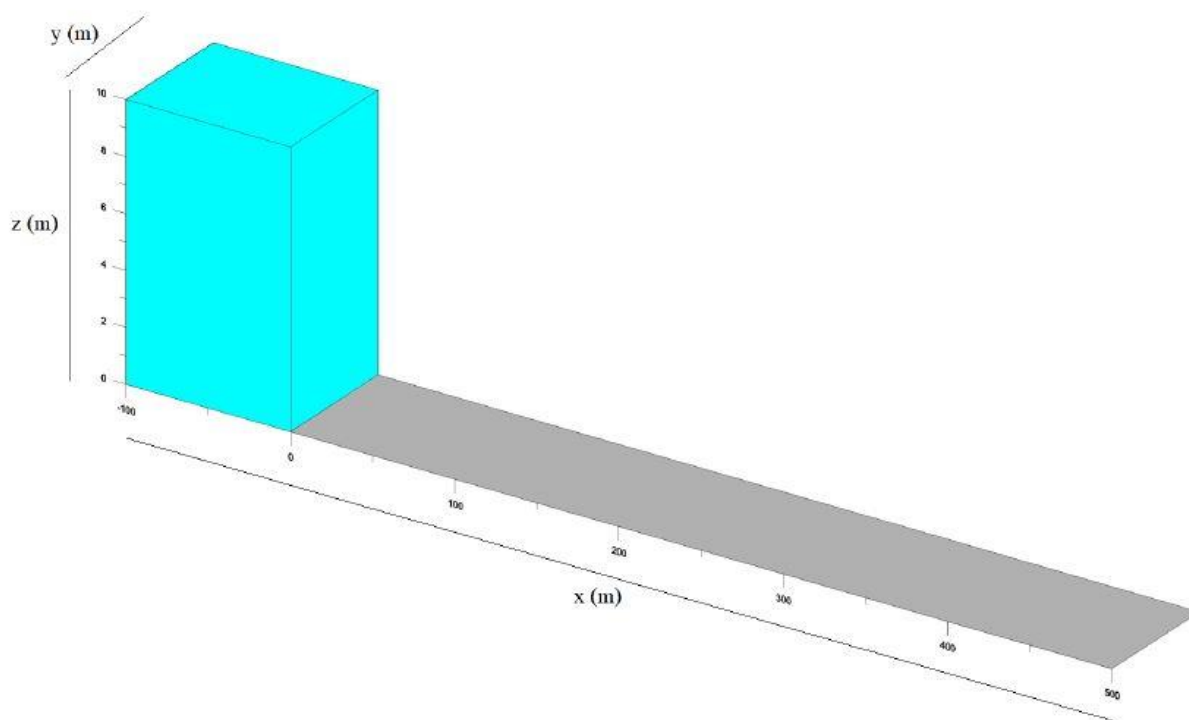


Figura 3 — Modelo geométrico empregado por Chácara (2020) para as simulações numéricas (Chácara, 2020).

2.3.1.2. FLOW-3D® HYDRO

O FLOW-3D® HYDRO é um software desenvolvido pela Flow Science Inc. focado em soluções para indústria de engenharias civil e ambiental. O HYDRO usa como base o *solver engine* do FLOW-3D® e apresenta novos modelos físicos para atender as demandas específicas da indústria a qual o software é direcionado.

2.4. Legislação

Neste item são tratadas as regulamentações que envolvem barragens de rejeito de mineração, em especial aqueles que tratam da segurança de barragens e de simulações numéricas da propagação de onda resultante de um possível rompimento de barragem, temas centrais deste trabalho.

2.4.1. Política Nacional de Segurança de Barragens

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). O art. 3º desta Lei (modificado pela Lei nº 14.066, de 2020) enumera os objetivos da PNSB, dentre os quais está garantir a observância dos padrões de segurança de barragens, fomentar a proteção, e reduzir a possibilidade de acidente ou desastre.

A Lei nº 14.066, de 2020, estabelece definições para acidente e desastre, sendo acidente definido como o “comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa”; e desastre como “ocorrência que afeta o comportamento da barragem ou de estrutura anexa que, se não controlada, pode causar um acidente”.

Como reflexo do histórico recente de acidentes e desastres com barragens no Brasil, citado na seção 1 deste trabalho, a Lei 14.066, de 2020, altera a Lei 12.334, de 2010, proibindo o alteamento de barragem pelo método a montante. O § 1º deste artigo define alteamento a montante como a construção de diques de contenção sobre o rejeito ou sedimento previamente depositado.

A norma brasileira NBR 13028 (ABNT, 1993) desaconselhava a utilização deste método devido aos altos riscos vinculados a esse tipo de barramento até sua revisão em 2006, quando o tópico foi revisto e a observação retirada.

O art. 6º da Lei nº 12.334, de 2010, enumera os instrumentos da PNSB. Entre os quais está incluído: o Plano de Segurança de Barragens (PSB) que deve incluir o Plano de Ação Emergencial (PAE).

O PSB deve ser elaborado pelo empreendedor e deve conter informações técnicas sobre a barragem a que se refere. Já o Plano de Ação Emergencial de Barragens de Mineração (PAEBM), deve conter as ações a serem tomadas em emergências, isto é, na iminência de um acidente ou imediatamente após um. A Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, trata sobre barragens de mineração. Esta resolução regulamenta as informações que devem estar presente nos documentos fornecidos pelo empreendedor, por exemplo, seu conteúdo mínimo, nível de detalhamento, periodicidade das atualizações e outras obrigações.

2.4.2. Estudo de inundação

A Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, considera a definição de diversos termos técnicos. Dentre os termos definidos está Estudo de Inundação, definido como “estudo capaz de caracterizar adequadamente os potenciais impactos, provenientes do processo de inundação em virtude de ruptura ou mau funcionamento da Barragem de Mineração”. A Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, também define mapa de inundação como “produto do estudo de inundação, compreendendo a delimitação geográfica georreferenciada

das áreas potencialmente afetadas por eventual vazamento ou ruptura da barragem e seus possíveis cenários associados”.

O art. 6º da Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, obriga o empreendedor a confecção de um mapa de inundação georreferenciado, com áreas de Zona de Autossalvamento (ZAS) e Zona de Segurança Secundária (ZSS) delimitadas, tempos de viagem de propagação da onda, locais críticos de inundação, corpos hídricos e possíveis impactos ambientais. O mapa de inundação deve ser incluído no PAEBM. A ZAS é definida por essa mesma Resolução no art. 2º como a região a jusante da barragem em que o alerta à população está sob responsabilidade do empreendedor, já que não há tempo hábil para intervenção das autoridades em situações emergenciais. Há duas formas de estabelecer a ZAS, a distância de chegada da onda em 30 minutos ou 10 quilômetros de distância da barragem, se escolhe a maior das duas. A ZSS é definida como as demais áreas do mapa de inundação (DNPM, 2017; ANM, 2022).

Paiva (2020) realizou análise do Estudo de Inundação de oitenta e seis PAEBMs. Paiva (2020) observa que 20% dos Estudos de Inundação não mencionam utilização de software para realizar o estudo.

Quanto ao material dos reservatórios, Paiva (2020) afirma que três PAEBMs erroneamente simularam escoamento de água enquanto o material de suas barragens é rejeito de minério de ferro. Nos outros PAEBMs o material simulado estava de acordo com o material depositado. Entretanto, 78% dos Estudos de Inundação não levaram em consideração as propriedades reológicas do material e outros 10% trataram estas propriedades apenas de forma teórica. Apenas 12% dos PAEBMs analisados utilizaram resultados advindos de ensaios laboratoriais como parâmetros para a simulação numérica do escoamento de material (PAIVA, 2020).

A Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, em seu art. 6º § 2º obriga o empreendedor a confeccionar o Estudo de Inundação. Este artigo estabelece que o empreendedor deve utilizar no mínimo modelos 2D e considerar a caracterização reológica do material passível de escoamento (ANM, 2022).

2.4.3. Responsabilidade dos empreendedores

O art. 225, § 2 da Constituição Federal de 1988 (CF, 1988) fornece a base legal para atribuir o reparo de danos causados pela inundação de rejeito oriundo de rompimento de barragens aos empreendedores da atividade mineira quando obriga “aquele que explorar

recursos minerais (...) a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.”

3. Materiais e Métodos

Nesta seção estão apresentados os materiais e métodos utilizados para a realização das simulações numéricas da propagação de onda proveniente de um modelo simplificado de rompimento de barragem de rejeito de minério de ferro.

3.1. Material simulado

Os sólidos simulados em suspensão na água neste trabalho são rejeitos finos de minério de ferro oriundo de uma mina de ferro do Quadrilátero ferrífero (CHÁCARA, 2020). Os dados utilizados foram obtidos por Chácara (2020) através de ensaios rotacionais realizados com taxa de cisalhamento controlada (CSR).

A partir dos resultados obtidos, Chácara (2020) confeccionou tabelas contendo taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento, viscosidade, temperatura e torque, como o exemplo na Tabela 2.

Tabela 2 — Resultados de ensaio rotacional CSR de rejeito contendo 57% de sólidos de Chácara (2020)

57%				
Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Temperature [°C]	Torque [mN·m]
400	93.139	232.85	23.6	0.99243
301	89.251	297	23.6	0.95099
226	85.808	380.09	23.6	0.91431
170	82.704	487.63	23.6	0.88123
127	79.905	627.12	23.6	0.85142
95.7	77.292	807.46	23.6	0.82357
71.9	74.942	1042.1	23.6	0.79853
54	72.765	1346.9	23.6	0.77533
40.6	70.705	1742.1	23.6	0.75339
30.5	68.845	2257.8	23.6	0.73357
22.9	67.046	2926.9	23.6	0.7144
17.2	65.408	3800.7	23.6	0.69694
12.9	63.913	4943.5	23.6	0.68102
9.71	62.546	6439.5	23.6	0.66644
7.3	61.244	8393	23.6	0.65257
5.48	59.991	10943	23.6	0.63922
4.12	58.821	14282	23.6	0.62675
3.09	57.763	18670	23.6	0.61548
2.32	56.816	24444	23.6	0.60539
1.75	55.873	31996	23.61	0.59535
1.31	54.985	41912	23.61	0.58588
0.986	54.089	54880	23.61	0.57633
0.74	53.332	72031	23.61	0.56827
0.556	52.469	94325	23.61	0.55907

0.418	51.604	1.23E+09	23.61	0.54985
0.314	50.975	1.62E+09	23.61	0.54315
0.236	50.223	2.13E+09	23.61	0.53515
0.177	49.643	2.80E+09	23.61	0.52896
0.133	49.165	3.69E+09	23.61	0.52387
0.1	48.772	4.88E+09	23.61	0.51968

As tabelas que contêm as informações utilizadas no presente trabalho se encontram no Anexo I.

3.2. Simulações numéricas

3.2.1. FLOW-3D® HYDRO

As simulações numéricas do presente trabalho foram realizadas utilizando o FLOW-3D® HYDRO v1.0. O modelo dos casos simulados teve como base Chácara (2020). A autora empregou em suas simulações o software FLOW-3D® v12.0.

3.2.1.1. Modelos físicos

Os modelos físicos ativados para serem simulados foram Gravidade e Não-Inercial; Rejeitos; Turbulência e Viscosidade; e Densidade de Escoamento Variável. Há uma diferença entre os modelos físicos disponíveis no FLOW-3D® e FLOW-3D® HYDRO e, portanto, escolheram-se modelos físicos diferentes daqueles escolhidos por Chácara (2020).

3.2.1.2. Simulação de propriedades reológicas

O novo modelo físico, Rejeitos (“Tailings”), exclusivo do FLOW-3D® HYDRO, permite a simulação de partículas de rejeitos de mineração no fluido. A Figura 4 apresenta a janela de entrada de dados do modelo.

Figura 4 — Entrada de dados do modelo físico Rejeito

O modelo permite simular partículas finas e grossas, não fazendo mais distinção entre o tamanho das partículas dentro destas duas categorias. O tamanho de partículas utilizado para distinguir entre finas e grossas pelo software é $40 \mu m$. Tomando como base para simulação os dados do material estudado por Chácara (2020), ativou-se apenas a simulação de partículas finas, menores que $40 \mu m$, e definiu-se a densidade das partículas como sendo 4030 kg/m^3 .

Há a possibilidade de configurar a sedimentação das partículas em suspensão no fluido, podendo ser escolhido um entre diferentes métodos de ocorrência da sedimentação, a definição da velocidade e a fração máxima de partículas finas sedimentadas.

Devido à natureza dos cenários a serem simulados, a propagação de onda de rompimento de barragem de rejeito, e dos seus curtos períodos de duração, desconsiderou-se a sedimentação de partículas.

Chácara (2020) emprega o modelo físico Elasto-visco-plasticidade disponível no FLOW-3D® para sua simulação, e a entrada de dados de viscosidade no software é feita a partir de uma tabela de viscosidade em função de taxa de cisalhamento, como exibido na Figura 5. Este modelo físico limita a simulação a apenas uma concentração de sólidos por cenário simulado,

já que a relação viscosidade-taxa de cisalhamento varia com a concentração de sólidos no fluido.

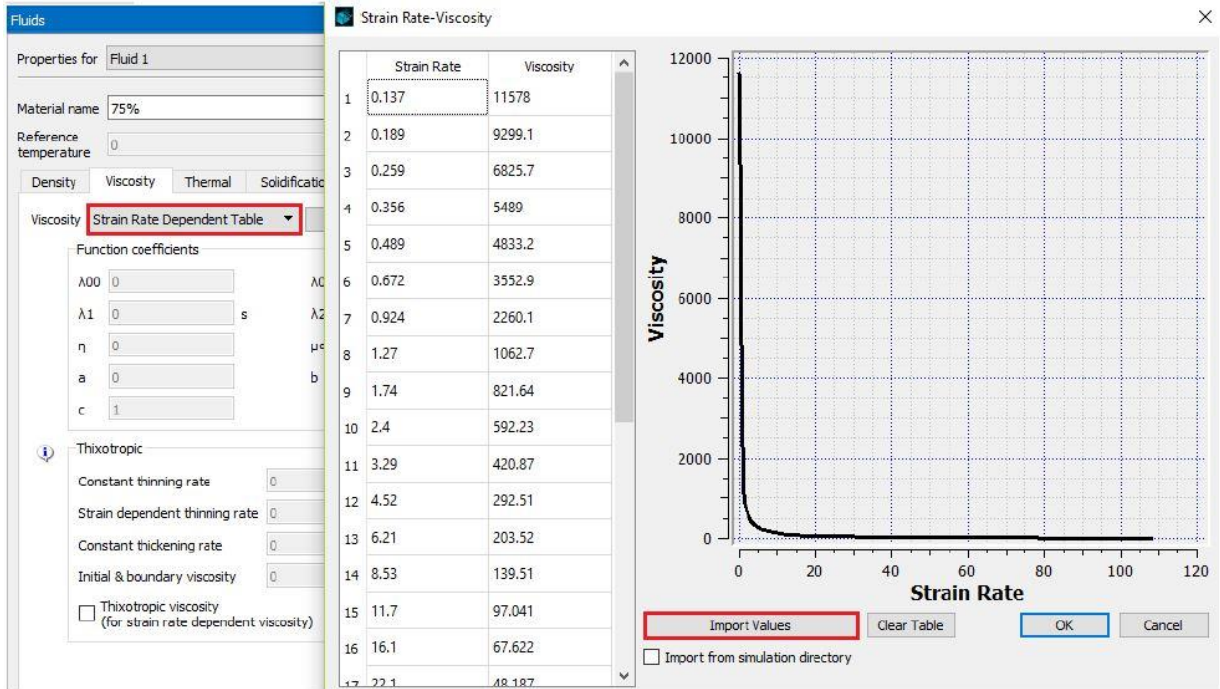


Figura 5 — Tabela de viscosidade dependente da taxa de cisalhamento

Esta limitação do software é resolvida no FLOW-3D® HYDRO. A ativação do modelo físico Rejeitos possibilita simular a viscosidade em função da concentração de finos no fluido. Existem duas formas de simular a viscosidade do material: com a entrada de dados de correlação empírica, ilustrada na Figura 6; ou a entrada de dados tabelados, ilustrada na Figura 7.

