

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO NUMÉRICO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA CONSIDERANDO UM
ESCOAMENTO LAMINAR DE UM FLUIDO VISCOPLÁSTICO SOBRE CORPO
SÓLIDO SUBMERSO

por

William de Oliveira

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

De Oliveira, William
ESTUDO NUMÉRICO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA
CONSIDERANDO UM ESCOAMENTO LÂMINAR DE UM FLUIDO
VISCOPLÁSTICO SOBRE CORPO SÓLIDO SUBMERSO / William De
Oliveira. -- 2021.
31 f.
Orientador: Guilherme Henrique Fiorot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Corridas detriticas. 2. Corpo sólido fixo. 3.
Fluido não newtoniano. 4. Herschel-Bulkley. 5. VOF. I.
Fiorot, Guilherme Henrique, orient. II. Título.

William de Oliveira

ESTUDO NUMÉRICO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA CONSIDERANDO UM
ESCOAMENTO LAMINAR DE UM FLUIDO VISCOPLÁSTICO SOBRE SÓLIDO
SUBMERSO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Diogo Elias Da Vinha Andrade

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2021

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Rosângela, por sempre incentivar e fortalecer o caminho dos estudos em minha vida, quando ela mesma, em virtude das dificuldades, não pôde fazê-lo. Agradeço por todo o carinho, amor e dedicação ao longo de toda a nossa trajetória, fazendo deste sonho da graduação, uma possibilidade.

À Cristina, por ter sido sempre uma querida companheira; por estar sempre ao meu lado, principalmente quando tudo parecia já não fazer mais sentido. Não esqueço da tua entrega e dos momentos em que me fizeste mais leve. E, por despertar ainda mais em mim o carinho e o respeito pela nossa língua portuguesa.

Aos meus padrinhos, Eloisa e Jalmar, pelo acolhimento quando da minha chegada à cidade de Porto Alegre e apoio nos primeiros semestres de faculdade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas que estiveram lado a lado ao longo de todo o percurso. À generosidade daqueles que compartilham o seu valioso conhecimento.

Aos professores que contribuem para a construção do saber de todos aqueles que passam pela nossa tão querida universidade.

Ao laboratório REOSUL por todo o aprendizado e pela oportunidade em fazer parte da sua recente história.

EPÍGRAFE

*“Natureza é fonte primordial?
– Três coisas importantes eu conheço: lugar
apropriado para um homem ser folha; pássaro que se
encontra em situação de água; e lagarto verde que
canta de noite na árvore vermelha. Natureza é uma
força que inunda como os desertos...”*

Manoel de Barros.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ESTUDO NUMÉRICO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA
CONSIDERANDO UM ESCOAMENTO LAMINAR DE UM FLUIDO
VISCOPLÁSTICO SOBRE CORPO SÓLIDO SUBMERSO

Oliveira, William

williamoliveira0409@gmail.com

***Resumo.** Movimentos de massa, ou corridas detríticas, configuram riscos e alertas no que tange a discussão sobre catástrofes naturais. Regiões vulneráveis podem ser violentamente atingidas e, quando vidas humanas estão no cerne desta problemática, a busca por soluções preventivas é inevitável. Visto que a força motriz do escoamento atuante pode arrastar sedimentos, torna-se imprescindível conhecer a relação entre o escoamento e o corpo sólido submerso. Assim, este trabalho compreende o estudo numérico de um escoamento de superfície livre, sobre plano inclinado, regido pela aceleração gravitacional, de um fluido viscoplástico sobre um corpo sólido fixo. A simulação computacional é realizada em OpenFOAM, usando o modelo VOF (volume de fluido) para configuração de escoamento bifásico de um fluido Herschel-Bulkley biviscoso. Nesse contexto, avalia-se a magnitude das forças viscosas e de pressão, bem como a razão entre os coeficientes de arrasto e sustentação, atuantes no corpo sólido submerso. Funções de aproximação são inseridas aos dados obtidos com o objetivo de prever as imposições trazidas ao obstáculo pelo escoamento.*

***Palavras-chave:** corridas detríticas, corpo sólido fixo, fluido não newtoniano, Herschel-Bulkley, VOF.*

NUMERICAL STUDY OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION CONSIDERING A LAMINAR FLOW OF A VISCOPLASTIC FLUID OVER A SUBMERGED SOLID BODY

***Abstract.** Mass movements, or debris flow, constitute risks and warnings regarding the discussion of natural catastrophes. Vulnerable regions can be violently hit and, when human lives are at the center of this problem, the search for preventive solutions is inevitable. Since the driving force of the acting flow can drag sediments, it is essential to know the relationship between the flow and the submerged solid body. Thus, this work comprises the numerical study of a free surface flow, on an inclined plane, governed by gravitational acceleration, of a viscoplastic fluid over a fixed solid body. The computer simulation is performed in OpenFOAM, using the VOF (volume of fluid) to configure the two-phase flow of a bi-viscous Herschel-Bulkley fluid. In this context, the magnitude of viscous and pressure forces is evaluated, as well as the ratio between drag and lift coefficients, acting on the submerged solid body. Approximation functions are added to the obtained data in order to predict the impositions brought to the obstacle by the flow.*

***Keywords:** debris flow, fixed solid body, non-Newtonian fluid, Herschel-Bulkley, VOF.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrência de <i>debris flow</i> na Serra do Mar. (a) cicatrizes e transporte de sedimentos em zona de barranco na Serra da Prata, Paraná. (b) zona de transporte de corrida de detritos no córrego do Guarda-Mão, São Paulo.	1
Figura 2: Representação esquemática de escoamento de superfície livre, incidindo sobre o obstáculo.	2
Figura 3: Granulometria e composição dos solos, conforme dados extraídos da literatura. Comparação entre os estudos de Coelho (2020), Malet et al. (2003) e Berti et al. (2000).	4
Figura 4: Configuração numérica das fronteiras da geometria. $\alpha 1$: entrada de lama, parte inferior esquerda. $\alpha 2$: saída de lama, parte inferior direita. $\beta 1$: entrada de ar, parte superior esquerda. $\beta 2$: saída de ar, parte superior direita. A (<i>atmosphere</i>): parte superior. W (<i>wall</i>): parede inferior. O (<i>obstacle</i>): entalhe na parede inferior composto por três superfícies.	7
Figura 5: Malha numérica do domínio bidimensional utilizada, quando da inserção do corpo sólido.	8
Figura 6: (a) Perfis de velocidade simulados em função de diferentes valores empregados para $\nu 0$. (b) Erros relativos da solução numérica para diferentes valores assumidos pela viscosidade, em relação à solução analítica.	9
Figura 7: (a) Velocidade média do escoamento em função do tempo. (b) Desvio relativo e desvio de regime, ambos em escala logarítmica.	10
Figura 8: Perfis de velocidade que mostram a sensibilidade do escoamento em relação à variabilidade da altura do corpo sólido de contenção. (a) $HCS = 0,25$ m, $Re = 9$. (b) $HCS = 0,50$ m, $Re = 11$. (c) $HCS = 0,75$ m, $Re = 13$	12
Figura 9: Perfis de velocidade em valores adimensionais. (a) $HCS = 0,25$ m. (b) $HCS = 0,75$ m.	12
Figura 10: Forças de pressão com diferentes geometrias. (a) Variação de HCS . (b) Variação de LCS	13
Figura 11: Forças viscosas com diferentes geometrias. (a) Variação de HCS . (b) Variação de LCS	14
Figura 12: Razão entre o coeficiente de arrasto e de sustentação comparada a três condições dimensionais. (a) Variação de HCS . (b) Variação de LCS . (c) Variação da razão entre HCS e LCS	14
Figura A. 1: Campo de velocidade para estudo do comportamento do escoamento, variando a altura do corpo sólido. (a) $HCS = 0,25$ m. (b) $HCS = 0,50$ m. (c) $HCS = 0,75$ m.	17
Figura A. 2: Campo de velocidade para estudo do comportamento do escoamento, variando o comprimento do corpo sólido, com altura constante de $HCS = 0,30$ m. (a) $LCS = 0,25$ m. (b) $LCS = 0,50$ m. (c) $LCS = 0,75$ m.	18
Figura A. 3: Campo de pressão para estudo do comportamento do escoamento, variando a altura do corpo sólido, com comprimento constante de $LCS = 0,50$ m. (a) $HCS = 0,25$ m. (b) $HCS = 0,50$ m. (c) $HCS = 0,75$ m.	19
Figura A. 4: Campo de pressão para estudo do comportamento do escoamento, variando o comprimento do corpo sólido, com altura constante de $HCS = 0,30$ m. (a) $LCS = 0,25$ m. (b) $LCS = 0,50$ m. (c) $LCS = 0,75$ m.	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros reológicos do fluido estudado.	4
Tabela 2: Descrição de parâmetros geométricos importantes com as respectivas condições de contorno.	7
Tabela 3: Parâmetros objetivos em função da malha numérica empregada.	11
Tabela 4: Parâmetros de independência de malha calculados segundo Roache (1994):	11
Tabela 5: Funções de aproximação dos resultados obtidos, de acordo com a geometria do obstáculo, para as forças viscosas e de pressão, e da razão entre os coeficientes de arrasto e sustentação.....	15