Fluids x

Properties for Fluid 1

Material name Water at 20 C

Reference temperature 0 C

Density Viscosity Thermal

Viscosity f(Fine Tailings) Tabular 0.001 kg/m/s

Method Empirical correlation

Function coefficients

$A_{1,f}$ kg/m/s

$B_{1,f}$

$A_{2,f}$ Pa

$B_{2,f}$

n

Maximum apparent viscosity kg/m/s

Minimum fluid strain rate 1/s

Thixotropic

Constant thinning rate 0 1/s

Strain dependent thinning rate 0

Constant thickening rate 0 1/s

Initial & boundary viscosity 0 kg/m/s

Thixotropic viscosity (for strain rate dependent viscosity)

Figura 6 — Entrada de dados da viscosidade por correlação empírica

Fluids

Properties for Fluid 1

Material name Water at 20 C

Reference temperature 0 C

Density Viscosity Thermal

Viscosity f(Fine Tailings) Tabular 0.001 kg/m/s

Method Tabulated data

Function coefficients

Flow index Concentration

Yield stress Concentration

Maximum apparent viscosity kg/m/s

Minimum fluid strain rate 0,001 1/s

Thixotropic

Constant thinning rate 0 1/s

Strain dependent thinning rate 0

Constant thickening rate 0 1/s

Initial & boundary viscosity 0 kg/m/s

Thixotropic viscosity (for strain rate dependent viscosity)

Figura 7 — Entrada de dados da viscosidade por dados tabelados

Neste trabalho empregou-se a entrada de dados de correlação empírica. Os dados entrados foram obtidos a partir de resultados de ensaios reológicos realizados por Chácara (2020) empregando um reômetro modelo MCR 92, fabricado pela empresa austríaca Anton Paar. Para que fossem empregados no FLOW-3D® HYDRO®, os dados foram manipulados como descrito no item 3.2.1.3.

Quando ativado o modelo físico Rejeitos, a mistura de água com partículas finas se torna uma suspensão coloidal. Esta suspensão é um fluido de Herschel-Bulkley e sua viscosidade aparente pode ser calculada pela Equação 3. Ao selecionar-se a viscosidade em função da concentração de finos e a entrada de dados através de correlação empírica, o software considera

a consistência K , a tensão de escoamento τ_y e o índice de escoamento n em função da concentração de finos c_f , segundo a Equação 9 e a Equação 10.

$$K(0) = A_{1,f} e^{B_{1,f} c_f} \quad (10)$$

$$\tau_y(0) = A_{2,f} e^{B_{2,f} c_f} \quad (11)$$

$A_{1,f}$, $A_{2,f}$, $B_{1,f}$ e $B_{2,f}$ são coeficientes empíricos a serem estimados a partir de dados experimentais.

Após a entrada dos dados referente às partículas de rejeito em suspensão na água e à viscosidade da suspensão coloidal resultante, atribui-se a concentração de finos c_f no fluido. Pode-se criar mais de uma fase com concentrações diferentes: primeiro define-se a região a ser ocupada pela fase utilizando coordenadas cartesianas e então define-se a concentração de finos em suspensão naquela região entrando o valor da concentração de finos c_f desejada, conforme ilustrado na Figura 8. Existem duas opções de entradas de dados de concentração, uma para partículas finas e outra para partículas grossas. O presente trabalho utiliza apenas a opção de finos.

The image shows a software interface titled "Tailings concentration". It contains two input fields. The first field is labeled "Coarse particle" and is empty. The second field is labeled "Fine particle" and contains the numerical value "1091,691761". To the right of each field is the unit "kg/m^3".

Figura 8 — Entrada de valores das concentrações de sólidos na condição inicial

O software exige que o valor da concentração c_f seja em quilograma por metro cúbico (kg/m^3), porém para calcular as correlações empíricas o software utiliza o valor da concentração de finos c_f e porcentagem volume-volume (% v/v). A Tabela 3 contém os valores das concentrações em utilizadas neste estudo em porcentagem massa-massa (% m/m), com base em Chácara (2020), e seus valores correspondentes em porcentagem volume-volume e em quilograma por metro cúbico (unidade do Sistema Internacional). Estes valores foram obtidos por cálculos baseados nas relações entre as propriedades físicas apresentadas nas Equações 5, 6 e 8.

Tabela 3 — Concentrações de sólidos em diferentes unidades

$[c_f](\% \text{ m/m})$	$[c_f](\% \text{ v/v})$	$[c_f](\text{kg}/\text{m}^3)$
57,00%	24,72%	996,13
59,88%	26,99%	1087,72
62,00%	28,78%	1159,89

62,50%	29,22%	1177,55
64,72%	31,24%	1259,07
70,00%	36,63%	1476,05
71,90%	38,79%	1563,32

3.2.1.3. Manipulação de dados

Os dados de Chácara (2020) obtidos através de ensaios reológicos utilizados neste trabalho foram tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento dos materiais que apresentavam concentração de sólidos iguais a 57%; 59,88%; 62%; 62,50%; 64,72%; 70%; e 71,90% .

Tomando como base a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento de um fluido expressa na Equação 2, foi possível realizar regressão matemática utilizando os resultados dos ensaios rotacionais com CSR de Chácara (2020) para encontrar os valores da consistência K , a tensão de escoamento τ_y e o índice de escoamento n para teor de sólidos.

Utilizou-se o software OriginPro® 2023b para realizar as regressões matemáticas. Os resultados dos ensaios rotacionais para cada um dos teores sólidos foram plotados em gráficos como ilustrado na Figura 9.

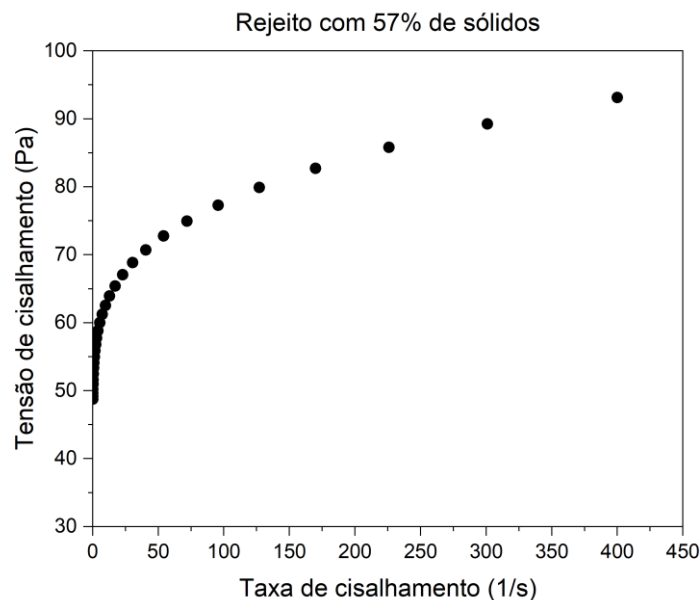


Figura 9 — Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para o rejeito com 57% de sólidos

Pode-se escrever a Equação 2 substituindo a tensão de cisalhamento por y e a taxa de cisalhamento por x . Então obtém-se a igualdade expressa na Equação 12 e que foi utilizada para encontrar a função através de um ajuste de curva não-linear.

$$y = \tau_0 + Kx^n \quad (12)$$

O OriginPro® gera a curva da função resultante no gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento e fornece um relatório com dados, como os valores das constantes com erro e do desvio padrão. A Figura 10 ilustra uma saída típica do software.

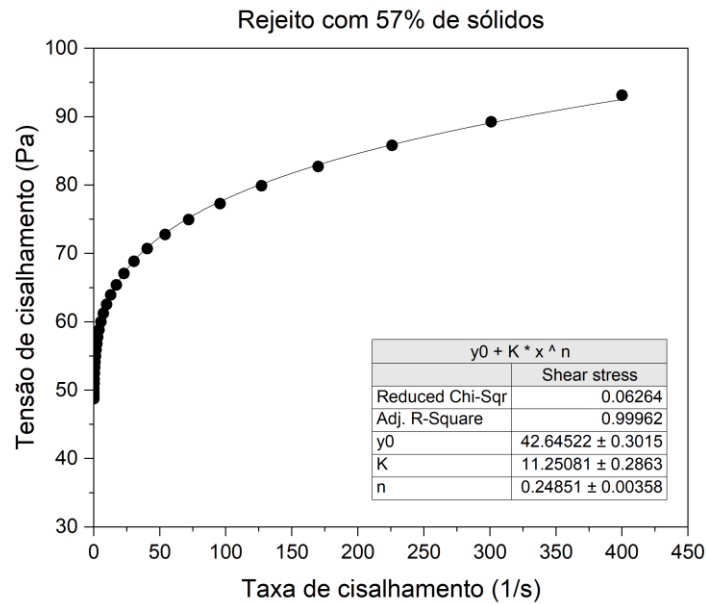


Figura 10 — Resultado obtido a partir do ajuste de curva não linear para o rejeito com 57% de sólidos

Os resultados obtidos nas regressões matemáticas para cada rejeito estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 — Constantes do modelo de fluido Herschel-Bulkley para cada concentração de sólidos

Teor	K	n	τ_y
57,00%	11,2508115	0,2485102	42,64522
59,88%	1,2321072	0,7056045	86,93745
62,00%	13,6871798	0,2801895	76,8583866
62,50%	19,6014378	0,3276841	144,0537198
64,72%	116,1342086	0,1579121	130,4650495
70,00%	317,8765656	0,1715533	554,1944931
71,90%	397,9777657	0,1791658	454,4508988

A partir dos valores obtidos com a regressão matemática, realizou-se duas outras regressões tomando por base a relação apresentada nas Equações 10 e 11. Estas regressões foram realizadas para encontrar os valores de $A_{1,f}$, $A_{2,f}$, $B_{1,f}$ e $B_{2,f}$, a serem utilizados como entrada de dados do software FLOW-3D® HYDRO.

As Equações 10 e 11 expressam, respectivamente, a consistência K e a tensão de escoamento τ_y em função da concentração de finos c_f . $A_{1,f}$ e $B_{1,f}$ são constantes da Equação 10, enquanto $A_{2,f}$ e $B_{2,f}$ são constantes da Equação 11.

Substituiu-se a consistência K e a tensão de escoamento τ_y por y e c_f por x nas Equações 10 e 11 obtendo-se as igualdades expressas nas Equações 13 e 14.

$$y = A_{1,f}e^{B_{1,f}x} \quad (13)$$

$$y = A_{2,f}e^{B_{2,f}x} \quad (14)$$

Novamente utilizou-se o software OriginPro® para ajustar as curvas aos dados de K e τ_y . Segundo o manual do usuário do FLOW-3D® HYDRO, o valor da concentração de finos c_f nas Equações 10 e 11 é expressa em concentração volumétrica. Portanto, para realizar as regressões matemáticas a fim de encontrar os valores de $A_{1,f}$, $A_{2,f}$, $B_{1,f}$ e $B_{2,f}$ foram utilizados os valores de K e τ_y da Tabela 4 e os valores de c_f em concentração volumétrica da Tabela 3.

A Figura 11 ilustra a saída do software OriginPro® para o ajuste de curva relacionado à Equação 14.

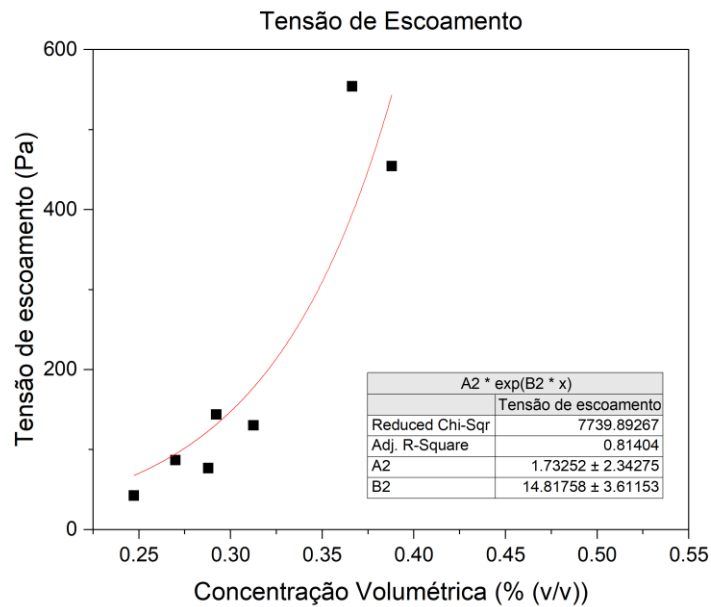


Figura 11 — Resultado do ajuste de curva da tensão de escoamento em função da concentração volumétrica de sólidos finos

Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 — Coeficientes empíricos

Coefficiente	Valor
$A_{1,f}$	0,09881
$B_{1,f}$	21,56896
$A_{2,f}$	1,73252
$B_{2,f}$	14,81758

3.2.1.4. Geometria e condições de contorno

O FLOW-3D® HYDRO está referenciado em um sistema cartesiano XYZ. A região de escoamento criada para as simulações tem formato de paralelepípedo de dimensões 600 metros no eixo X, 1 metro no eixo Y e 15 metros no eixo Z. Criou-se um paralelepípedo de 600 metros de comprimento no eixo X, 1 metro de largura no eixo Y e 1 metro de altura no eixo Z para servir de superfície para toda a região simulada. Para cumprir este fim, este paralelepípedo foi posicionado de maneira que seu plano z máximo coincide com o plano xy.

A região está dividida em duas partes: o reservatório localizado entre as abscissas -100 e 0; e o vale a jusante localizado entre as abscissas 0 e 500. Ambas as partes possuem 1 metro de largura no eixo Y e 15 metros de altura no eixo Z. O ponto de origem do sistema está localizado no vértice inferior da interface reservatório-vale. A Figura 9 ilustra a geometria criada para as simulações.

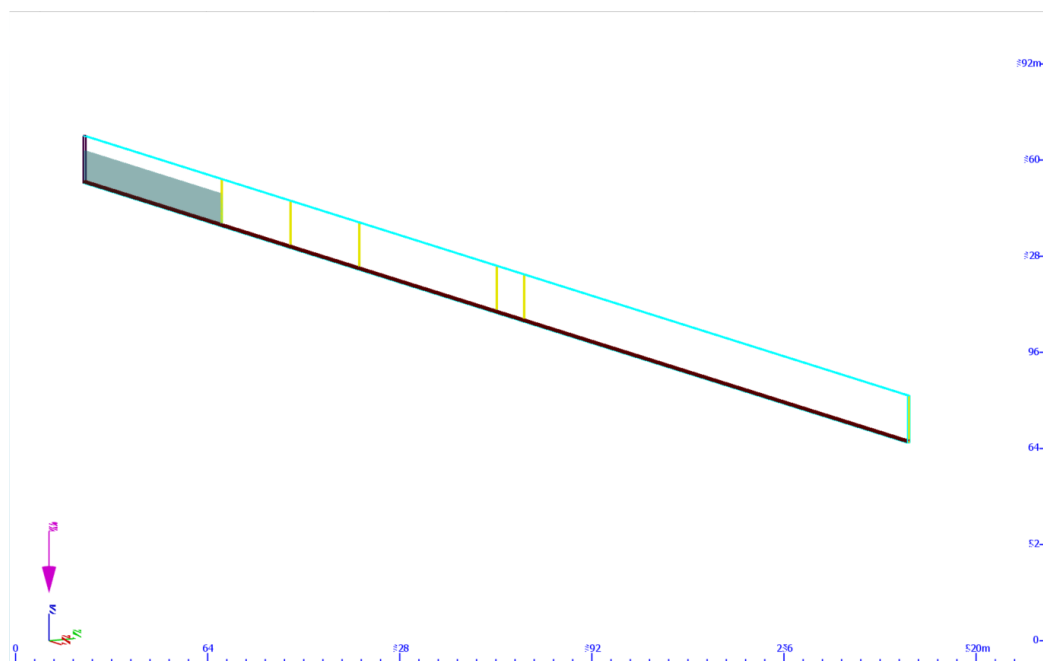


Figura 12 — Imagem do modelo visual do Flow-3D® mostrando a geometria empregada nas simulações

Incluiu-se ao longo do vale a jusante Superfícies de Fluxo (Flux Surfaces) normais à propagação da onda para a captura de dados nas abscissas 0, 50, 100, 200, 220 e 500 e Sondas

de História (History Probes) no ponto médio da aresta inferior das Superfícies de Fluxo. A Figura 13 mostra a Superfície de Fluxo, plano azul, e a Sonda de História, esfera amarela.