NOMENCLATURA

Símbolos

g	Aceleração devido à gravidade	[m/s ²]
y_0	Altura da região cisalhada	[m]
H_{CS}	Altura do corpo sólido	[m]
C_D	Coefficiente de arrasto	[-]
C_L	Coefficiente de sustentação	[-]
u	Componente horizontal da velocidade	[m/s]
v	Componente vertical da velocidade	[m/s]
L	Comprimento característico	[m]
D_{reg}	Desvio de regime da solução numérica	[%]
D_R	Desvio relativo da solução numérica	[%]
L_x	Dimensão da geometria em x	[m]
L_y	Dimensão da geometria em y	[m]
L_z	Dimensão da geometria em z	[m]
Y	Distância vertical adimensional	[-]
x	Eixo cartesiano das abcissas	[m]
y	Eixo cartesiano das ordenadas	[m]
x^*	Eixo secundário	[m]
E_R	Erro relativo entre as soluções numérica e analítica	[%]
F_D	Força de arrasto	[N]
F_L	Força de sustentação	[N]
F_p	Força devido à pressão	[N]
P	Força peso	[N]
F_v	Força viscosa	[N]
K	Índice de consistência do escoamento	[Pa·s ⁿ]
GCI_{ij}	Índice de convergência entre duas malhas com diferentes números de elementos	[-]
m	Índice de face	[-]
n	Índice do escoamento	[-]
L_{CS}	Largura do corpo sólido	[m]
u_{mag}	Magnitude da velocidade em domínio bidimensional	[m/s]
$u(y)$	Magnitude da velocidade em função da posição vertical no domínio	[m/s]
Fr	Número de Froude	[-]

Re	Número de Reynolds	[-]
k	Ordem de convergência de malha	[-]
f_R	Parâmetro calculado pela extrapolação de Richardson	
p_{ref}	Pressão de referência ou manométrica	[Pa]
\bar{p}	Pressão média no estudo de convergência	[kPa]
h_0	Profundidade do escoamento	[m]
C	Taxa de cisalhamento adimensional	[-]
t	Tempo	[s]
U	Velocidade adimensional	[-]
u_{y_0}	Velocidade de <i>plug</i> , ou pistonada	[m/s]
$u_{máx}$	Velocidade máxima	[m/s]
u_0	Velocidade média do escoamento	[m/s]
\bar{u}	Velocidade média no estudo de convergência	[m/s]
$s_{f,m}$	Vetor de área de face	[m ²]
n_F	Vetor normal à face do volume de controle	[-]

Símbolos gregos

θ	Ângulo de inclinação do canal	[°]
χ	Convergência da solução para a faixa assintótica no estudo de convergência	
α	Fração de fase de fluido; 0 para total ausência e 1 para total presença de lama, no interior do volume finito	
α_1	Fronteira de entrada do fluido não newtoniano (lama)	[-]
β_1	Fronteira de entrada do fluido newtoniano (ar)	[-]
α_2	Fronteira de saída do fluido não newtoniano (lama)	[-]
β_2	Fronteira de saída do fluido newtoniano (ar)	[-]
τ_{xy}	Magnitude do esforço cisalhante agindo em x devido ao gradiente em y	[Pa]
ρ	Massa específica do fluido em escoamento	[kg·m ⁻³]
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	[s ⁻¹]
τ_0	Tensão limite de escoamento	[Pa]
ν	Viscosidade cinemática aparente	[m ² /s]
ν_0	Viscosidade cinemática aparente, modelo de biviscosidade	[m ² /s]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa·s]

Abreviaturas e acrônimos

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês, <i>Computational Fluid Dynamics</i>)
GCI	Índice de Convergência de Malha (do inglês, <i>Grid Convergence Index</i>)
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
OpenFOAM	<i>Open source Field Operation And Manipulation</i>
PIMPLE	<i>Pressure-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
PISO	<i>Pressure-implicit split operator</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked equations</i>
interFoam	<i>Solver</i> utilizado na simulação de escoamento bifásico, por VOF
VOF	Volume de fluido (do inglês, <i>Volume-of-Fluid</i>)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
NOMENCLATURA	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	1
2. METODOLOGIA	2
2.1. Geometria	2
2.2. Hipóteses simplificadoras.....	2
2.3. Metodologia matemática	2
2.4. Caracterização do problema tipo	4
2.4.1. Caracterização reológica do fluido tipo	4
2.4.2. Caracterização cinemática e dinâmica	5
2.5. Metodologia numérica.....	6
2.5.1. Esquemas de resolução.....	6
2.5.2. Geometria e Condições de contorno	6
2.5.3. Malha numérica.....	8
2.5.4. Modelo reológico numérico	8
2.6. Validação do estudo numérico	10
2.6.1. Garantia do escoamento sob regime permanente.....	10
2.6.2. GCI.....	11
3. RESULTADOS	11
3.1. Sensibilidade do escoamento ao obstáculo.....	11
3.2. Perfis de velocidade em relação à h_0	12
3.3. Análise da solicitação imposta à estrutura pelo escoamento.....	13
4. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A.....	17

1. INTRODUÇÃO

Em fevereiro de 1994, um grande evento de *debris flow*, ou corrida de detritos, ocorreu na Serra do Cubatão, nome local para a Serra do Mar, cadeia montanhosa de 800 metros de altura e localizada na costa do estado de São Paulo. Movimentos de massa foram produzidos sob fortes chuvas e condições favoráveis ao desprendimento do solo, afetando drasticamente a refinaria Presidente Bernardes da Petrobras. Entre limpeza, reparos e 3 semanas de interrupções da planta, estimam-se danos de 40 milhões de dólares (Kanji et al., 2008). Levantamentos acerca de ocorrências sobre corridas detríticas na extensão da Serra do Mar – Itaoca, Cubatão, Serra da Prata, etc. – compreendendo os anos de 1888 a 2014, apontam para um grande número de vítimas, perdas materiais e pessoas desabrigadas (Picanço et al. 2019). A Figura 1 ilustra casos de eventos semelhantes e o resultado do transporte de sedimentos ao longo da Serra do Mar.

Figura 1: Ocorrência de *debris flow* na Serra do Mar. (a) cicatrizes e transporte de sedimentos em zona de barranco na Serra da Prata, Paraná. (b) zona de transporte de corrida de detritos no córrego do Guarda-Mão, São Paulo.



Fonte: Picanço et al. (2019)

Movimentos de massa, como corridas de lama e/ou detríticas, são considerados extremamente relevantes em países onde fatores hidrológicos e geológicos são dominantes na questão morfológica do terreno. Considerando uma abordagem mecanicista ao problema, pode-se percebê-lo como sendo o de um escoamento de fluido composto de mistura sólido-líquido em canal aberto de plano inclinado (Coussot e Meunier 1996). Sendo assim, surge a necessidade de estimativa das propriedades do escoamento através de modelos preditivos, uma vez que comunidades e construções situadas em áreas vulneráveis são extremamente sensíveis a eventos caracterizados por deslizamentos de encostas. Os efeitos catastróficos podem ser potencializados caso estruturas como rochas, ou matacões, com tamanho dimensional característico, sejam arrastados pelo escoamento (Chen et al. 2021, Fernández et al. 2021, Gramani e Arduin 2015).

1.1. Objetivos

Nesse contexto, este trabalho busca o entendimento das interações entre fluido-estrutura, mediante esforços provocados pela ação do escoamento de um fluido lamoso sobre um corpo sólido submerso. Mediante abordagem numérica, estudos cinemáticos e dinâmicos, aliados à inserção de modelo reológico apropriado ao tipo de fluido, são confrontados com características geométricas distintas, durante o entendimento de cenários simulados com vistas à aplicação.

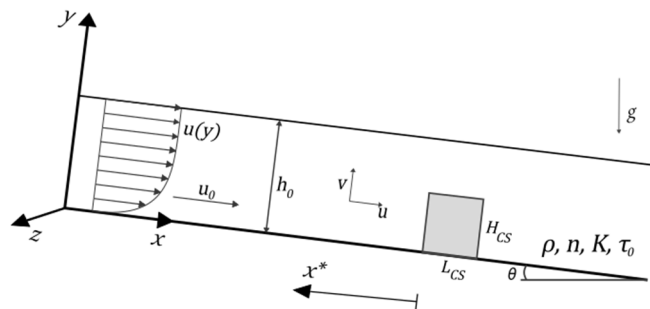
Para tanto, são calculados os campos de velocidade e pressão, as forças impostas ao corpo e os coeficientes de arrasto e sustentação. Avalia-se, de posse desses resultados, a possibilidade do carregamento de corpos sólidos à jusante, potencializando os efeitos catastróficos do fenômeno descrito.

2. METODOLOGIA

2.1. Geometria

Trata-se um escoamento em canal aberto de plano inclinado de ângulo θ medido em graus, com superfície livre, regido pela ação da aceleração gravitacional, g , conforme apresenta a Figura 2. O eixo cartesiano das ordenadas corresponde à y , enquanto o das abscissas, à x . x^* é o eixo secundário, de mesma direção e sentido contrário em relação ao eixo x , tendo sua origem posicionada na parede lateral esquerda do corpo sólido. As propriedades reológicas do fluido são ρ , n , K , e τ_0 , e representam, respectivamente, a massa específica, o índice de escoamento, o índice de consistência do escoamento e a tensão limite de escoamento. Nota-se, também, a estrutura de corpo sólido fixo com dimensões H_{CS} e L_{CS} , onde H_{CS} é sempre menor do que h_0 , visto tratar-se de um objeto submerso.

Figura 2: Representação esquemática de escoamento de superfície livre, incidindo sobre o obstáculo.



2.2. Hipóteses simplificadoras

Quando da consideração de um fluido escoando em um canal aberto, a hipótese de águas rasas pode ser utilizada, negligenciando-se os efeitos das paredes laterais. Nesse sentido, o fluido pode ser estudado como um filme de profundidade h_0 . Essa proposição implica em escoamento infinitamente longo, isto é, $L_x \gg L_y$ (Maciel et al., 2013). Ademais, o problema compreende o escoamento de um fluido considerado homogêneo, sem a presença de partículas sólidas, e incompressível. O fundo do canal não apresenta porosidades ou qualquer irregularidade. A força motriz atuante sobre o fluido é decorrente apenas da ação da aceleração da gravidade. O canal é infinitamente largo ($L_z \gg L_y$), o que implica na repetição da solução ao longo do eixo z e, também, na classificação do mesmo como sendo de domínio bidimensional.

2.3. Metodologia matemática

A modelagem matemática surge com o propósito de validação do modelo numérico. Aplicadas as hipóteses simplificadoras, as equações de conservação – continuidade (Equação 1) e *momentum* (Equação 2) – são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{xy}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\rho g \cos \theta$$

Através das equações adaptadas de Irgens (2014) e de Fiorot e Maciel (2019), segue-se a etapa de validação do modelo reológico. As características reológicas do fluido utilizado são estudadas seguindo-se o modelo de Herschel-Bulkley. Equação 3.

$$\tau_{xy} = \tau_0 + K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n, \quad (3)$$

para $\tau_{xy} > \tau_0$, caso contrário a magnitude da taxa de cisalhamento ($\partial u / \partial y$) é igual a zero. A taxa de cisalhamento é conforme a Equação 4:

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} = \left(\frac{\rho g (h_0 - y) \sin \theta - \tau_0}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

O perfil de velocidade é dado pela Equação 5:

$$u(y) = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\rho g y_0^{n+1} \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left[1 - \left(1 - \frac{y}{y_0} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right] \quad (5)$$

A altura da região do escoamento em cisalhamento, y_0 , é dada pela Equação 6:

$$y_0 = h_0 (1 - C), \quad (6)$$

onde C representa a taxa de cisalhamento adimensional, conforme Equação 7:

$$C = \frac{\tau_0}{\rho g h_0 \sin \theta} \quad (7)$$

A velocidade de *plug* diz respeito à porção não cisalhada do escoamento, ou seja, onde o perfil de velocidade é constante ao longo de y . Equação 8:

$$u_{y_0} = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\rho g y_0^{n+1} \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

Já a velocidade média é de acordo com a Equação 9:

$$u_0 = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\rho g y}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1+n+nC}{2n+1} \right) \quad (9)$$

Finalmente, a viscosidade cinemática aparente é apresentada segundo a Equação 10:

$$\nu = \frac{\tau}{\rho \dot{\gamma}} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \right) \quad (10)$$

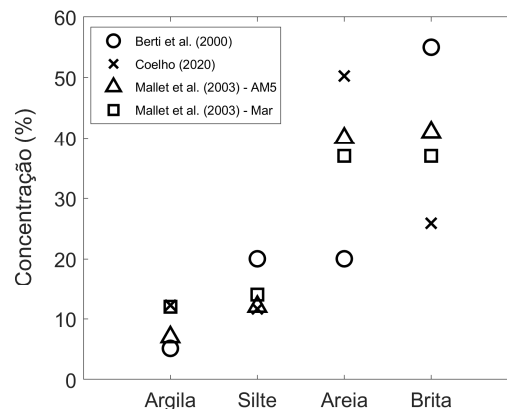
2.4. Caracterização do problema tipo

Nesta etapa de desenvolvimento do estudo, procura-se representar as condições características envolvendo movimentos de massa, através de eventos reais encontrados na literatura. A partir de estudos granulométricos com misturas de movimentos de massa reais, buscou-se determinar os parâmetros reológicos do fluido escoante. Além disso, através de observações empíricas registradas na literatura, quantificaram-se parâmetros geométricos, dinâmicos e cinemáticos para o caso do estudo proposto.

2.4.1. Caracterização reológica do fluido tipo

Primeiramente busca-se no evento ocorrido em Itaoca, reportado exaustivamente na literatura (Picanço et al. 2019, Gramani e Arduin 2015, Cabral et al. 2021), parâmetros de entrada para as condições do escoamento que possam simular numericamente o problema proposto. Os dados que caracterizam a composição do solo de Itaoca são extraídos do estudo morfológico de Coelho (2020). A composição é comparada com estudos de Malet et al. (2003) e Berti et al. (2000), que tratam de movimentos de massa nas bacias de Barcelonnete (França) e Acquabona (Itália), respectivamente. Os estudos granulométricos foram sintetizados e organizados conforme mostra a Figura 3:

Figura 3: Granulometria e composição dos solos, conforme dados extraídos da literatura. Comparação entre os estudos de Coelho (2020), Malet et al. (2003) e Berti et al. (2000).



Pode ser observado que a granulometria do solo de Itaoca, da mesma forma que os solos de Malet (Misturas artificiais AM5 e Mar) e Berti, apresenta uma distribuição percentual bem definida de argila, silte, areia e brita. Malet utiliza o modelo de Herschel-Bulkley para descrever a mistura. Coussot (1994) prova que o comportamento de uma mistura sólido-líquido sem sedimentação da parcela sólida pode ser descrito pelo modelo reológico não-linear de Herschel-Bulkley.

Os parâmetros reológicos adotados, baseados em estudo de Fiorot et al. (2018), arredondando-se alguns valores com a finalidade de simplificação, são os seguintes expressos pela Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros reológicos do fluido estudado.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Massa específica	ρ	2000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tensão limite de escoamento	τ_0	50	Pa
Índice de consistência	K	1000	$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$
Índice de escoamento	n	0,30	-

2.4.2. Caracterização cinemática e dinâmica

Para eventos brasileiros, como por exemplo o estudado em Itaoca, registrado exaustivamente na literatura, não é possível identificar as condições de contorno desse tipo de fenômeno, tais como: vazão, altura desenvolvida pela frente de onda, celeridade, entre outras. Assim, o trabalho deverá basear-se num evento em que tanto a reologia, quanto as condições de contorno, são identificáveis e análogas. Partir-se-á, portanto, do estudo realizado por Berti et al. (2000) que discorre sobre o evento ocorrido na bacia de Acquabona, Itália. Sistemas de monitoramento capturam anualmente condições hidrológicas, propriedades dinâmicas e processos de deposição favoráveis às corridas detríticas. Dentre as medições mais significativas, foram captadas, na data de 17 de agosto de 1998: chuvas totalizando 29 mm de precipitação e duração de 58 minutos, deposições com faixas de volume de 8000 a 9000 m³ e velocidades do escoamento na faixa de 1,82 a 7,69 m/s. Sensores ultrassônicos verificam, para o escoamento, profundidades de até 2 metros aproximadamente.

Para este trabalho, definem-se a profundidade do escoamento, h_0 , como sendo igual a 1 m e a velocidade média, u_0 , conforme calculada pela Equação 9, igual a 3,14 m/s.

Os parâmetros adimensionais de um fluido não newtoniano são apresentados a seguir. O número de Reynolds do escoamento, número adimensional que relaciona as forças inerciais às viscosas, calculado segundo Thompson e Soares (2016), é conforme a Equação 11:

$$Re = \frac{8\rho u_0^2}{\tau_0 + K \left(2 \frac{u_0}{L}\right)^n} \quad (11)$$

Para identificar a dinâmica do escoamento, portanto, onde $L = h_0 = 1$ m e $u_0 = 3,14$ m/s, calcula-se o adimensional como sendo $Re = 88$. Como $Re \ll 2000$, o escoamento é laminar.

O número de Froude, também adimensional, que indica a relação da energia cinética entre as direções horizontais e verticais, é tal como mostra a Equação 12:

$$Fr = \frac{u_0}{\sqrt{gL \cos \theta}} = 1 \quad (12)$$

As forças impostas ao corpo sólido submerso podem ser viscosas (Equação 13) ou de pressão (Equação 14):

$$F_v = \sum_m s_{f,m} \cdot (\mathbf{R}_{dev}) \quad (13)$$

$$F_p = \sum_m \rho_m s_{f,m} (p_m - p_{ref}) \quad (14)$$

onde \mathbf{R}_{dev} é o tensor deviatórico¹.

Ainda, em relação à dinâmica do escoamento, os coeficientes de arrasto e sustentação são apresentados conforme a Equação 15 e a Equação 16, respectivamente, adaptadas da literatura (Pritchard e Mitchell 2015):

¹ Tensor deviatórico: diferença entre o tensor de tensão e o tensor de pressão hidrostática.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho u_0^2 L} \quad (15)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho u_0^2 L} \quad (16)$$

Nas duas equações anteriores, F_D e F_L equivalem, respectivamente, às forças resultantes atuantes nos eixos x e y . Como a área projetada do corpo sólido leva em consideração a dimensão em z do mesmo, equivalente a 1 m, apenas o comprimento característico do obstáculo é apresentado na formulação. Para as Eq. 15 e 16, $L = H_{CS}$.

2.5. Metodologia numérica

A simulação numérica é realizada em OpenFOAM, de código aberto, escrito em linguagem de programação C++ e executado em sistema operacional *Linux*. Trata-se de um CFD, que emprega aproximadamente 250 aplicações pré-definidas, simulando processos físicos relacionados com: mecânica dos fluidos, processos de combustão, termodinâmica, modelos de turbulência, modelos reológicos, cinética química, transferência de calor, entre outros (OpenFOAM UserGuide 2020).