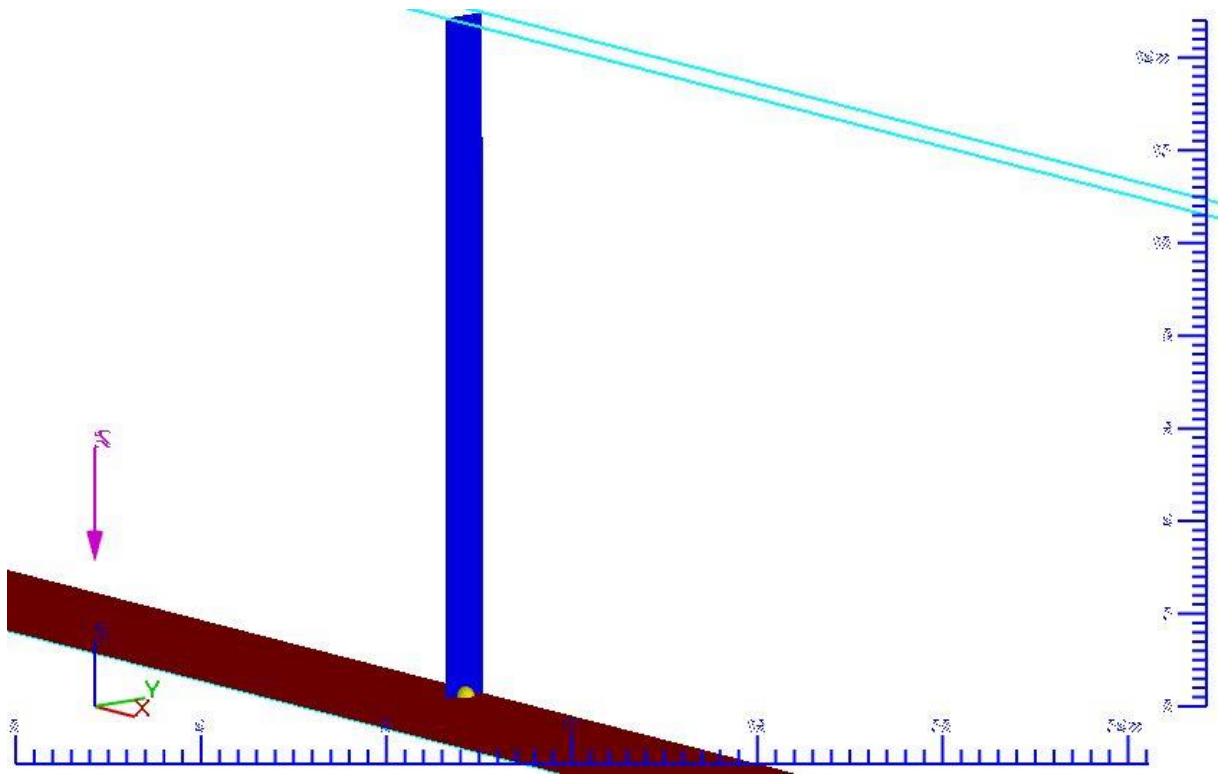


Figura 13 — Flux Surface e History Probe em parte da geometria construída

As condições de contorno utilizadas visaram evitar que o material escapasse do reservatório senão para o vale a jusante e que os planos limítrofes da região não interferissem na propagação da onda de material, com forças de atrito por exemplo. Conforme a Figura 14 mostra, a condição escolhida para os planos x mínimo, y mínimo, y máximo e z mínimo foi *Symmetry*. Esta condição aplica uma condição de gradiente zero ao limite, bem como uma condição de velocidade zero normal ao limite. Ao plano x máximo foi aplicada a condição *Outflow*, que permite ao material que atravessa o plano sair da região simulada e, portanto, passar a ser desconsiderado dos cálculos. Ao plano z máximo aplicou-se a condição *Pressure*, que representa condições ambientais externas, simulando pressão atmosférica.

Boundaries			
Boundary	Type		
X Min	Symmetry	▼	<input type="checkbox"/> Events
X Max	Outflow	▼	<input type="checkbox"/> Events
Y Min	Symmetry	▼	<input type="checkbox"/> Events
Y Max	Symmetry	▼	<input type="checkbox"/> Events
Z Min	Symmetry	▼	<input type="checkbox"/> Events
Z Max	Pressure	▼	<input type="checkbox"/> Events

Figura 14 — Condições de contorno

Em todos os casos simulados, a geometria e as condições de contorno foram as mesmas.

3.2.1.5. Casos simulados

Simulou-se sete casos diferentes. Os casos foram planejados de maneira a compreender as diferenças de comportamento da propagação de onda de rejeito de minério de ferro oriunda de um rompimento de barragem. Formulou-se os seguintes casos a serem simulados: (1) reservatório de água no estado líquido; (2) reservatório de rejeito monofásico com 60% de teor de sólidos ao longo de todo seu volume; (3) reservatório de rejeito monofásico com 75% de teor de sólidos ao longo de todo seu volume; (4) reservatório bifásico contendo rejeito de minério de ferro com 60% de teor de sólidos até a cota 5 e água em estado líquido da cota 5 a cota 10; (5) reservatório bifásico contendo rejeito de minério de ferro com 60% de teor de sólidos até a cota 5 e rejeito de minério de ferro com 75% de teor de sólidos da cota 5 a cota 10; (6) reservatório bifásico contendo rejeito de minério de ferro com 75% de teor de sólidos até a cota 5 e rejeito de minério de ferro com 60% de teor de sólidos da cota 5 a cota 10; e (7) reservatório de rejeito monofásico com 68% de teor de sólidos ao longo de todo seu volume. A Tabela 6 contém as informações dos cenários simulados.

Tabela 6 — Cenários simulados

Cenário	Descrição	Teor 1	Teor 2
1	Água	0%	-
2	monofásico com 60% de teor de sólidos	60%	-
3	monofásico com 75% de teor de sólidos	75%	-
4	bifásico com 60% de teor de sólidos e água	60%	0%
5	bifásico com 60% e 75% de teor de sólidos	60%	75%
6	bifásico com 75% e 60% de teor de sólidos	75%	60%
7	monofásico com 68% de teor de sólidos	68%	-

O caso em que se simula 68% de teor de sólidos foi realizado para analisar comparar uma simulação de material monofásico com o teor de sólidos médio em oposição a uma simulação com duas fases com 60% e 75% de sólidos, prática comum na indústria.

3.2.1.6. Saídas típicas do programa

Após a realização da simulação, o software permite a saída de dados de diversos formatos, dentre elas visualizações unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, tabelas e gráficos. Devido à natureza do experimento, optou-se pelo foco na análise do plano xz , sendo o eixo x o sentido da propagação da onda de material e o eixo z a altura do reservatório e do escoamento do material. A Figura 15 ilustra uma visualização bidimensional de um plano paralelo ao plano xz na ordenada $y = 0,5\text{m}$, no tempo $4,2\text{s}$, aproximadamente, sendo o dado analisado a velocidade no eixo x do fluido 1. A Figura 15 é uma representação típica das saídas obtidas do software Flow-3D® HYDRO. Outra forma de saída de dados utilizada foi o formato *Text Output* que exhibe resultados em tabela. A Figura 16 ilustra uma saída típica de dados em formato de tabela. Estes dados podem ser exportados em forma CSV.

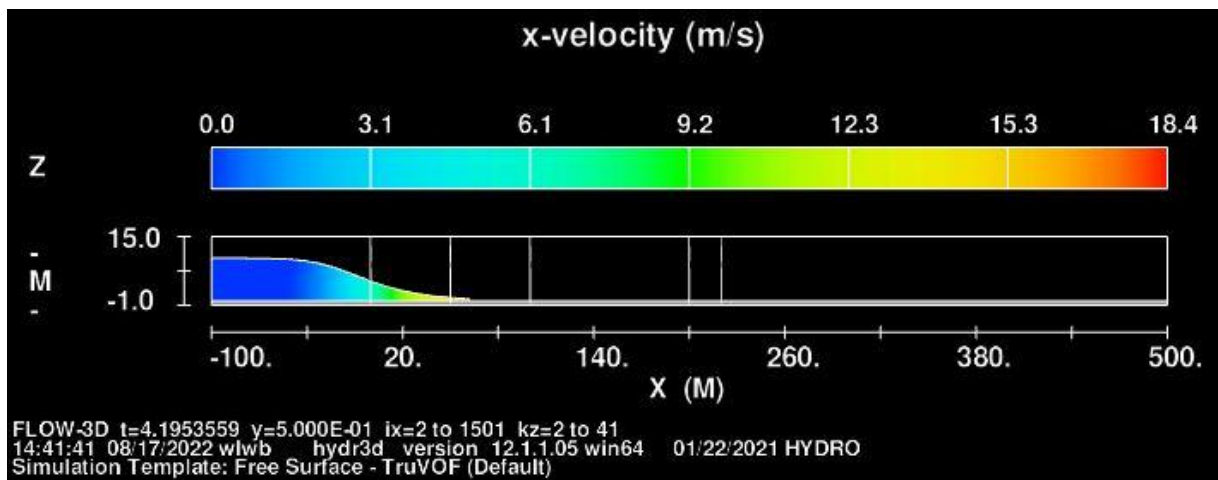


Figura 15 — Exemplo de saída bidimensional do Flow-3D® HYDRO

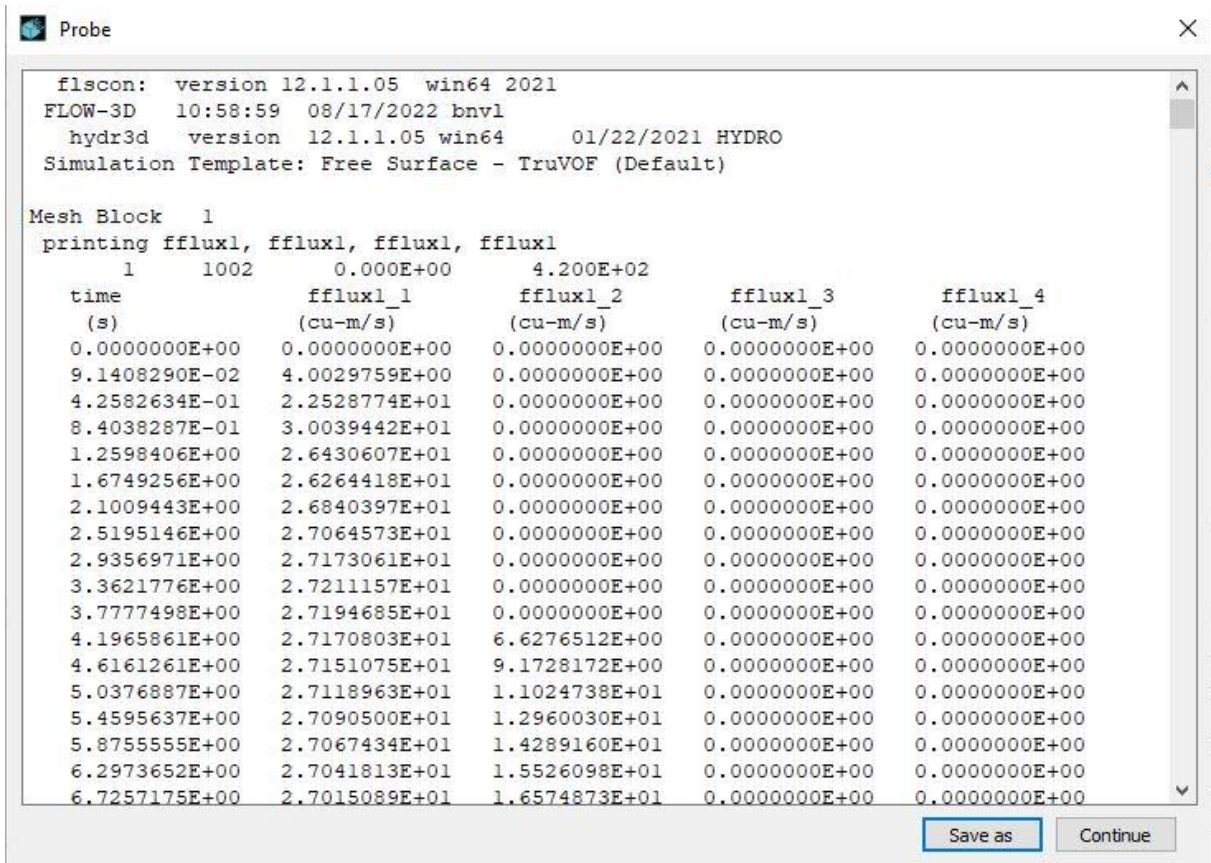


Figura 16 — Saída do Flow-3D® HYDRO do tipo *Text Output*

4. Resultados e Discussão

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações computacionais realizadas e discute-se a legislação vigente relacionada a segurança de barragens e estudos de inundação.

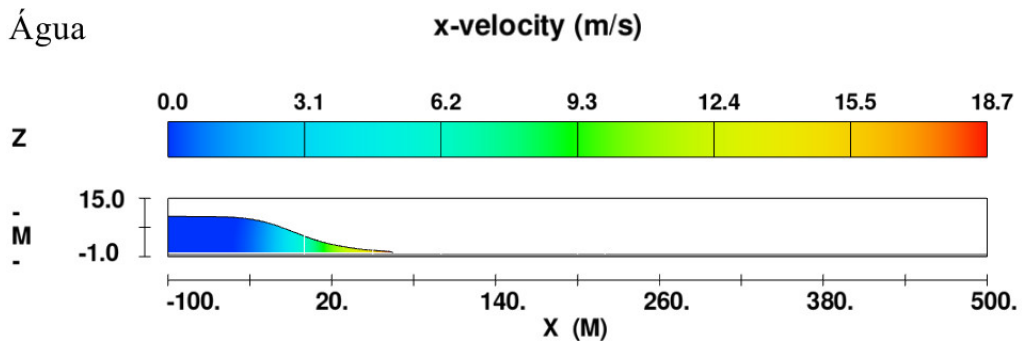
4.1. Resultados obtidos

As Figuras 17, 18, 19 e 20 mostram o comportamento da propagação das ondas após a ruptura nos sete cenários simulados: 1) quando o reservatório contém apenas água; 2) quando contém 60% de sólidos; 3) quando contém 75% de sólidos; 4) quando contém 68% de sólidos; 5) quando contém água sobre rejeito com 60% de sólidos; 6) quando contém rejeito com 60% sólidos sobre rejeito com 75% de sólidos; e 7) quando contém rejeito com 75% de sólidos sobre rejeito com 60% de sólidos.

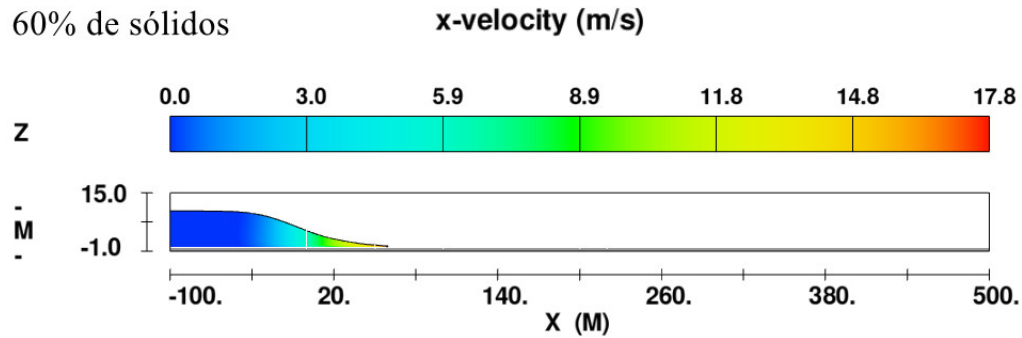
São mostrados os mesmos cenários duas vezes, um no tempo de aproximadamente 4,2 segundos e outro em aproximadamente 25,2 segundos. As Figuras 17, 18, 19 e 20 foram geradas pelo software FLOW-3D® HYDRO e as cores visíveis no interior do fluxo representam a velocidade do material no eixo x ao longo de sua extensão.