A solução numérica é obtida via *solver interFoam*, cujo algoritmo baseia-se no método VOF, utilizado para configuração de escoamento bifásico de um fluido Herschel-Bulkley biviscoso. O método emprega equações de transporte de espécie para determinar o volume de fração de fluido relativo às duas fases, ou fração de fase α , em cada célula computada.

A obtenção dos arquivos de dados gerados na simulação é realizada conjuntamente entre comandos específicos do OpenFOAM e a ferramenta integrada de pós-processamento *Paraview*. O pós-processamento é realizado inteiramente no software *Matlab*, versão estudantil.

2.5.1. Esquemas de resolução

Esquemas de resolução numéricos específicos foram adotados para a correta interpretação do escoamento por parte do OpenFOAM. Utiliza-se o esquema de Euler para a primeira derivada temporal ($\partial/\partial t$), dependente de estabilidade de acordo com o número de Courant, definido como sendo $Co = u\Delta t/\Delta x$. O número de Courant deverá ser tal que $Co \leq 0,5$, sendo Δt e Δx os tamanhos da malha temporal e longitudinal, respectivamente.

Para o acoplamento pressão-velocidade, o algoritmo PIMPLE (combinação entre os algoritmos PISO e SIMPLE) é utilizado: algoritmo de métodos iterativos para acoplamento das equações de conservação de massa e *momentum*. O *solver interFoam* resolve as equações de conservação totais para os dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis, correspondentes neste trabalho à lama e ao ar.

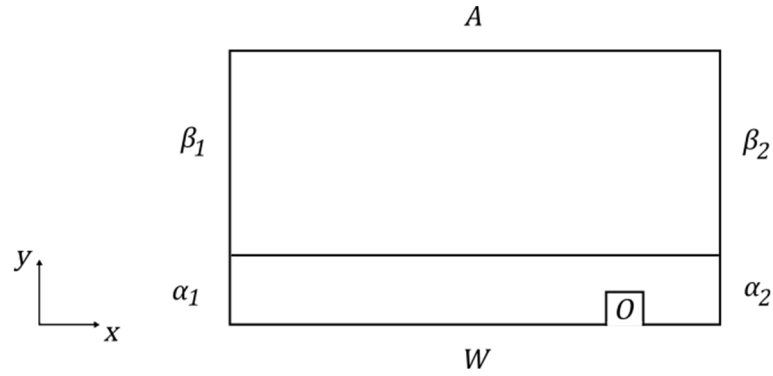
O método VOF (Hirt e Nichols 1981) é implementado para solução da interface entre os dois fluidos presentes (ar sendo o fluido newtoniano e a lama o não newtoniano), levando em consideração os efeitos gravitacionais. Para o esquema de discretização usa-se Gauss linear, que especifica a discretização por volumes finitos através da integração Gaussiana (interpolação dos valores do centro para as faces).

2.5.2. Geometria e Condições de contorno

As faixas dimensionais são tais que $x = [0; L_x = 40h_0]$, $y = [0; L_y = 20h_0]$ e $z = [0; L_z = h_0]$; sendo que a profundidade do escoamento é $h_0 = 1$ m. Então, as dimensões da

geometria são: $L_x = 40$ m, $L_y = 20$ m e $L_z = 1$ m. Cabe salientar que a terceira dimensão, z , existe apenas pela metodologia de resolução do OpenFOAM e não será resolvida neste trabalho. Nas faces frontal (x , y e $z = 0$) e anterior (x , y e $z = L_z$) do domínio tridimensional, as equações não serão resolvidas pelo software. A configuração geométrica é tal como apresentada na Figura 4:

Figura 4: Configuração numérica das fronteiras da geometria. α_1 : entrada de lama, parte inferior esquerda. α_2 : saída de lama, parte inferior direita. β_1 : entrada de ar, parte superior esquerda. β_2 : saída de ar, parte superior direita. A (atmosphere): parte superior. W (wall): parede inferior. O (obstacle): entalhe na parede inferior composto por três superfícies.



A Tabela 2 identifica as condições de contorno relacionadas às respectivas localizações geométricas do domínio na Figura 4.

Tabela 2: Descrição de parâmetros geométricos importantes com as respectivas condições de contorno.

Fronteira	Faixa dimensional	Condições de contorno		
		u_0 (m/s)	p (N/m ²)	α
α_1	$x = 0$, $y = [0; h_0]$ e $z = [0; h_0]$	$\frac{\partial u}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n_F} = 0$	1
α_2	$x = 40h_0$, $y = [0; h_0]$ e $z = [0; h_0]$	$\frac{\partial u}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial \alpha}{\partial n_F} = 0$
β_1	$x = 0$, $y = [2h_0; 20h_0]$ e $z = [0; h_0]$	$\frac{\partial u}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n_F} = 0$	0
β_2	$x = 40h_0$, $y = [2h_0; 20h_0]$ e $z = [0; h_0]$	$\frac{\partial u}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial \alpha}{\partial n_F} = 0$
A	$x = [0; 40h_0]$, $y = 20h_0$ e $z = [0; h_0]$	*	**	***
W	$x = [0; 30h_0] \cup [30h_0 + L_{CS}; 40h_0]$, $y = 0$ e $z = [0; h_0]$	0	$\frac{\partial p}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial \alpha}{\partial n_F} = 0$
O	$x = [30h_0; 30h_0 + L_{CS}]$, $y = [0; H_{CS}]$ e $z = [0; h_0]$	0	$\frac{\partial p}{\partial n_F} = 0$	$\frac{\partial \alpha}{\partial n_F} = 0$

*, **, *** : Fluxo igual a zero se escoamento for positivo e valor prescrito igual a zero caso escoamento negativo.

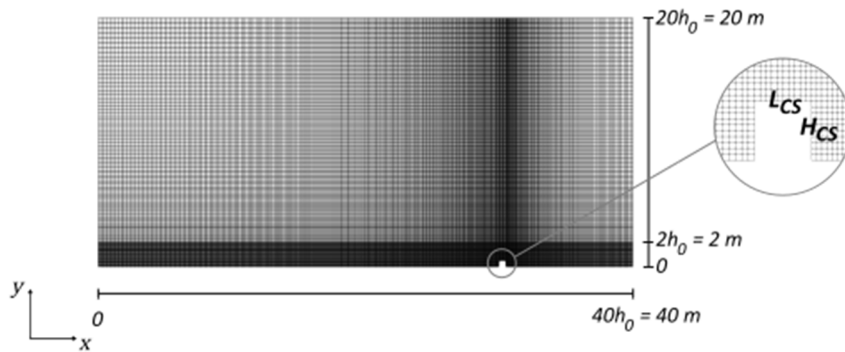
A inclinação do canal equivale a $\theta = 7^\circ$ e não será utilizada na configuração da geometria, mas sim na inserção da aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), que terá orientação rotacionada, de acordo com θ , em relação ao sistema de coordenadas global. As grandezas características do domínio foram obtidas a partir de simulações numéricas sob regime permanente uniforme.

Com exceção da parte inferior, que corresponde ao fundo do canal e ao obstáculo, e da parte superior, que apresenta condições particulares, todas as condições de contorno são de Neumann, ou 2ª espécie, e representam a condição de fluxo prescrito. W e O têm condição de não deslizamento, ou seja, a velocidade do fluido é a mesma da parede (zero). A fração de volume para os fluidos é tal que $\alpha = 1$ se no volume de controle há presença da lama e $\alpha = 0$ se há presença de ar. Por fim, a região compreendida por lama tem condição inicial de Dirichlet, sendo o parâmetro de entrada igual à velocidade média (u_0). A fronteira O será utilizada como referencial para os cálculos das forças e dos coeficientes de arrasto e sustentação impostos ao obstáculo pela ação do escoamento.

2.5.3. Malha numérica

A malha numérica utilizada é apresentada na Figura 5. A parte inferior, correspondente à porção de lama em escoamento e à interface de ambos os fluidos, é de tal forma mais refinada que a parte superior. A finalidade desta configuração é a de melhor captação comportamental do escoamento nesta faixa, que se torna mais crítico do que a parte superior, onde somente o ar está presente. Em destaque ampliado, pode-se ver a geometria do corpo sólido fixo.

Figura 5: Malha numérica do domínio bidimensional utilizada, quando da inserção do corpo sólido.



2.5.4. Modelo reológico numérico

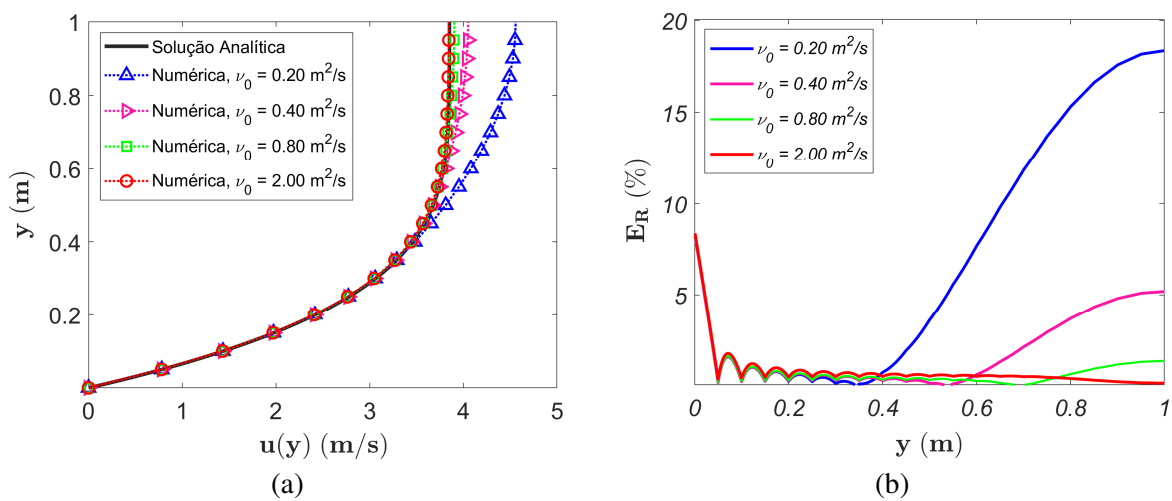
Para resolução numérica de um problema envolvendo um fluido não newtoniano do tipo Herschel-Bulkley, é necessário que a descontinuidade existente no modelo matemático seja adaptada numericamente. Nguyen et al. (2006) propõem um modelo biviscoso, que lineariza o modelo empregando um modelo newtoniano para baixas taxas de deformação, conforme mostra a Equação 17.

$$\begin{aligned} v &= v_0, & \text{se } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0 \\ v &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \right), & \text{se } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \end{aligned} \quad (17)$$

Esse modelo de biviscosidade garante que, para regiões onde a taxa de cisalhamento é significativamente baixa, a viscosidade adotada não adquira valores extremos de magnitude, levando a instabilidades numéricas. Então, para as regiões críticas referidas, o fluido é tratado como fluido newtoniano de alta viscosidade (Saliba 2019). Portanto, a viscosidade aparente ν_0 representaria a viscosidade acima da qual o fluido se comporta como um sólido. A estimativa inicial ν_0 é dependente da consistência do material, K/ρ . Portanto, deve ser função da sua ordem grandeza da ordem de $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$.

Ao aproximar-se da região pistonada, o perfil de velocidade se estrutura em função da viscosidade aparente, como mostra a Figura 6 (a). Já a Figura 6 (b) apresenta o erro relativo referente a cada ν_0 adotado.

Figura 6: (a) Perfis de velocidade simulados em função de diferentes valores empregados para ν_0 . (b) Erros relativos da solução numérica para diferentes valores assumidos pela viscosidade, em relação à solução analítica.



Os perfis de velocidade simulados apresentam todos o mesmo comportamento a uma altura de 40% da profundidade total do escoamento. À medida que se afastam da região cisalhada, as diferenças se tornam mais acentuadas para menores valores de ν_0 . Os perfis de velocidade que mais se aproximam da solução exata são aqueles que utilizaram valores de $\nu_0 = 0,80$ e $2,00 \text{ m}^2/\text{s}$.

O erro relativo da Figura 6 (b) é calculado conforme a Equação 1:

$$E_R = \left| \frac{\text{solução analítica} - \text{solução numérica}}{\text{solução analítica}} \right| \times 100 \quad (1)$$

Através do gráfico que mostra os erros relativos de cada solução, é possível observar que os melhores resultados atingidos foram aqueles com maiores valores de viscosidade adotados. Erros relativos próximos de 1 e 2% são predominantes ao longo da profundidade do escoamento. O erro inicial, presente em todas as soluções válidas para $y[0; 0,05 \text{ m}]$, aproximadamente, indica que a solução numérica encontra limitações de cálculo ao fundo do canal, em vista da condição de contorno de não deslizamento – contorna-se essa imprecisão com o aumento do número de volumes nessa região do domínio.

A solução de $\nu_0 = 0,80 \text{ m}^2/\text{s}$ apresentou um erro médio relativo de 0,79%, enquanto que a solução de $\nu_0 = 2,00 \text{ m}^2/\text{s}$ apresentou 0,78%. Ambos os valores são aceitáveis, do ponto de vista de aproximação. Entretanto, para as próximas simulações, escolhe-se o valor da viscosidade

aparente como sendo igual à $v_0 = 2,00 \text{ m}^2/\text{s}$, visto que para regiões próximas da velocidade pistonada, têm-se melhor aproximação.

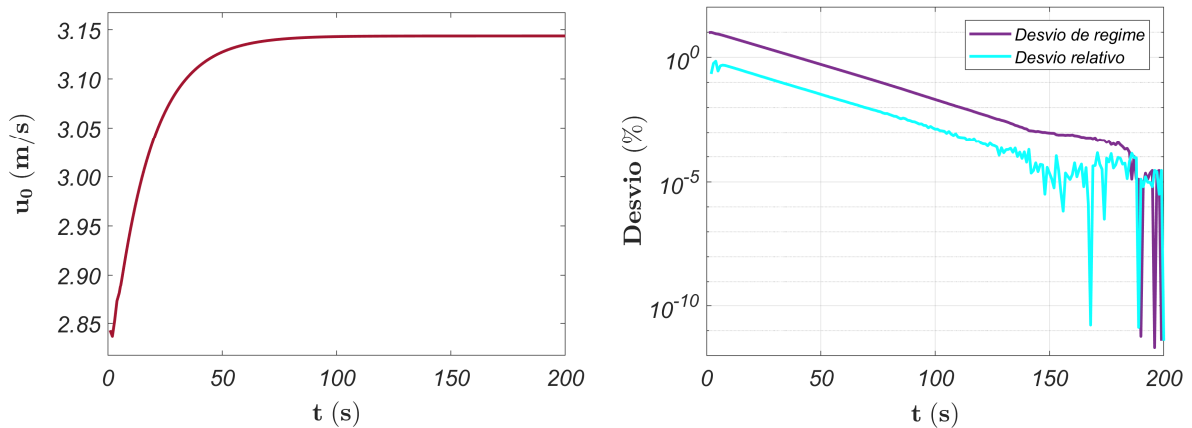
2.6. Validação do estudo numérico

Através da formulação matemática, que permite estimar o valor da viscosidade aparente, baseando-se nas características reológicas do fluido apresentadas, buscou-se a validação da solução obtida no estudo numérico, sob condições de escoamento permanente e uniforme de um fluido não newtoniano em plano inclinado. As avaliações do escoamento neste primeiro momento são realizadas sem a presença do corpo sólido.

2.6.1. Garantia do escoamento sob regime permanente

Para verificar se o escoamento atinge regime permanente observa-se o comportamento da velocidade média ao longo do tempo simulado. Figura 7 (a). Já a Figura 7 (b) apresenta os desvios de u_0 calculados em relação ao intervalo anterior (desvio relativo) e à u_0 final do intervalo (desvio de regime).

Figura 7: (a) Velocidade média do escoamento em função do tempo. (b) Desvio relativo e desvio de regime, ambos em escala logarítmica.



Os dados apresentados na Figura 7 são extraídos da região do domínio igual a $x = 30h_0 = 30 \text{ m}$; região esta que será utilizada para posicionamento do corpo sólido, visando condições de escoamento bem desenvolvido. Pode-se observar que a velocidade média atinge a estabilidade, sob inspeção visual, a partir dos 100 segundos, com grandeza aproximada de 3,14 m/s. Esse comportamento pressupõe que escoamento tende a assumir comportamento de regime permanente. Para embasamento de tal afirmação, calculam-se o desvio médio relativo² e o desvio de regime³.

Neste trabalho define-se um valor de 0,1% para os dois desvios citados anteriormente, com vistas a inferir que o escoamento se encontra bem desenvolvido e já não apresenta diferenças significativas ao longo intervalo de tempo simulado. O desvio médio relativo e o desvio de regime indicam que a velocidade média do intervalo apresenta um desvio de 0,1% em $t = 149$

² Desvio relativo: $D_R = \left| \frac{u_0(t) - u_0(t+1)}{u_0(t)} \right| \times 100$

³ Desvio de regime: $D_{reg} = \left| \frac{u_0(t \rightarrow +\infty) - u_0(t)}{u_0(t \rightarrow +\infty)} \right| \times 100$

e 105 segundos, respectivamente. É assumido o maior intervalo de tempo para corroborar a argumentação de que o escoamento se desenvolve em regime permanente.

2.6.2. GCI

Para verificar a qualidade da solução numérica é realizada a análise quantitativa do GCI. Avaliam-se variáveis globais do escoamento: velocidade máxima, pressão e velocidade médias. Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3: Parâmetros objetivos em função da malha numérica empregada.

Malha	Volumes	\bar{u} [m/s]	$u_{m\acute{a}x}$ [m/s]	\bar{p} [kPa]	Custo Computacional [s]
M1	40.000	3,1290	3,8487	9,7573	2.200
M2	10.000	3,1234	3,8587	9,7761	397
M3	2.500	3,1593	3,9795	9,8518	111

Tabela 4: Parâmetros de independência de malha calculados segundo Roache (1994):

	\bar{u}	$u_{m\acute{a}x}$	\bar{p}
GCI ₁₂	$4,1453 \times 10^{-4}$	$2,9489 \times 10^{-4}$	$7,9284 \times 10^{-4}$
GCI ₂₃	0,0027	0,0035	0,0032
f_R	3,1301 m/s	3,8478 m/s	9,7511 kPa
χ	0,9981	0,9974	1,0018

O estudo de convergência de malha atinge condições esperadas e satisfatórias, visto que, para os três parâmetros avaliados nas simulações, χ é bastante próximo de 1. A malha M1, dentre as três utilizadas, é aquela que apresenta os resultados mais satisfatórios quando da comparação com os valores da extrapolação de Richardson (f_R).