Observa-se que dentre os cenários de material monofásico, a água apresentou maiores velocidades, seguida pelo rejeito de contendo 60% de sólidos. Os rejeitos com 68% de sólidos e 75% de sólidos apresentaram as menores velocidades, sendo ambas próximas. A Figura 17 mostra que no primeiro momento ($t = 4,2s$), os cenários apresentam velocidades próximas. Já no segundo instante ($t = 25,2s$), mostrado na Figura 18, a água possui maior velocidade e alcance. O rejeito com 60% de sólidos apresenta maior velocidade e alcance que os rejeitos com 68% e 75% de sólidos, que aparentam serem semelhantes.

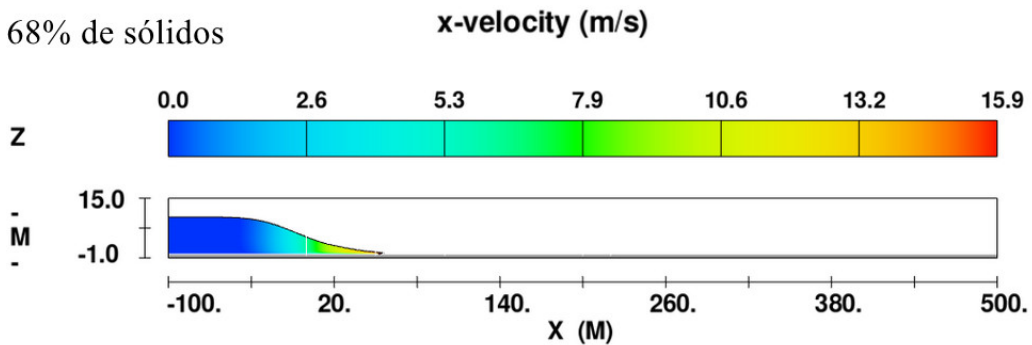
Este resultado mostra a influência da reologia sobre a propagação de uma onda oriunda de uma ruptura de barragem e como, a partir de certo ponto, materiais com concentrações de sólidos finos diferentes podem se comportar de maneiras similares.



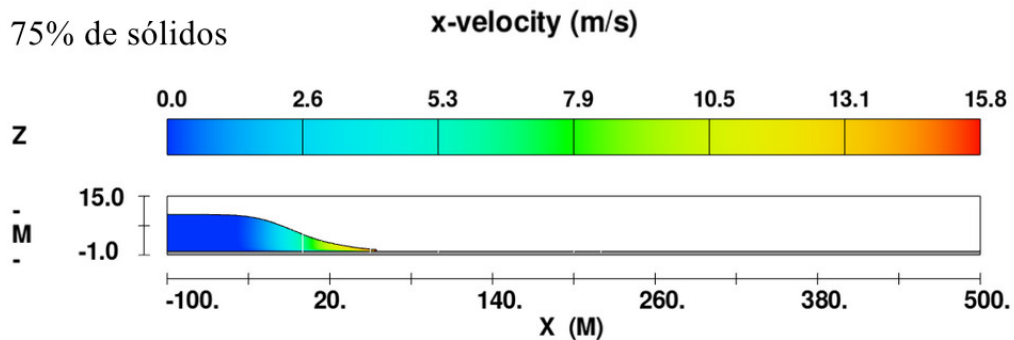
FLOW-3D t=4.1966610 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 18:41:47 12/26/2022 liqj hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)



FLOW-3D t=4.1987205 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 13:03:21 12/14/2022 gpju hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

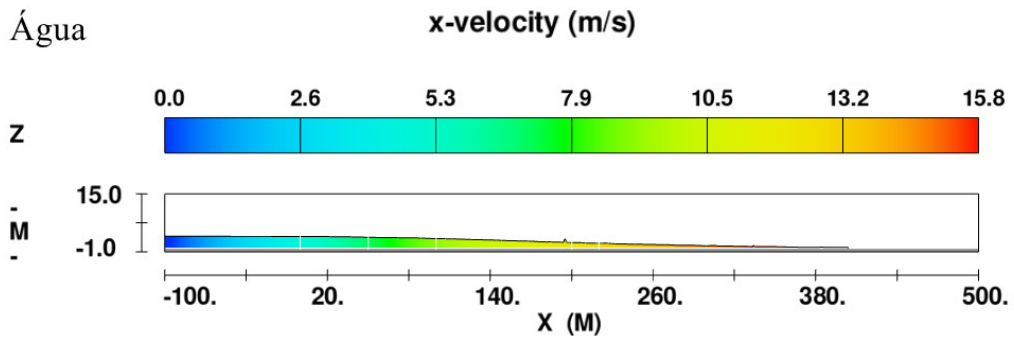


FLOW-3D t=4.1980457 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 13:05:13 12/13/2022 htys hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

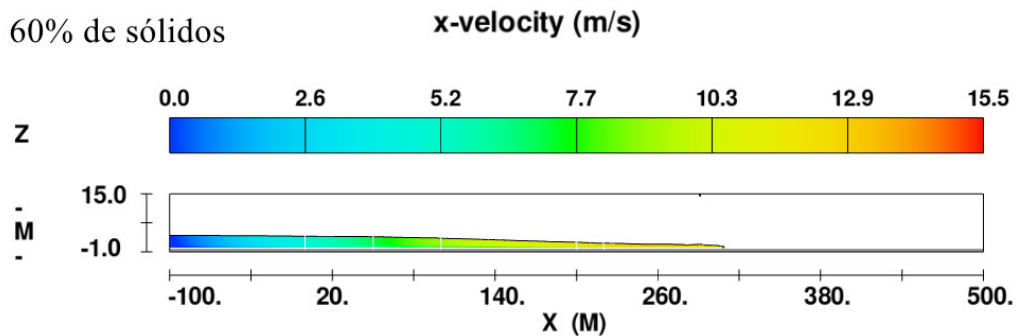


FLOW-3D t=4.1982670 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 15:05:04 12/13/2022 liqj hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

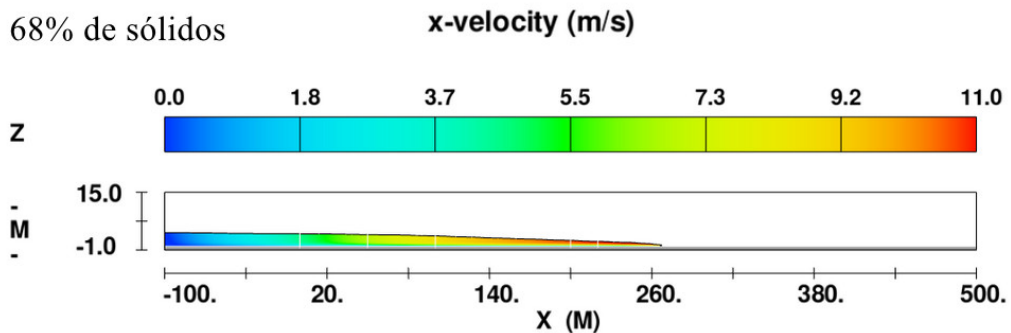
Figura 17 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações monofásicas a aproximadamente 4,2s



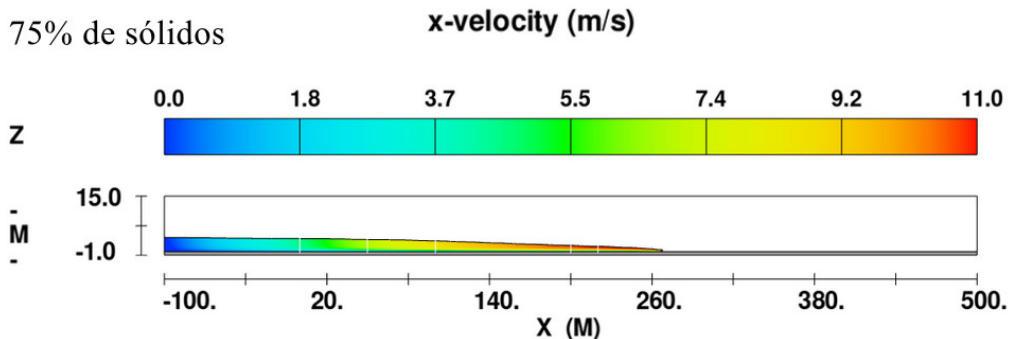
FLOW-3D t=25.196224 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 18:41:47 12/26/2022 liqi hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)



FLOW-3D t=25.198685 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 13:03:21 12/14/2022 gpiu hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)



FLOW-3D t=25.202978 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 13:05:13 12/13/2022 htxs hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

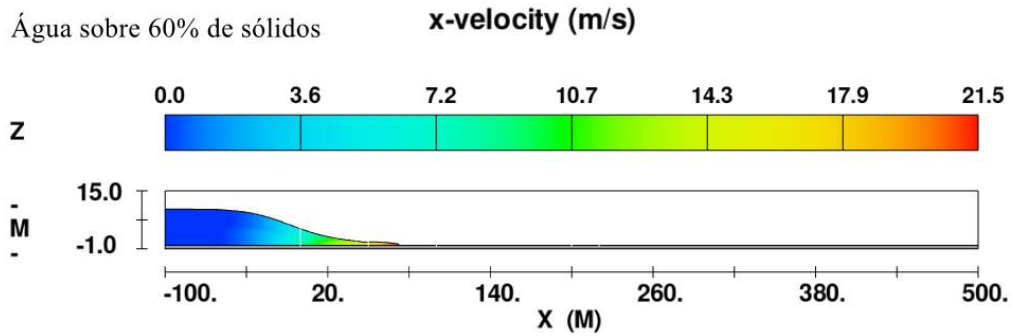


FLOW-3D t=25.197575 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 15:05:04 12/13/2022 liqi hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

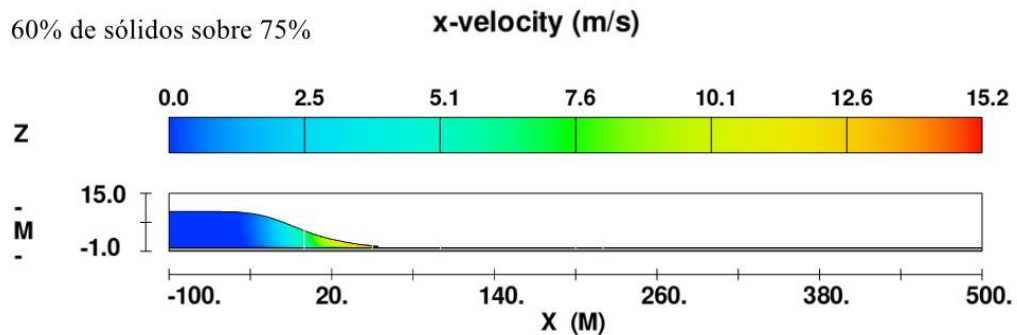
Figura 18 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações monofásicas a aproximadamente 25,2s

No primeiro instante ($t = 4,2s$), o cenário contendo água sobre rejeito com 60% de sólidos finos apresentou a maiores registros de velocidade dentre todos os cenários. Ainda no primeiro instante, o cenário com dois materiais 75% de sólidos sobre 60% de sólidos apresentou velocidade maior que os cenários que continham rejeito com apenas 60% ou 75% de sólidos. Este resultado pode ser um indício de que o fluxo do material inferior facilita o escoamento do material superior.

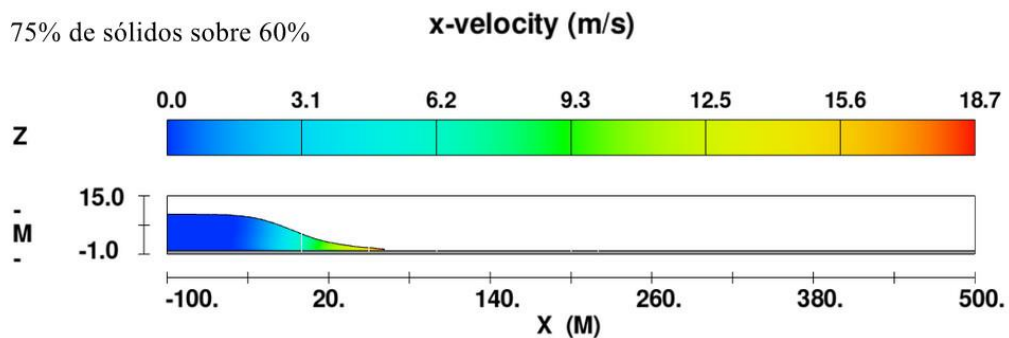
Fato que corrobora com isso é o maior alcance do cenário bifásico onde o rejeito com 75% de sólidos está sobre o rejeito de 60% quando comparado ao cenário bifásico com rejeito com 60% sobre rejeito de 75% ilustrados nas Figuras 19 e 20. O rejeito com 60% de sólidos é menos viscoso e escoar com mais velocidade que o rejeito de 75%. Quando comparados os cenários bifásicos onde os rejeitos com 60% e 75% de sólidos estão presentes, há maior alcance e, portanto, maior velocidade média, no cenário onde o rejeito de 60% de sólidos está na parte inferior do reservatório.



FLOW-3D t=4.2007403 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 14:09:27 02/18/2023 lwbb hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

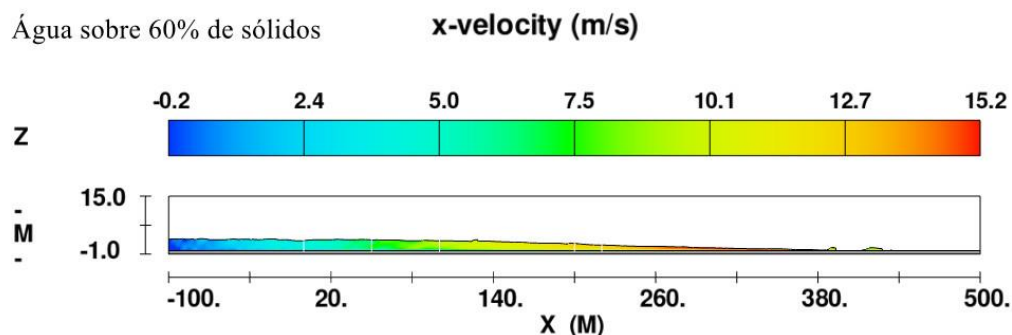


FLOW-3D t=4.2025528 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 16:08:25 02/18/2023 wbbby hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

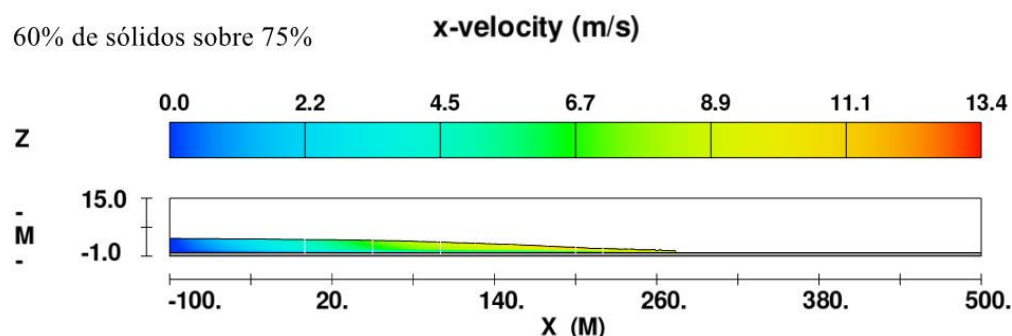


FLOW-3D t=4.2013264 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 17:49:13 02/18/2023 rjju hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

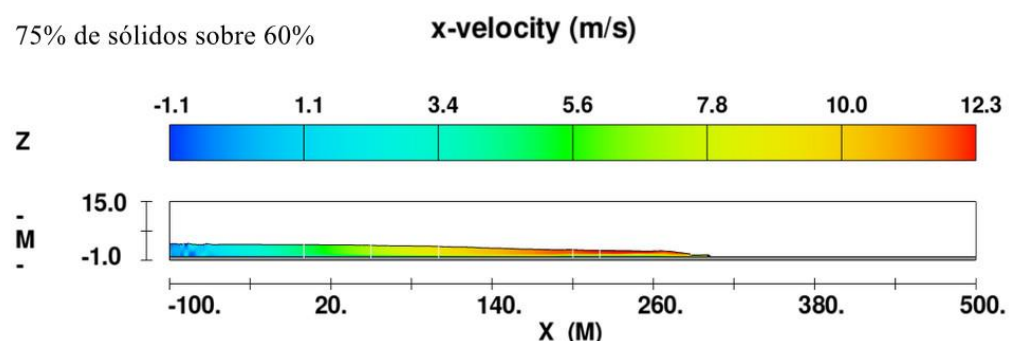
Figura 19 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações bifásicas a aproximadamente 4,2s



FLOW-3D t=25.200583 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 14:09:27 02/18/2023 lwbb hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)



FLOW-3D t=25.204311 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 16:08:25 02/18/2023 wbbby hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)



FLOW-3D t=25.202341 y=5.000E-01 ix=2 to 2001 kz=2 to 54
 17:49:13 02/18/2023 rju hydr3d version 12.1.1.05 win64 01/22/2021 HYDRO
 Simulation Template: Free Surface - TruVOF (Default)

Figura 20 — Perfil de velocidade no eixo x das simulações bifásicas a aproximadamente 25,2s

As Figuras 21 e 22 apresentam dois perfis do cenário simulado de rejeito com concentração de 60% de sólidos sobre 75% de sólidos nos momentos $t = 0s$ e $t = 42s$. Verifica-se que ocorre uma mistura entre as fases. No estado inicial ($t = 0s$) a parte superior do reservatório possui aproximadamente 1091 kg/m^3 de finos (concentração equivalente à concentração mássica de 60% de sólidos) e a parte inferior do reservatório possui 1718 kg/m^3 (equivalente à concentração mássica de 75% de sólidos).