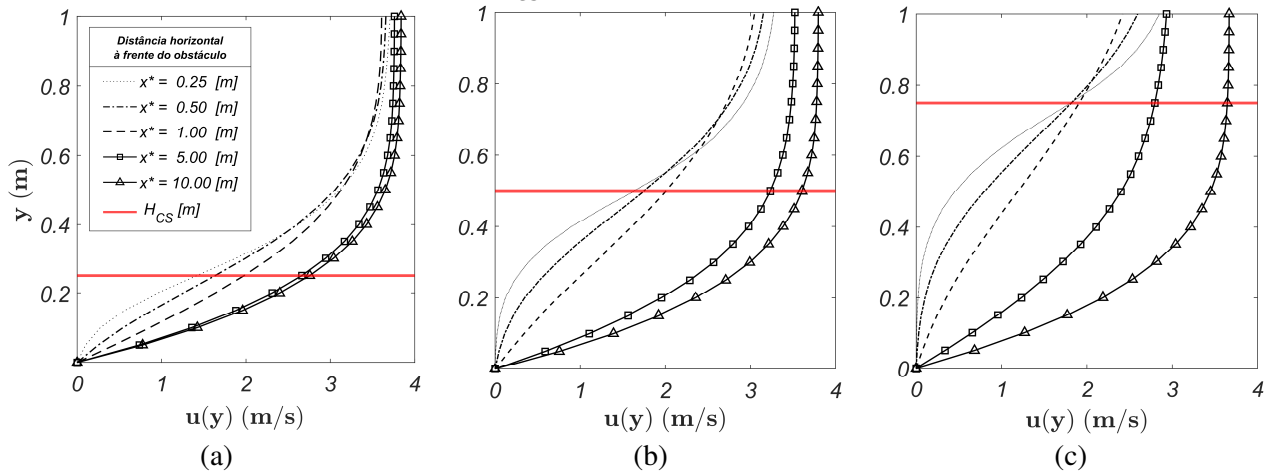
3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos na simulação do problema estudado. O comportamento do escoamento em relação à proximidade de um obstáculo é definido em função de diferentes tamanhos característicos para a altura e o comprimento do corpo sólido. Os perfis de velocidade também são adimensionalizados de acordo com a respectiva profundidade do escoamento. Por fim, apontam-se as solicitações ao corpo sólido (forças de pressão e viscosas, coeficientes de arrasto e sustentação), com suas respectivas funções de aproximação em relação a cada variação de geometria do mesmo. Os campos de velocidade, bem como os de pressão, podem ser encontrados no Apêndice A, que segue ao final deste trabalho.

3.1. Sensibilidade do escoamento ao obstáculo

A Figura 8 apresenta os perfis de velocidade longitudinais em função de y para três variações de altura do obstáculo. Diferentes posições à montante do mesmo são avaliadas, buscando-se o entendimento quanto à sensibilidade do escoamento em presença, ou proximidade, do corpo sólido.

Figura 8: Perfis de velocidade que mostram a sensibilidade do escoamento em relação à variabilidade da altura do corpo sólido de contenção. (a) $H_{CS} = 0,25$ m, $Re = 9$. (b) $H_{CS} = 0,50$ m, $Re = 11$. (c) $H_{CS} = 0,75$ m, $Re = 13$.

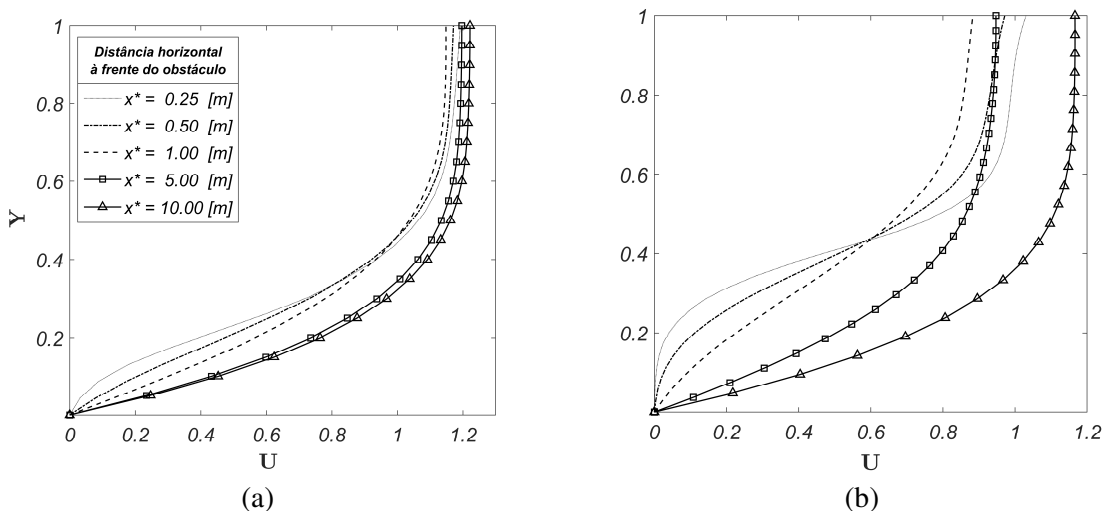


Pode-se perceber, conforme a Figura 8, que para uma distância de $x^* = 10$ m, os perfis de velocidade permanecem praticamente inalterados e são semelhantes ao perfil exato de solução, visto anteriormente. Verifica-se que o escoamento ainda não percebe qualquer bloqueio à montante. Já para distâncias estudadas menores do que $x^* = 10$ m, para as três dimensões características (H_{CS}), o escoamento se adapta de diferentes formas ao se aproximar do objeto. Na proporção em que se aumenta H_{CS} , da Figura 8 (a) até (c), aumenta também a região em que as velocidades são iguais ou próximas de zero. Essa região é conhecida na literatura (Tiberghien et al. 2007) como região de zona morta (do inglês, *dead zone*). A visualização da zona morta é bastante evidente quando da análise dos campos de velocidade e pressão (Apêndice A). Ademais, aproximando-se o escoamento do corpo sólido, os perfis de velocidade com distanciamento x^* intermediários vão ao encontro do eixo y vertical, ou seja, tendem a reduzir suas magnitudes em relação àqueles da figura anterior.

3.2. Perfis de velocidade em relação à h_0

A seguir são apresentados os perfis de velocidade, em valores adimensionais, para diferentes posições de referencial longitudinal à frente do obstáculo para um corpo sólido de $H_{CS} = 0,25$ m – Figura 9 (a) – e $H_{CS} = 0,75$ m – Figura 9 (b).

Figura 9: Perfis de velocidade em valores adimensionais. (a) $H_{CS} = 0,25$ m. (b) $H_{CS} = 0,75$ m.

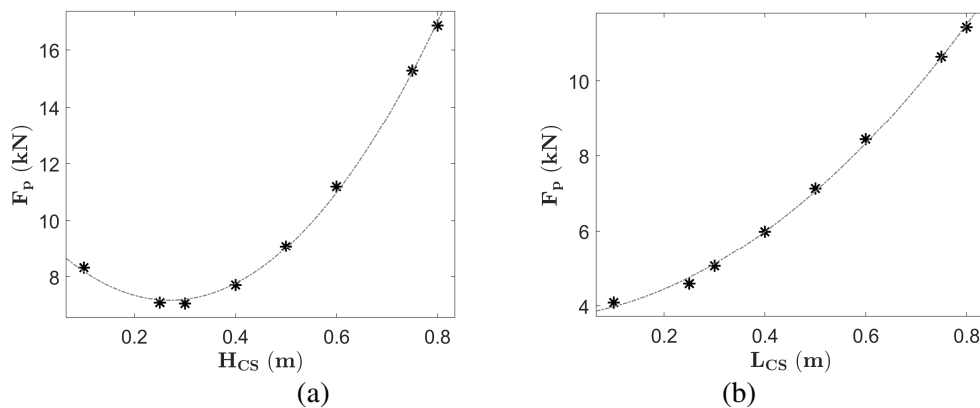


Para adimensionalização das figuras, a velocidade do escoamento foi dividida pela velocidade média u_0 ; já para o valor correspondente à posição y , dividiu-se pela profundidade do escoamento em cada respectiva posição à frente do obstáculo. Esse procedimento tem por finalidade definir o comportamento do perfil de velocidade tendente ao pistonado, ou seja, para que o perfil das velocidades em regiões de baixa tensão de cisalhamento sejam, todas, praticamente verticais (perfil de velocidade pistonado). Possibilita-se, assim, um estudo de caso menos dependente da dimensão característica do obstáculo. Para um corpo com altura menor, os perfis de velocidade sofrem mudança reduzida entre as posições em x^* . Entretanto, para alturas maiores, os perfis sofrem brusca alteração de comportamento. Aliado a esse aspecto, para maiores dimensões verticais da estrutura sólida, a velocidade próxima de zero é mais evidente nestes perfis do que para os de menores dimensões. Cabe ressaltar que na Figura 9 (b), a velocidade $U(1)$ para $x^* = 0,25$ só não é maior do que a velocidade na mesma posição Y para $x^* = 10,00$. Esse aspecto indica que o fluido aumenta sua velocidade significativamente em magnitude ao sofrer um estrangulamento, ou seja, ao ser diminuída a distância entre a face superior do corpo sólido e a altura do escoamento.