Na Figura 22, está ilustrado o segundo instante ($t = 42s$). Verifica-se a presença de outras concentrações de sólidos no material o que indica uma possível mistura entre as fases.

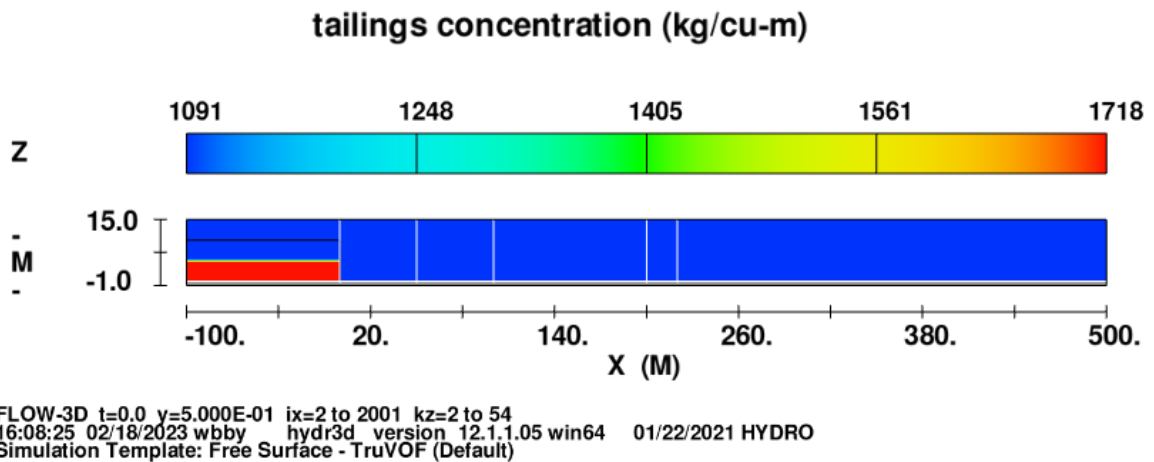


Figura 21 — Estado inicial do cenário contendo rejeito com concentração de 60% de sólidos sobre 75%

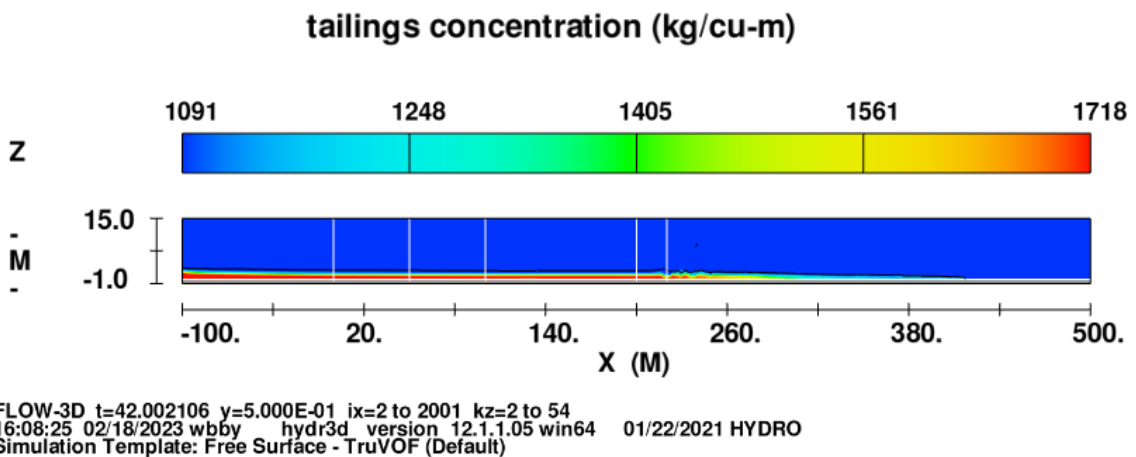


Figura 22 — Estado do cenário contendo rejeito com concentração de 60% de sólidos sobre 75% aos 42 segundos

4.1.1. Hidrograma

As Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28 ilustram os hidrogramas das simulações nos planos yz com valores 0, 50, 100, 200 e 500m para x. Este gráfico mostram a vazão de fluido através do plano ao longo da duração da simulação. Analisando os gráficos é possível perceber quando o fluido atinge o plano, o momento quando as referências saem do valor de vazão igual a zero.

Percebe-se um pico de vazão logo quando o fluido atinge o plano, quando as velocidades são maiores. Depois disso a vazão reduz até chegar a zero o que indica que o fluido entrou em repouso naquele plano. Após atingir o pico, os rejeitos com 68% e 75% de sólidos são os primeiros a atingir o repouso, seguidos pelo rejeito com 60% de sólidos e por último a água. Isso mostra como os materiais com maiores concentrações de sólidos finos se espalham menos horizontalmente.

Apenas no hidrograma do plano $x = 500\text{m}$ é possível perceber uma diferença substancial da chegada do material ao plano, sendo bem distintos o momento em que a curva de vazão sai do valor 0.

A água atingiu as maiores vazões de todos os fluidos simulados. Os rejeitos contendo 68% e 75% de sólidos se comportaram de maneira bem similar como era esperado após a análise dos perfis de velocidade no eixo x .

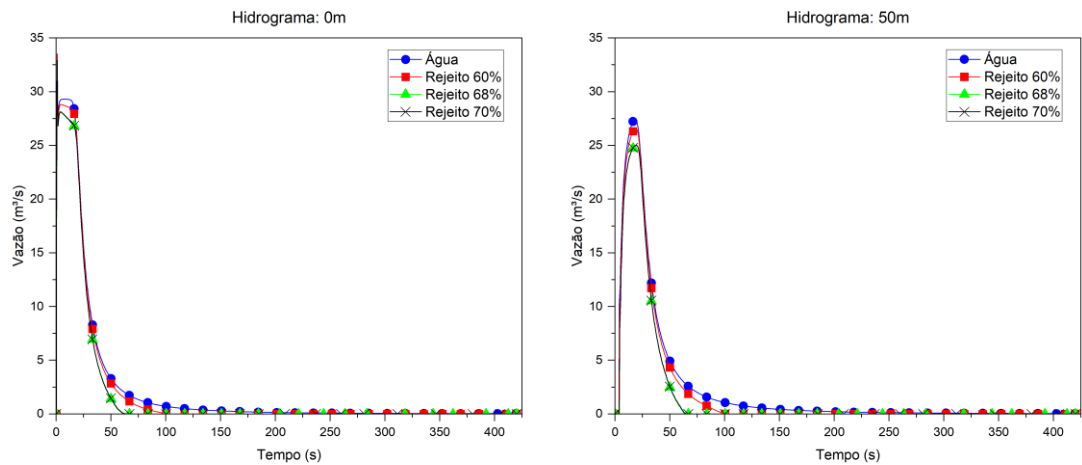


Figura 23 — Hidrogramas das simulações monofásicas nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$

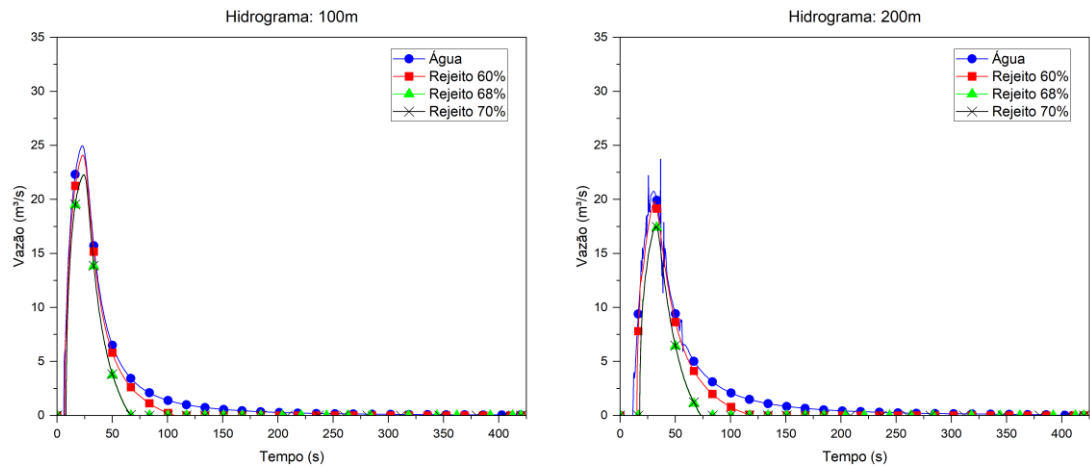


Figura 24 — Hidrogramas das simulações monofásicas nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$

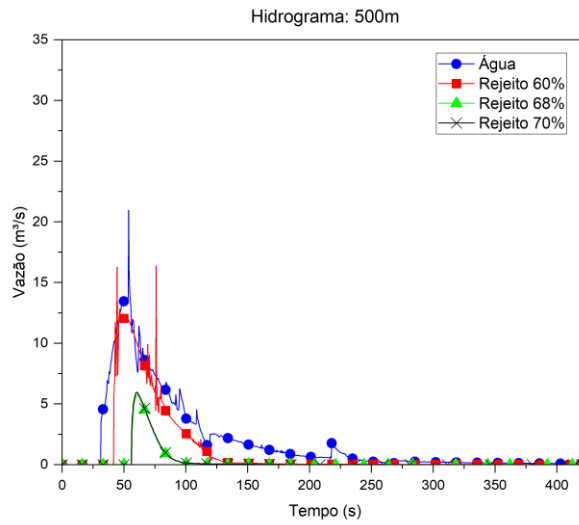


Figura 25 — Hidrogramas das simulações monofásicas no plano $x = 500\text{m}$

Dentre os cenários bifásicos, aquele com os maiores registros de vazão foi o cenário com água sobre o rejeito de 60% de sólidos. Comparando os cenários que possuem ambos os rejeitos de 60 e 75% de sólidos, o cenário onde o rejeito com maior concentração de sólidos na parte superior do reservatório (rejeito com 75% de sólidos sobre rejeito com 60%) apresentou maiores vazões.

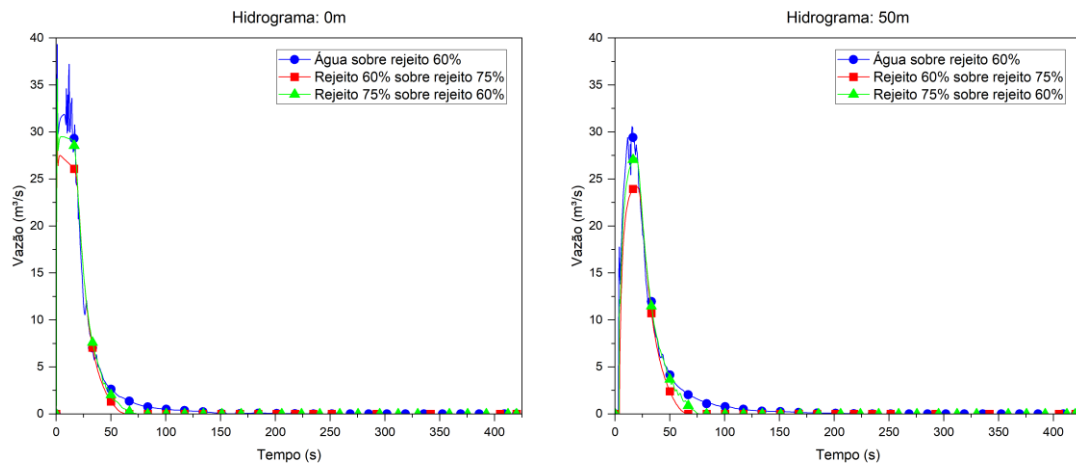


Figura 26 — Hidrogramas das simulações bifásicas nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$

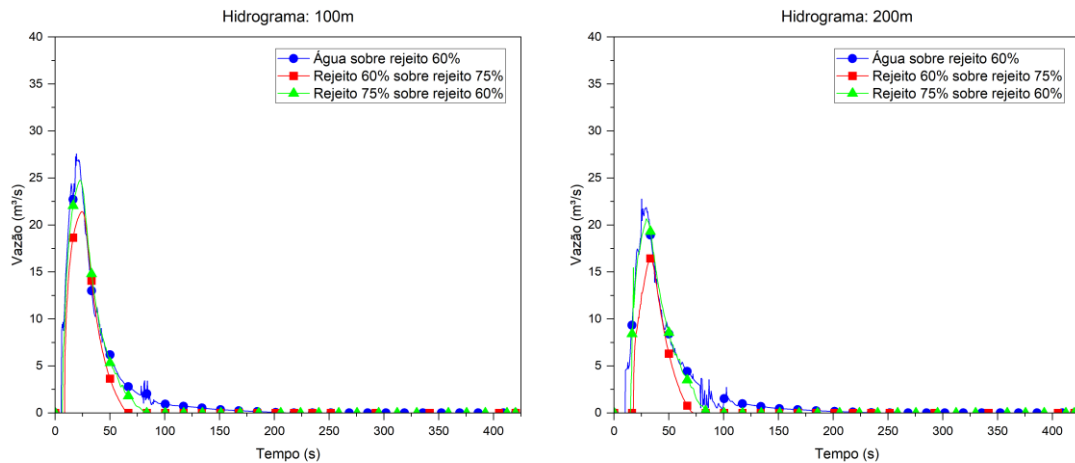


Figura 27 — Hidrogramas das simulações bifásicas nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$

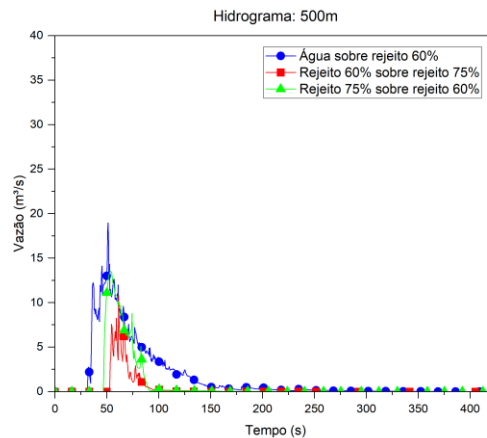


Figura 28 — Hidrogramas das simulações bifásicas nos planos $x = 500\text{m}$

4.1.2. Curva de submergência

As Figuras 29, 30, 31, 33, 34 e 35 ilustram a curva de submergência dos cenários simulados agrupados em cenários monofásicos e bifásicos. A curva representa a altura do fluido nos planos yz com valores 0, 50, 100, 200 e 500m para x .

Quando há estabilidade na curva pode significar um fluxo constante sem turbulência alguma ou uma situação de repouso. Ao analisar-se paralelamente as curvas de submergência e os hidrogramas (presentes nas Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28) percebe-se que a estabilidade da curva de submergência dos cenários simulados está indicando estado de repouso, já que os hidrogramas mostram que a quando a curva de submergência estabiliza-se a vazão é igual a zero.

Analisando-se quando os fluidos com concentração de sólidos se estabilizam, percebe-se que o valor da altura do fluido é diferente em cada um dos planos. No plano $x = 0\text{m}$ os valores das alturas na estabilidade são os maiores e vão decrescendo até que atingem suas menores alturas no plano $x = 500\text{m}$. Este declínio da altura na estabilidade indica a existência de um ângulo de repouso dos fluidos ilustrado na Figura 32, com exceção da água que não atinge o repouso durante o tempo da simulação.

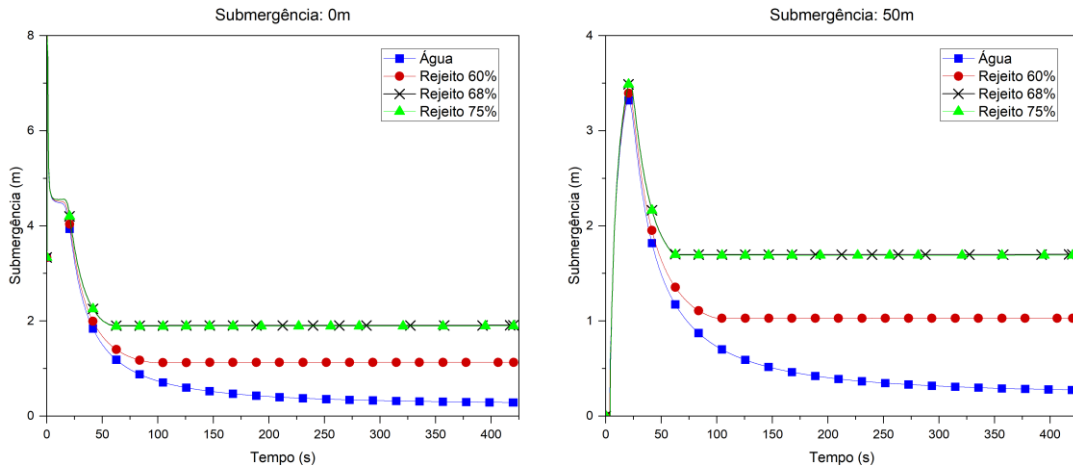


Figura 29 — Curvas de submergência dos cenários monofásicos nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$

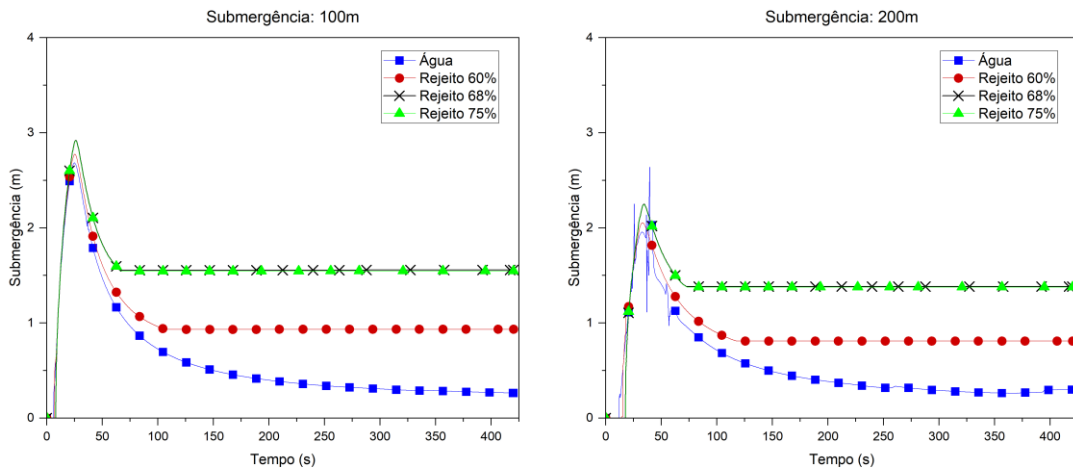


Figura 30 — Curvas de submergência dos cenários monofásicos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$

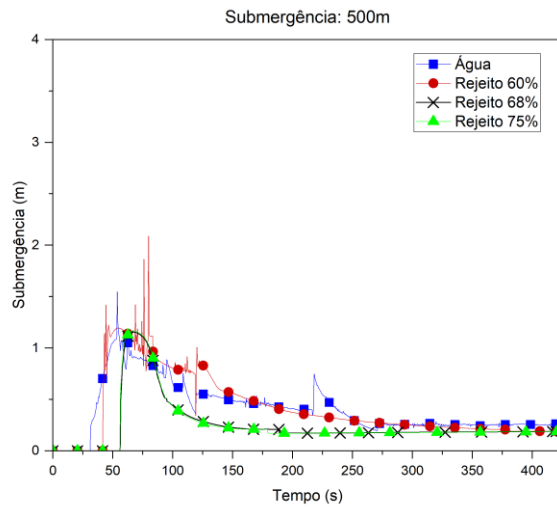


Figura 31 — Curvas de submergência dos cenários monofásicos no plano $x = 500m$

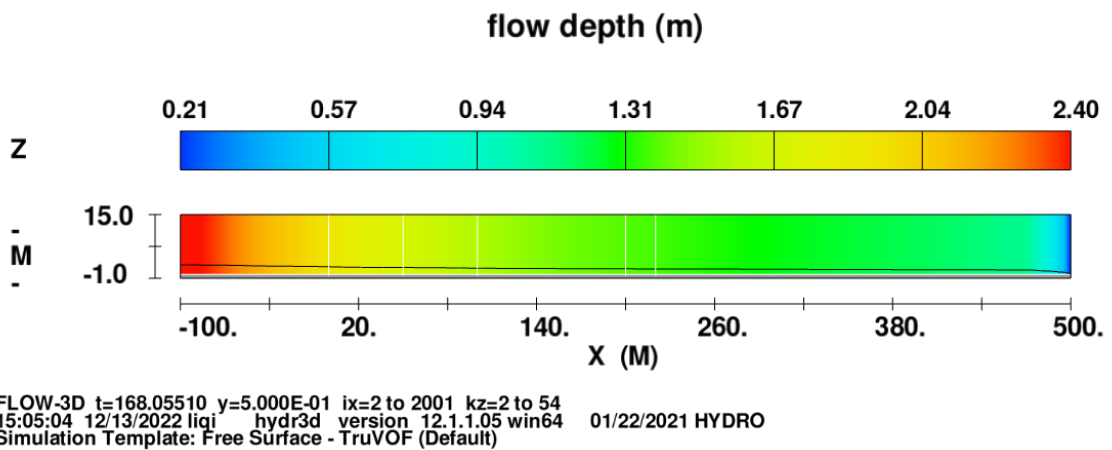


Figura 32 — Altura do fluido em repouso no cenário de rejeito com 75% de sólidos

Analisando as curvas de submergência dos cenários bifásicos ilustradas nas Figuras 33, 34 e 35, é possível perceber uma grande diferença na altura do repouso dos cenários que possuem ambos os rejeitos de 60% e 75% de sólidos.

O fluido com rejeito de 75% de sólidos na parte inferior do reservatório entra em repouso antes do cenário e com rejeito de 75% na parte superior, e ainda possui uma altura maior. Apenas no plano $x = 500m$ é possível perceber que os cenários, a partir de certo tempo de simulação, passam a ter um comportamento mais semelhante, o que era de se esperar de cenários com os mesmos fluidos e apenas diferenças geométricas.

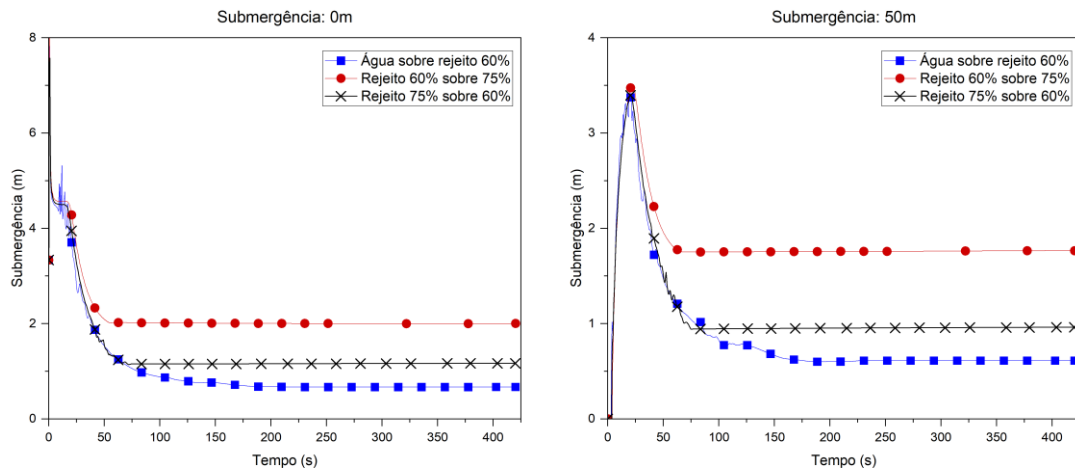


Figura 33 — Curvas de submersão dos cenários bifásicos nos planos $x = 0m$ e $x = 50m$

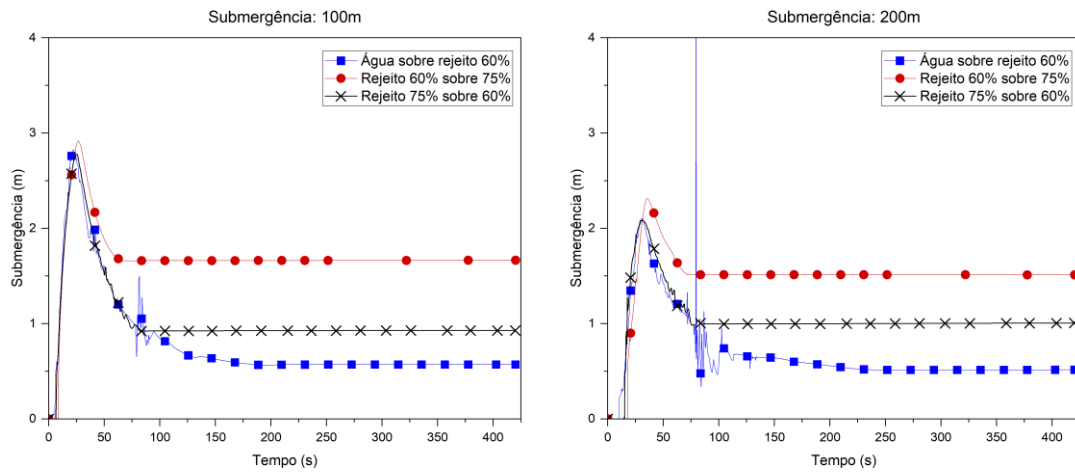


Figura 34 — Curvas de submersão dos cenários bifásicos nos planos $x = 100m$ e $x = 200m$

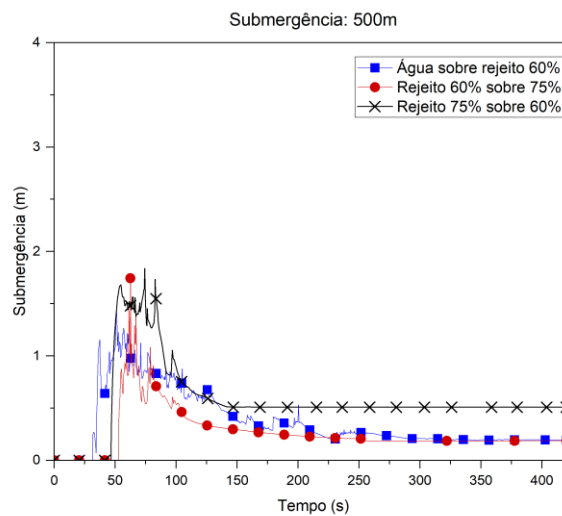


Figura 35 — Curvas de submersão dos cenários bifásicos no plano $x = 500m$

4.2. Comparação entre casos com fases discretas e casos com média de teor

Realizou-se as simulações de casos bifásicos com 60 e 75% de sólidos no reservatório alternando-se a geometria das fases. E um destes cenários o reservatório possuía uma concentração na metade inferior (indo da cota 0m à cota 5m) com a outra concentração na parte superior (da cota 5m à cota 10m). Também se realizou a simulação de um cenário monofásico com 68% de sólidos, que seria uma concentração próxima à média entre as concentrações de 60 e 75% de sólidos.

Estes cenários foram simulados com o intuito de se analisar as diferenças na propagação das ondas de rejeito quando se supõe que um reservatório possui uma quantidade homogênea de sólidos ao longo de todo seu conteúdo e quando um reservatório possui concentrações de grandezas distintas.

As Figuras 36, 37 e 38 mostram as curvas de submergência dos cenários com rejeito de 68% de sólidos, rejeito de 60% de sólidos sobre 75% e rejeito de 75% de sólidos sobre 60%.

Verifica-se que as curvas de 68% de sólidos e 60% sobre 75% se comportam de maneiras semelhante. Há pouca diferença entre estes dois cenários com a altura do fluxo após a estabilidade. Isto provavelmente se deve ao comportamento similar que o rejeito de 68% de sólidos e 75% de sólidos monofásico apresentaram. Aparentemente, em cenários com grandezas de concentrações distintas, a concentração que se encontra na parte inferior do reservatório guia a propagação da onda.

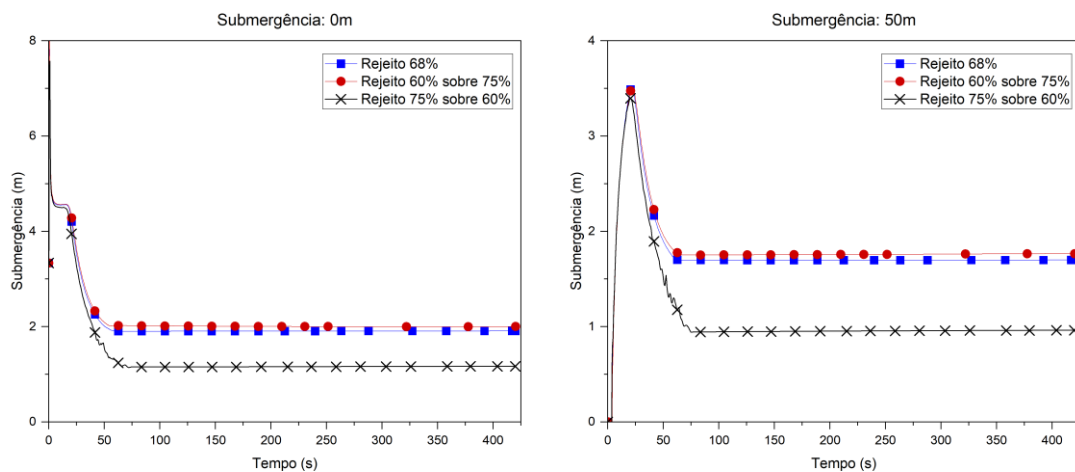


Figura 36 — Curvas de submergência do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 0m$ e $x = 50m$

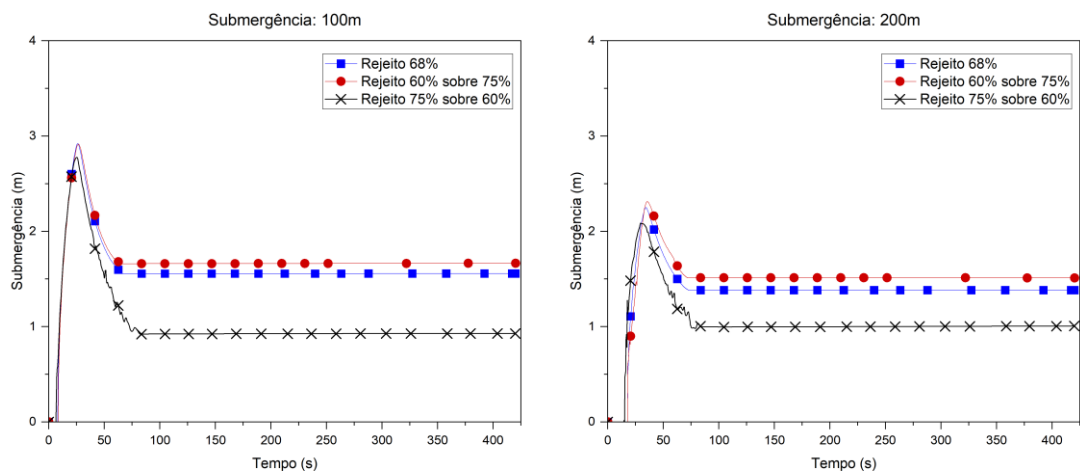


Figura 37 — Curvas de submergência do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$

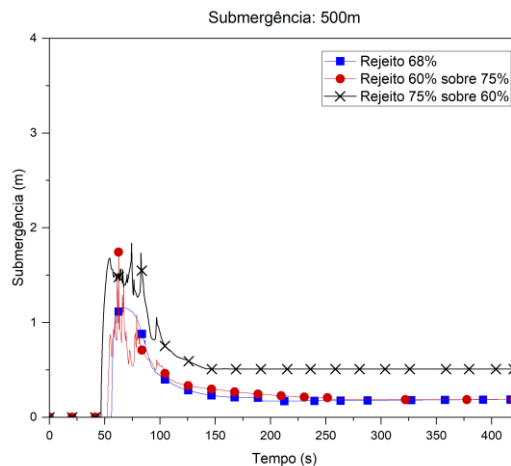


Figura 38 — Curvas de submergência do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos no plano $x = 500\text{m}$

As Figuras 39, 40 e 41 mostram os hidrogramas das simulações com rejeito de 68% de sólidos, rejeito de 60% sobre 75% de sólidos e 75% de sólidos sobre 60%.