3.3. Análise da solicitação imposta à estrutura pelo escoamento

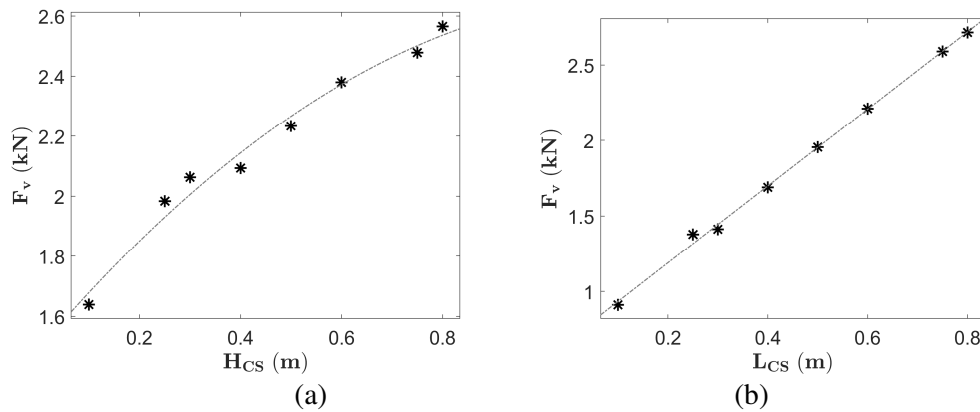
As Figura 10, Figura 11 e Figura 12, apresentadas nesta seção, correspondem às solicitações dinâmicas experimentadas pelo corpo sólido, em virtude do escoamento lamoso que o encobre. Todas as observações, de acordo com o respectivo tipo de esforço, foram aproximadas por funções e encontram-se resumidas na Tabela 5.

Figura 10: Forças de pressão com diferentes geometrias. (a) Variação de H_{CS} . (b) Variação de L_{CS} .



Pode ser observado pela análise da figura anterior que, de maneira geral, maiores dimensões características da estrutura implicam em maiores forças experimentadas pela mesma. O campo de pressão também segue essa mesma característica: nas proximidades com um corpo de maior altura, verificam-se maiores pressões (Apêndice A). Cabe salientar que na Figura 10 (a) existe um ponto de inflexão na função aproximada de 2º grau, ocorrendo quando $H_{CS} = 0,3$ m. Esta dimensão foi mantida fixa para as análises com variações de L_{CS} , Figura 10 (b), visto que corresponde ao menor esforço experimentado pelo corpo e seria, portanto, a que melhor resultaria em suavização de interferências no segundo estudo (variação do comprimento do corpo sólido).

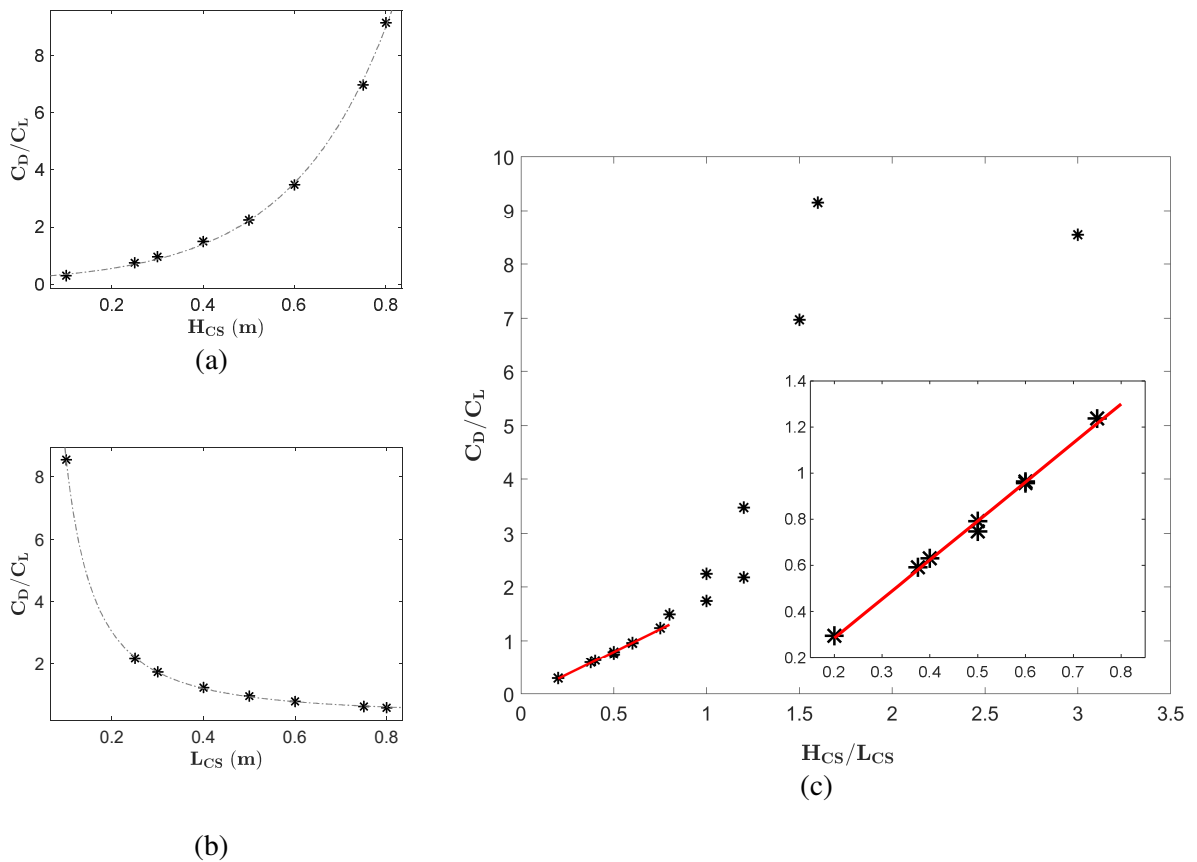
Figura 11: Forças viscosas com diferentes geometrias. (a) Variação de H_{CS} . (b) Variação de L_{CS} .



Na Figura 11 também é verificado o mesmo comportamento dos esforços vistos na Figura 10 de acordo com cada dimensão da estrutura. Existe, entre as duas figuras, uma diferença na função de aproximação: a Figura 11 (a) usa uma equação quadrática, enquanto a Figura 11 (b) usa uma função linear.

A Figura 12 apresenta o estudo dos coeficientes de arrasto e sustentação, de acordo com as dimensões características do corpo sólido, aliado à análise conjunta das razões entre as grandezas envolvidas.

Figura 12: Razão entre o coeficiente de arrasto e de sustentação comparada a três condições dimensionais. (a) Variação de H_{CS} . (b) Variação de L_{CS} . (c) Variação da razão entre H_{CS} e L_{CS} .



A razão C_D/C_L aumenta para maiores dimensões da altura do corpo sólido – Figura 12 (a). Ainda, $C_D/C_L < 1$ para valores de $H_{CS} \leq 0,25$ m, aproximadamente. Isto posto, o corpo sólido

tende a permanecer na mesma posição para estas condições, já que o coeficiente de sustentação é maior. Ou seja, as reações provocadas pela força resultante em y são maiores do que as provocadas por forças em x . Por outro lado, quando a razão é maior do que 1, o corpo sólido tende a ser arrastado pelo escoamento. A Figura 12 (b), por sua vez, apresenta curva em comportamento inverso. A razão C_D/C_L diminui para maiores dimensões da largura do corpo sólido, verificando-se razão $C_D/C_L < 1$. E, com menores valores na largura da estrutura, verifica-se razão $C_D/C_L > 1$.

A Figura 12 (c) apresenta a mesma razão dos coeficientes, entretanto analisada em relação à razão H_{CS}/L_{CS} , adimensional. Através da depreensão da referida figura, pode ser observado um comportamento linear para razões de H_{CS}/L_{CS} menores do que 0,8. Isto significa que para valores compreendidos nessa faixa, independente da dimensão proporcional (mm, cm, m, etc.), os coeficientes de arrasto e sustentação apresentam, combinados, desempenho linear.

Tabela 5: Funções de aproximação dos resultados obtidos, de acordo com a geometria do obstáculo, para as forças viscosas e de pressão, e da razão entre os coeficientes de arrasto e sustentação.

Figura		Função $f(x)$ de aproximação
Figura 10	(a)	$34,94x^2 - 18,87x + 9,73$
	(b)	$10,10x^2 + 1,63x + 3,72$
Figura 11	(a)	$-0,82x^2 + 1,96x + 1,49$
	(b)	$2,55x + 0,68$
Figura 12	(a)	$0,22e^{4,67x}$
	(b)	$0,20x^{-1,61} + 0,32$
	(c)	$1,69x - 0,055$

4. CONCLUSÃO

Através de um estudo numérico, que avalia a interação fluido-estrutura, podem ser compreendidas questões conexas aos esforços sofridos por um corpo sólido submerso. Primeiramente, buscou-se entender o comportamento do escoamento ao encontrar-se nas adjacências de um obstáculo. Os perfis de velocidade sofrem sensível modificação para estruturas de maior altura e uma região conhecida como zona morta surge com maior protuberância.

Avalia-se, também, a condição de o corpo sólido ser ou não arrastado pelo escoamento em função da razão entre coeficientes de arrasto e sustentação. Quando a referida razão é maior do que um, implica em carregamento de corpos sólidos à jusante do escoamento, agravando e potencializando efeitos catastróficos em corridas detriticas.