Pode-se observar novamente um comportamento muito semelhante entre o cenário com rejeito de 68% de sólidos e o cenário de 60% de sólidos sobre 75% de sólidos.

O cenário com 75% de sólidos sobre 60% apresentou a maior vazão. Isto pode ser devido à pseudoplasticidade dos rejeitos, o peso do material com 75% de concentração de sólidos está diminuindo a viscosidade do material de 60% de sólidos na parte inferior do reservatório, facilitando o escoamento.

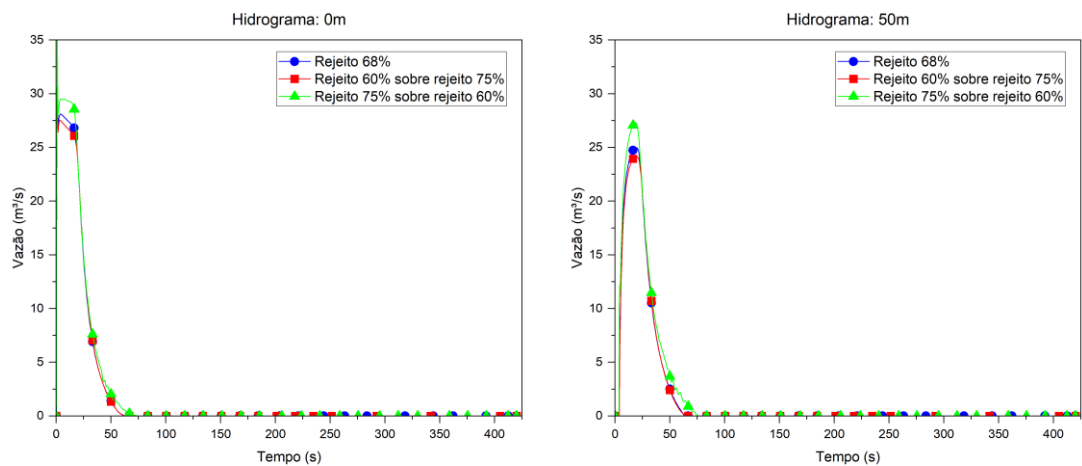


Figura 39 — Hidrogramas das simulações do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 0\text{m}$ e $x = 50\text{m}$

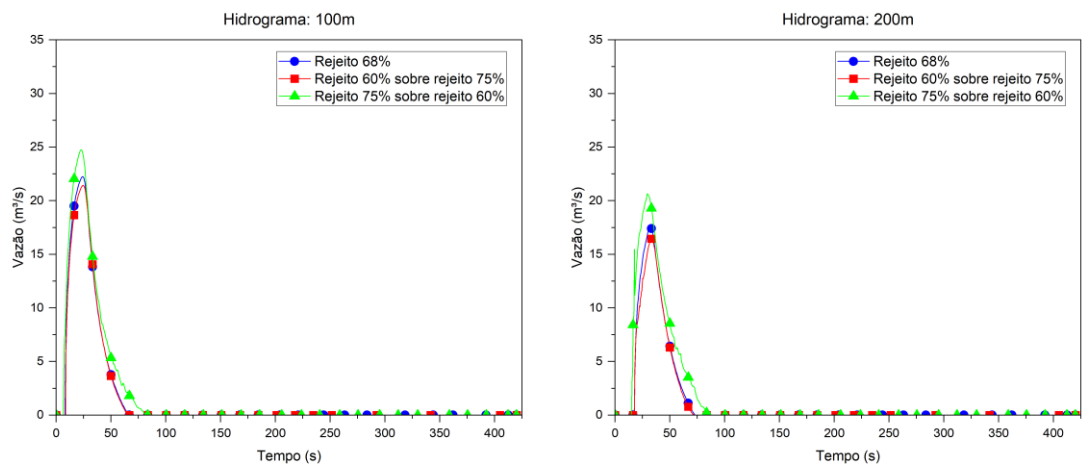


Figura 40 — Hidrogramas das simulações do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos nos planos $x = 100\text{m}$ e $x = 200\text{m}$

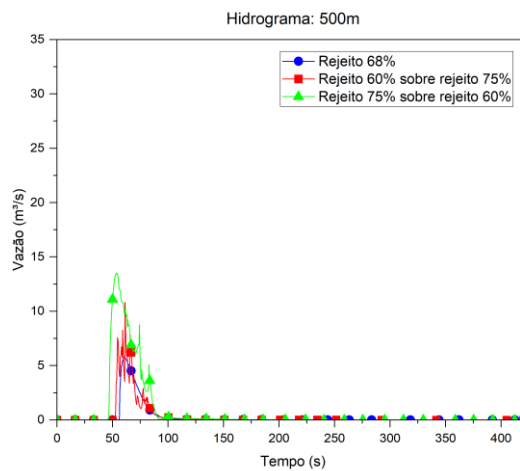


Figura 41 — Hidrogramas das simulações do cenário com 68% de sólidos e dos cenários com 60 e 75% de sólidos no plano $x = 500\text{m}$

4.3. Volume de fluido no reservatório

As Figuras 42 e 43 mostram o volume do fluido no reservatório ao longo do tempo de simulação. O reservatório possui 1000m^3 , sendo suas dimensões $x = 100\text{m}$, $y = 1\text{m}$ e $z = 10\text{m}$.

Em todos os gráficos as referências se encontram em 1000m^3 em $t = 0\text{s}$, instante inicial da simulação quando o fluido se encontra em repouso dentro do reservatório. Assim que a simulação inicia e o material escoar para fora do reservatório, as referências vão se aproximando do zero até atingirem um platô. Este platô indica o repouso, quando o material já não escoar mais para fora do reservatório.

Dentre os cenários monofásicos, a água é o material que mais flui para fora do reservatório, seguida pelo rejeito com 60% de sólidos. Os rejeitos com 68% e 75% de sólidos se comportaram de maneira bem semelhante, tendo os maiores volumes em repouso no reservatório dentre os casos monofásicos.

Dentre os cenários bifásicos, o que mais escoou para fora do reservatório foi o material composto de água sobre rejeito com 60% de sólido. Este cenário possuía apenas 500m^3 de rejeito com 60% de sólidos, mas o volume que restou no reservatório após o repouso foi próximo ao caso que possui 1000m^3 . Isto indica que a água que está sobre o rejeito com 60% de sólidos pode estar agindo para parar o escoamento deste material. O mesmo acontece com o cenário onde há rejeito de 60% sobre 75% de sólidos, que apresenta o maior volume no reservatório após o repouso dentre todos os cenários simulados.

Como a concentração de finos varia ao longo do material, o que indica uma possível mistura, é impossível definir quanto material de cada uma das fases permanece no reservatório.

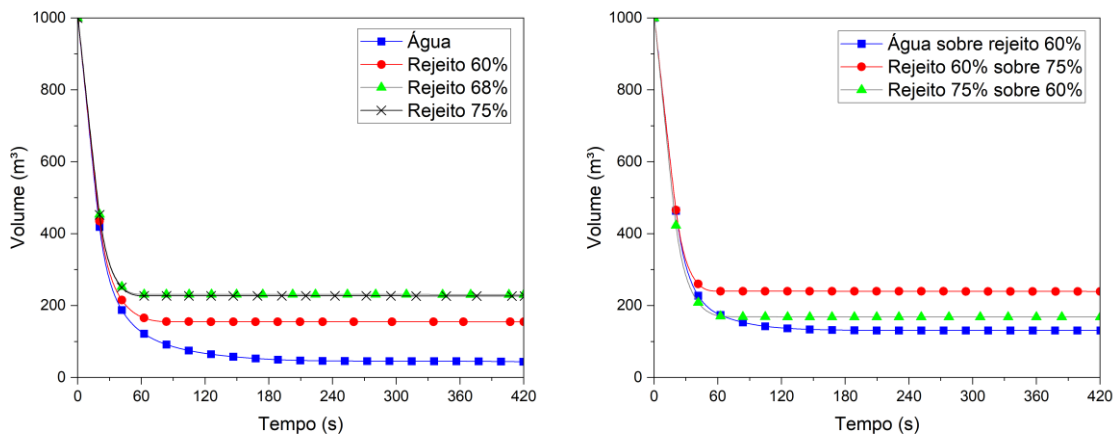


Figura 42 — Volume de fluido no reservatório ao longo do tempo de simulação. Em um gráfico estão agrupados os casos monofásicos e no outro, os casos bifásicos

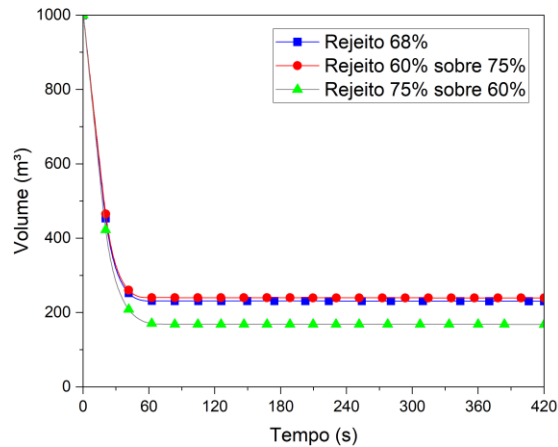


Figura 43 — Comparação entre o volume de fluido no reservatório ao longo do tempo de simulação para comparação entre os cenários com concentrações discretas e cenário com concentração média

A Figura 43 mostra uma comparação entre o cenário que apresenta um rejeito com concentração de 68% de sólidos, simulando uma média entre as concentrações de 60% e 75% de sólidos, e os cenários onde as concentrações são discretas nas regiões do reservatório. Dentre estes cenários, aquele onde houve maior escoamento de material para fora do reservatório foi o caso em que o rejeito com 75% de sólidos está sobre o rejeito com 60%. O que indica que o material com menor viscosidade embaixo de um com maior viscosidade potencializa a propagação da onda oriunda de rompimento de barragem.

5. Conclusão

Interpretando os resultados obtidos das simulações numéricas realizadas é possível depreender conclusões interessantes.

De acordo com a caracterização de escoamentos de O'Brien e Julien (1985), conclui-se que todos os rejeitos simulados (com 60, 68 e 75% de concentração mássica de sólidos) se comporta com escoamento do tipo *mud flood*. O material apresenta propriedades fluidas quando deforma e se espalha por completo ao longo dos 500m da geometria criada para simulação, mas ainda apresenta um ângulo de repouso. Possivelmente ocorre a mistura entre as fases nos casos bifásicos como mostra a Figura 22.

Corroborando com a literatura científica, verificou-se como a concentração de sólidos finos altera as propriedades reológicas dos materiais. Mas ainda assim, as concentrações diferentes podem apresentar comportamentos semelhantes, como foi o caso dos rejeitos com concentração de 68% de sólidos finos e de 75%.

Entre os cenários bifásicos, o cenário onde o rejeito com concentração de 75% de sólidos sobre 60% de sólidos apresentou as maiores vazões, velocidades e alcances. Este comportamento do fluido pode ser devido à propriedade pseudoplástica dos fluidos de Herschel-Bulkley, diminuindo a viscosidade de acordo com o aumento da tensão de cisalhamento (MEZGER, 2017). Além disso, o fluxo do material de 60% de sólidos (que já possui uma viscosidade mais baixa) localizado na parte inferior do reservatório pode estar potencializando o escoamento do material de 75% de sólidos que se encontra acima.

5.1. Exigências legais

Considerando-se (1) a grande diferença de resultados apresentados entre os cenários em que é simulado apenas o escoamento de água para se analisar a propagação de onda oriunda de um rompimento de barragem de rejeito; (2) a grande diferença entre os resultados dos cenários monofásicos e bifásicos; (3) a influência da concentração de finos nas propriedades reológicas do rejeito; e (4) os erros apresentados por Paiva (2020) na confecção de PAEBMs por parte das empresas, pode-se concluir que se faz necessária a regulação por meio dos órgãos competentes em prol da introdução de estudos reológicos de rejeitos e de realização de simulações numéricas nos Estudos de Inundação.

Faz-se necessário conhecer as propriedades reológicas do rejeito e sua sensibilidade à variação da concentração de sólidos finos, e que os Estudos de Inundação levem em

consideração a concentração de finos do rejeito que está sendo depositado no reservatório da barragem, bem como a variação desta concentração e sua repercussão ao longo da vida útil da barragem.

5.2. Sugestões para futuras pesquisas

Dada a capacidade do software FLOW-3D® HYDRO de simular a viscosidade de um fluido em função da concentração de finos de duas formas, por dados tabelados e por correlação empírica e a capacidade de se importar arquivos STL para dentro do software, há oportunidade de se simular uma infinidade cenários com fluidos e geometrias diferentes.

Considerando a necessidade constante de tornar a mineração uma atividade mais segura, principalmente em decorrência dos desastres recentes envolvendo barragens de rejeito, o FLOW-3D® HYDRO permite aos pesquisadores e engenheiros compreenderem melhor o comportamento do rejeito.

Sugere-se o desenvolvimento de pesquisas auxiliadas por empresas que tenham dados topográficos e reológicos reais para que se possa primeiramente validar as simulações realizadas com testes de bancadas para então se simular casos maiores e mais complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 13028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 2017. 16 p.

ALEXANDROU, A. N. *et al.* **Steady Herschel–Bulkley fluid flow in three-dimensional expansions**. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2000. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. p. 77-96.

AATEQ, E. A. **Biodiesel Viscosity and Flash Point Determination**. Nablus: An-Najah National University, 2015. Degree of Master of Physics, Faculty of Graduate Studies. 77 p.

BAGNOLD, R. A. **The Flow of Cohesionless Grains in Fluids**. Londres: Transaction Royal Society of London, 1956. v. 249, p. 235-297. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.1956.0020>. Acesso em: 2 mai. 2022.

BHATTI, M. M. *et al.* **Editorial: Recent Trends in Computational Fluid Dynamics**. *Front Phys* v. 8, art. 593111. Out, 2020.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de Modelagens uni e bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem**. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras – MG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. 2005. 222 p.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução Nº 13, de 8 de Agosto de 2019**. Brasília, 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução Nº 32, de 11 de Maio de 2020**. Brasília: Diário Oficial da União, 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução Nº 95, de 7 de Fevereiro de 2022**. Brasília: Diário Oficial da União, 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Petróleo. **Portaria Nº 80, de 30 de Abril de 1999**. Brasília: Diário Oficial da União, 1999.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Portaria Nº 70.389, de 17 de Maio de 2017**. Brasília: Diário Oficial da União, 2017.

BRASIL. **Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília: Diário Oficial da União, 2010.

BRASIL. **Lei Nº 14.066, de 30 de Setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília: Diário Oficial da União, 2020.

CHÁCARA, D. M. **Reologia de Depósitos de Rejeitos Espessados de Minério de Ferro para Estudos de Dam Break**. Ouro Preto: UFOP, 2020. Dissertação de Mestrado – UFOP/ Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. 133 p.

CHUNG, T. J. **Computational Fluid Dynamics**. Huntsville: Cambridge University Press, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511606205>. Acesso em: 22 jul. 2023.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Belo Horizonte: UFMG, 2008. Dissertação de Mestrado - UFMG/Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 114 p.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. Brasília: UnB, 2000. Tese de doutorado submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. 363 p.

FLOW SCIENCE, INC. **FLOW-3D® HYDRO User Manual, Release 1.0.0**. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>. 2020

FLOW SCIENCE, INC. **FLOW-3D® Version 12.0 User's Manual**. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>. 2018

GARCÍA, M. H. *et al.* Chapter 19: Sedimentation Hazards. *In: GARCÍA, M. H. et al. Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modelling, and Practice*. Urbana: University of Illinois, 2008. p.885-936.

JOHNSON, R. W. **Handbook of Fluid Dynamics**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016. Ed. 2. 1560 p.

KERR, T.; ULRICH, B. Part 8: Ground Mechanics: Chapter 8.10: Tailings Impoundments and Dams. *In*: Darling, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3 ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2011. p. 645-665.

MANSUR, R.; ANDRADE, J. **Brumadinho: quase 4 anos após tragédia, Polícia Civil identifica mais uma vítima do rompimento de barragem da Vale**. G1 MG, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/12/20/brumadinho-quase-4-anos-apos-tragedia-policia-civil-identifica-mais-uma-vitima-do-rompimento-de-barragem-da-vale.ghtml>. Acesso em: 19 fev. 2023.

MEZGER, T. G. **Applied Rheology**. 4. ed. Austria. 2017. 191 p.

MOON, N. *et al.* **Advances in non-Newtonian dam break studies**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. *In*: Specialty Conference - Delineation of landslide, flash flood and debris flow hazard in Utah, Logan, 1984. Proceedings. **Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows**. Utah: Utah State University, p.260-279. 1985.

PAIVA, C. A. **Contribuições de Estudos de Dam Break às Ações da Defesa Civil**. Ouro Preto: UFOP, 2020. Dissertação de Mestrado – UFOP/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 152 p.

PÉREZ, A. V. *et al.* **Mudflow Flooding Simulation and Solution Proposal in a Valley in the South of Peru**. *Int. J. Environ. Impacts*, Vol. 4, No. 3 (2021) 262–275. DOI: 10.2495/EI-V4-N3-262-275.

REDAÇÃO, G1 MG. **Corpo é achado dentro de caminhão em área do desastre em Mariana**: Esta é uma das 2 vítimas que ainda estavam desaparecidas, dizem bombeiros. 17 vítimas já haviam sido encontradas; um homem continua desaparecido. G1 MG, 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/03/corpo-e-achado-dentro-de-caminhao-em-area-do-desastre-em-mariana.html>. Acesso em: 19 fev. 2023.

SENADO, Agência. **Com mudanças na Câmara, projeto sobre segurança de barragens retorna ao Senado.** Agência Senado, 2020. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/05/20/com-mudancas-na-camara-projeto-sobre-seguranca-de-barragens-retorna-ao-senado>. Acesso em: 19 fev. 2023.

WENDT, J. F. **Computational fluid dynamics, an introduction.** Director von Karman Institute for Fluid Dynamics. Belgium: Sint-Genesius-Rode. ISBN 978-3-540-85055-7. 2009.

WINTERWERP, J. C. **Hyperconcentrated Sand-Water Mixture Flows Over a Flat Bed.** Journal of Hydraulic Engineering, 1990. v. 116, ed. 1. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:1(36)). Acesso em: 20 mar. 2023.

ANEXOS

ANEXO A – Resultados obtidos por Chácara (2020) utilizados no presente trabalho.

57%				
Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Temperature [°C]	Torque [mN·m]
400	93.139	232.85	23.6	0.99243
301	89.251	297	23.6	0.95099
226	85.808	380.09	23.6	0.91431
170	82.704	487.63	23.6	0.88123
127	79.905	627.12	23.6	0.85142
95.7	77.292	807.46	23.6	0.82357
71.9	74.942	1042.1	23.6	0.79853
54	72.765	1346.9	23.6	0.77533
40.6	70.705	1742.1	23.6	0.75339
30.5	68.845	2257.8	23.6	0.73357
22.9	67.046	2926.9	23.6	0.7144
17.2	65.408	3800.7	23.6	0.69694
12.9	63.913	4943.5	23.6	0.68102
9.71	62.546	6439.5	23.6	0.66644
7.3	61.244	8393	23.6	0.65257
5.48	59.991	10943	23.6	0.63922
4.12	58.821	14282	23.6	0.62675
3.09	57.763	18670	23.6	0.61548
2.32	56.816	24444	23.6	0.60539
1.75	55.873	31996	23.61	0.59535
1.31	54.985	41912	23.61	0.58588
0.986	54.089	54880	23.61	0.57633
0.74	53.332	72031	23.61	0.56827
0.556	52.469	94325	23.61	0.55907
0.418	51.604	1.23E+09	23.61	0.54985
0.314	50.975	1.62E+09	23.61	0.54315
0.236	50.223	2.13E+09	23.61	0.53515
0.177	49.643	2.80E+09	23.61	0.52896
0.133	49.165	3.69E+09	23.61	0.52387
0.1	48.772	4.88E+09	23.61	0.51968

59.88%				
Shear Rate [1/s]	Shear Strain [%]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Torque [mN·m]
1000	2,730,000.000	288.8	288.8	3.0773
728	3,140,000.000	192.13	263.95	2.0472
530	3,440,000.000	160.6	303.11	1.7112
386	3,660,000.000	150.45	390.11	1.6031
281	3,830,000.000	143.57	511.43	1.5298
204	3,960,000.000	137.73	674.04	1.4676

149	4,050,000.000	132.79	892.77	1.4149
108	4,120,000.000	128.47	1186.7	1.3689
78.8	4,170,000.000	124.41	1578.7	1.3256
57.4	4,210,000.000	120.79	2105.8	1.2871
41.8	4,240,000.000	117.34	2810.3	1.2503
30.4	4,260,000.000	113.89	3747.3	1.2135
22.1	4,270,000.000	110.48	4994.1	1.1772
16.1	4,290,000.000	107.13	6652.8	1.1415
11.7	4,300,000.000	104.45	8911.1	1.1129
8.53	4,300,000.000	101.7	11920	1.0836
6.21	4,310,000.000	98.755	15902	1.0523
4.52	4,310,000.000	96.2	21282	1.025
3.29	4,310,000.000	93.296	28353	0.99409
2.4	4,320,000.000	91.476	38191	0.9747
1.74	4,320,000.000	88.011	50480	0.93778
1.27	4,320,000.000	85.811	67629	0.91434
0.924	4,320,000.000	84.986	92003	0.90555
0.672	4,320,000.000	82.78	123130	0.88205
0.489	4,320,000.000	8.12E+01	165920	0.86518
0.356	4,320,000.000	7.89E+01	221380	0.8403
0.259	4,320,000.000	7.57E+01	292050	0.80688
0.189	4,320,000.000	7.37E+01	390730	0.78579
0.137	4,320,000.000	7.27E+01	529000	0.77437
0.1	4,320,000.000	7.21E+01	720940	0.76819

62.00%				
Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Temperature [°C]	Torque [mN·m]
500	143.120	286.23	24.12	15.249
373	133.880	359.16	24.12	14.265
278	127.940	460.39	24.12	13.632
207	122.410	590.87	24.12	13.043
154	117.520	760.93	24.12	12.522
115	113.230	983.39	24.12	12.065
85.8	109.430	1274.9	24.12	1.166
64	106.030	1657	24.12	11.298
47.7	102.910	2157.2	24.12	10.965
35.6	100.100	2814.5	24.12	10.666
26.5	97.453	3675.6	24.12	10.384
19.8	94.957	4804.1	24.12	10.118
14.7	92.904	6304.7	24.12	0.98992
11	90.968	8280.7	24.12	0.96929
8.19	88.989	10866	24.12	0.9482
6.11	87.659	14357	24.12	0.93404
4.55	86.324	18965	24.12	0.9198
3.39	85.094	25077	24.12	0.90671
2.53	83.571	33036	24.12	0.89048

1.89	82.373	43678	24.12	0.87771
1.41	81.502	57969	24.12	0.86843
1.05	80.513	76817	24.12	0.85789
0.781	79.701	102000	24.12	0.84923
0.583	78.903	1350000000	24.12	0.84073
0.434	78.489	1.81E+09	24.12	0.83632
0.324	77.282	2.39E+09	24.12	0.82346
0.241	76.690	3.18E+09	24.12	0.81716
0.18	76.011	4.22E+09	24.12	0.80992
0.134	75.551	5.63E+09	24.12	0.80502
0.1	75.209	7.52E+09	24.12	0.80137

62.50%				
Shear Rate [1/s]	Shear Strain [%]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Torque [mN·m]
1000	367.260	367.27	22.29	39.133
728	299.860	411.96	22.29	31.951
530	282.130	532.49	22.29	30.062
386	270.160	700.5	22.3	28.786
281	259.530	924.5	22.3	27.653
204	250.340	1225.1	22.3	26.674
149	241.790	1625.6	22.3	25.763
108	233.890	2160.4	22.31	24.922
78.8	226.660	2876.2	22.31	24.152
57.4	219.850	3832.7	22.31	23.426
41.8	213.780	5120	22.31	22.779
30.4	208.350	6855.4	22.31	2.22
22.1	203.330	9191.1	22.31	21.665
16.1	199.100	12364	22.32	21.214
11.7	194.100	16559	22.32	20.682
8.53	189.650	22229	22.32	20.208
6.21	185.640	29892	22.32	1.978
4.52	181.090	40062	22.32	19.296
3.29	176.390	53608	22.32	18.795
2.4	172.360	71962	22.32	18.365
1.74	167.500	96079	22.33	17.848
1.27	164.410	1300000000	22.33	17.519
0.924	162.080	1750000000	22.33	1.727
0.672	159.970	2380000000	22.33	17.045
0.489	157.340	3.21E+09	22.33	16.765
0.356	154.960	4.35E+09	22.33	16.512
0.259	153.170	5.91E+09	22.33	16.321
0.189	151.660	8.04E+09	22.33	16.159
0.137	150.010	1.09E+10	22.33	15.984
0.1	148.520	1.49E+10	22.33	15.825

64.72%				
Shear Rate [1/s]	Shear Strain [%]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Torque [mN·m]
1000	2,730,000.000	496.75	496.74	5.293
728	3,140,000.000	451.02	619.62	4.8057
530	3,440,000.000	435.13	821.27	4.6364
386	3,660,000.000	420.95	1091.5	4.4853
281	3,830,000.000	408.22	1454.2	4.3497
204	3,960,000.000	396.11	1938.5	4.2206
149	4,050,000.000	384.76	2586.8	4.0997
108	4,120,000.000	373.99	3454.4	3.985
78.8	4,170,000.000	363.1	4607.6	3.869
57.4	4,210,000.000	352.06	6137.5	3.7513
41.8	4,240,000.000	342.01	8191.1	3.6442
30.4	4,260,000.000	331.69	10914	3.5342
22.1	4,270,000.000	322.24	14566	3.4335
16.1	4,290,000.000	313.59	19474	3.3414
11.7	4,300,000.000	304.12	25945	3.2405
8.53	4,300,000.000	295.32	34614	3.1467
6.21	4,310,000.000	287.05	46221	3.0586
4.52	4,310,000.000	279.8	61904	2.9814
3.29	4,310,000.000	274.18	83323	2.9215
2.4	4,320,000.000	259.17	108210	2.7615
1.74	4,320,000.000	258.11	148060	2.7503
1.27	4,320,000.000	255.16	201070	2.7188
0.924	4,320,000.000	243.33	263430	2.5927
0.672	4,320,000.000	235.11	349680	2.5051
0.489	4,320,000.000	2.29E+02	468700	2.444
0.356	4,320,000.000	2.24E+02	629450	2.3892
0.259	4,320,000.000	2.22E+02	857420	2.3689
0.189	4,320,000.000	2.20E+02	1168100	2.3491
0.137	4,320,000.000	2.18E+02	1590100	2.3276
0.1	4,320,000.000	2.14E+02	2141000	2.2813

70.00%				
Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Temperature [°C]	Torque [mN·m]
1000	1,580.800	1580.8	22.87	16.844
728	1,521.900	2090.7	22.87	16.216
530	1,488.000	2808.3	22.87	15.855
386	1,446.800	3751.4	22.88	15.416
281	1,405.100	5005.1	22.88	14.972
204	1,356.700	6639.6	22.88	14.456
149	1,313.200	8828.9	22.89	13.993
108	1,271.700	11746	22.89	13.55
78.8	1,230.200	15610	22.89	13.108

57.4	1,192.800	20795	22.9	12.71
41.8	1,156.200	27690	22.9	12.32
30.4	1,125.300	37027	22.9	11.991
22.1	1,091.500	49339	22.91	11.63
16.1	1,062.500	65985	22.91	11.322
11.7	1,034.100	88220	22.91	11.018
8.53	1,009.100	1180000000	22.91	10.752
6.21	988.950	1590000000	22.92	10.538
4.52	968.200	214000000	22.92	10.316
3.29	924.680	2810000000	22.92	98.528
2.4	928.890	3880000000	22.92	98.976
1.74	892.280	5120000000	22.93	95.075
1.27	882.230	6950000000	22.93	94.005
0.924	860.770	932000000	22.93	91.717
0.672	836.210	12400000000	22.93	8.91
0.489	825.640	1.69E+10	22.94	87.974
0.356	834.690	2.34E+10	22.94	88.938
0.259	825.480	3.18E+10	22.94	87.957
0.189	795.290	4.21E+10	22.94	84.741
0.137	785.270	5.72E+09	22.94	83.673
0.1	775.810	7.76E+10	22.95	82.665

71.90%				
Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Temperature [°C]	Torque [mN·m]
1000	1,854.200	1854.3	22.94	19.757
728	1,740.000	2390.4	22.94	18.54
530	1,651.700	3117.1	22.94	17.599
386	1,584.600	4108.9	22.95	16.885
281	1,533.200	5461.6	22.95	16.337
204	1,466.900	7180	22.96	15.63
149	1,445.800	9719.9	22.96	15.405
108	1,399.600	12900	22.97	14.913
78.8	1,353.600	17200	22.97	14.424
57.4	1,306.100	22800	22.97	13.917
41.8	1,250.100	29900	22.98	13.32
30.4	1,203.600	39600	22.98	12.825
22.1	1,159.300	52400	22.98	12.353
16.1	1,110.400	69000	22.99	11.832
11.7	1,067.700	91100	22.99	11.376
8.53	1,023.400	1200000000	22.99	10.905
6.21	992.860	1600000000	22.99	10.579
4.52	957.490	2120000000	23	10.202
3.29	939.520	2860000000	23	10.011
2.4	909.610	3800000000	23	96.921
1.74	880.300	5050000000	23	93.798
1.27	852.290	6720000000	23.01	90.814

0.924	841.770	9110000000	23.01	89.693
0.672	816.070	12100000000	23.01	86.955
0.489	795.760	1.63E+09	23.01	84.791
0.356	777.280	2.18E+09	23.02	82.822
0.259	762.390	2.94E+10	23.02	81.235
0.189	763.020	4.04E+10	23.02	81.302
0.137	754.390	5.49E+10	23.02	80.383
0.1	746.940	7.47E+10	23.03	