Funções de aproximação foram estabelecidas através dos dados obtidos, compreendendo: a relação entre geometria, o tamanho característico do obstáculo, as forças de pressão, as forças viscosas e os coeficientes de arrasto e sustentação. Estabelece-se uma relação linear nas razões de coeficiente de arrasto e sustentação quando $H_{CS} \leq 0,8L_{CS}$.

Propõem-se, para futuros trabalhos, estudos continuados. Acerca do tipo de fluido analisado, poderia ser melhor entendido, mediante a variação dos parâmetros reológicos do fluido escoante, de que maneira os esforços aplicados ao corpo sólido fixo são alterados. Há, também, a possibilidade de análise no tratamento do corpo sólido como sendo móvel e, para tanto, seriam necessários acoplamentos lagrangeanos. Ainda, é possível tratar o corpo sólido como sendo uma estrutura de contenção, levando em consideração as tensões e reações sofridas pela mesma, a ponto de estabelecer se a barreira tem ou não a capacidade de minimizar os riscos presentes em escoamento de tamanha magnitude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berti, M., Rinaldo Genevois, R. LaHusen, A. Simoni, and P. R. Tecca. 2000. “Debris Flow Monitoring in the Acquabona Watershed on the Dolomites (Italian Alps).” *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25(9):707–15. doi: 10.1016/S1464-1909(00)00090-3.
- Cabral, Victor Carvalho, Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, Fernando Mazo D’Affonseca, Ana Lucía, Claudia Vanessa dos Santos Corrêa, Vinicius Veloso, Marcelo Fischer Gramani, Agostinho Tadashi Ogura, Andrea Fregolente Lazaretti, Felipe Vemado, Augusto José Pereira Filho, Claudia Cristina dos Santos, Eymar Silva Sampaio Lopes, Lis Maria Reoni Rabaco, Lucilia do Carmo Giordano, and Christiane Zarfl. 2021. “Characterization of a Landslide-Triggered Debris Flow at a Rainforest-Covered Mountain Region in Brazil.” *Natural Hazards* 108(3):3021–43. doi: 10.1007/s11069-021-04811-9.
- Chen, Ming, Chuan Tang, Xianzheng Zhang, Jiang Xiong, Ming Chang, Qingyun Shi, Feilong Wang, and Mingwei Li. 2021. “Quantitative Assessment of Physical Fragility of Buildings to the Debris Flow on 20 August 2019 in the Cutou Gully, Wenchuan, Southwestern China.” *Engineering Geology* 293(October 2020):106319. doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106319.
- Coelho, Rebeca Durço. 2020. “Caracterização Das Propriedades Físicas Do Solo e a Instabilidade Das Encostas Na Serra Do Mar (Itaóca - SP).” Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Coussot, Philippe. 1994. “Steady, Laminar, Flow of Concentrated Mud Suspensions in Open Channel: Ecoulements à Surface Libre Permanents et Laminaires de Suspensions Boueuses Concentrées.” *Journal of Hydraulic Research* 32(4):535–59. doi: 10.1080/00221686.1994.9728354.
- Coussot, Philippe, and Maurice Meunier. 1996. “Recognition, Classification and Mechanical Description of Debris Flows.” *Earth-Science Reviews* 40(3–4):209–27. doi: 10.1016/0012-8252(95)00065-8.
- Fernández, Diego Sebastián, Valérie Baumann, and Noelia Carrizo. 2021. “The Twin Catastrophic Flows Occurred in 2014 at Ambato Range (28°09′–28°20′S), Catamarca Province, Northwest Argentina.” *Journal of South American Earth Sciences* 106(November 2020). doi: 10.1016/j.jsames.2020.103086.
- Fiorot, Guilherme H., Fabiana de O. Ferreira, Pascal Dupont, and Geraldo de F. Maciel. 2018. “Roll-Waves Mathematical Model as a Risk-Assessment Tool: Case Study of Acquabona Catchment.” *Journal of Hydraulic Engineering* 144(12):05018009. doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001538.
- Fiorot, Guilherme Henrique, and Geraldo de Freitas Maciel. 2019. “Free-Surface Laminar Flow of a Herschel–Bulkley Fluid over an Inclined Porous Bed.” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 272(April):104164. doi: 10.1016/j.jnnfm.2019.104164.
- De Freitas Maciel, Geraldo, Fabiana De Oliveira Ferreira, and Guilherme Henrique Fiorot. 2013. “Control of Instabilities in Non-Newtonian Free Surface Fluid Flows.” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 35(3):217–29. doi: 10.1007/s40430-013-0025-y.
- Gramani, Marcelo Fischer, and Deborah Horta Arduin. 2015. “Morfologia Da Drenagem e Dos Depósitos de Debris Flow Em Itaóca, São Paulo.” *15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental* (11):1–10.
- Hirt, C. W., and B. D. Nichols. 1981. “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries.” *Journal of Computational Physics* 39(1):201–25. doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- Irgens, Fridtjov. 2014. *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Trondheim, Norway: Springer

Netherlands.

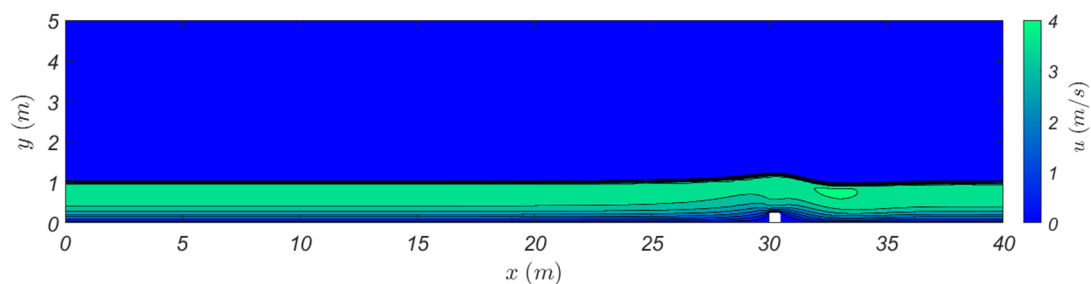
- Kanji, Milton A., Paulo T. Cruz, and Façal Massad. 2008. “Debris Flow Affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil.” *Landslides* 5(1):71–82. doi: 10.1007/s10346-007-0110-3.
- Malet, J. P., A. Remaître, O. Maquaire, C. Ancey, and J. Local. 2003. “Flow Susceptibility of Heterogeneous Marly Formations: Implications for Torrent Hazard Control in the Barcelonnette Basin (Alpes-de-Haute-Provence, France).” *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings* 1(January):351–62.
- Nguyen, V. H., S. Rémond, J. L. Gallias, J. P. Bigas, and P. Muller. 2006. “Flow of Herschel-Bulkley Fluids through the Marsh Cone.” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 139(1–2):128–34. doi: 10.1016/j.jnnfm.2006.07.009.
- OpenFOAM UserGuide, OpenFoam. 2020. “OpenFOAM User Guide Version 8.” (July):U2–71.
- Picanço, Jefferson, Bianca Vieira, Tiago Martins, Marcelo Gramani, Gabriel Faccuri, and Marcio Silva. 2019. “Debris-Flow Occurrence in Granite Landscape in South-Southeast Brazil.” *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment - Proceedings of the 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation* 798–807.
- Pritchard, Philip J., and John W. Mitchell. 2015. *Fox and McDonald’s Introduction to Fluid Mechanics*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Roache, Patrick J. 1994. “Roache_1994.Pdf.” *Journal of Fluid Engineering* 116:405–13.
- Saliba, J. 2019. “Optimisation of Flow Distribution for Pipe Pullback in Horizontal Directional Drilling.”
- Thompson, Roney L., and Edson J. Soares. 2016. “Viscoplastic Dimensionless Numbers.” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 238(December):57–64. doi: 10.1016/j.jnnfm.2016.05.001.
- Tiberghien, D., D. Laigle, M. Naaim, E. Thibert, and F. Ousset. 2007. “Experimental Investigations of Interaction between Mudflow and an Obstacle.” *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings* (January):281–92.

APÊNDICE A

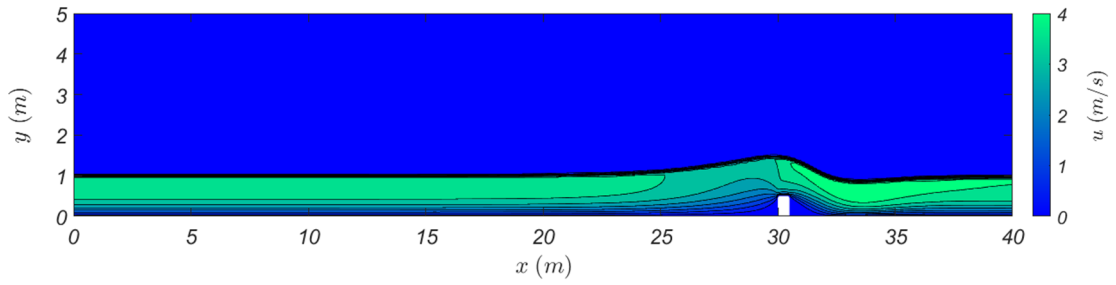
O Apêndice A apresenta os campos de velocidade e pressão das simulações numéricas, em escala de cores, de acordo com cada dimensão característica do corpo sólido.

A Figura A. 1 apresenta o campo de velocidades simulado para uma variação na altura do corpo sólido, com comprimento constante de $L_{CS} = 0,50$ m.:

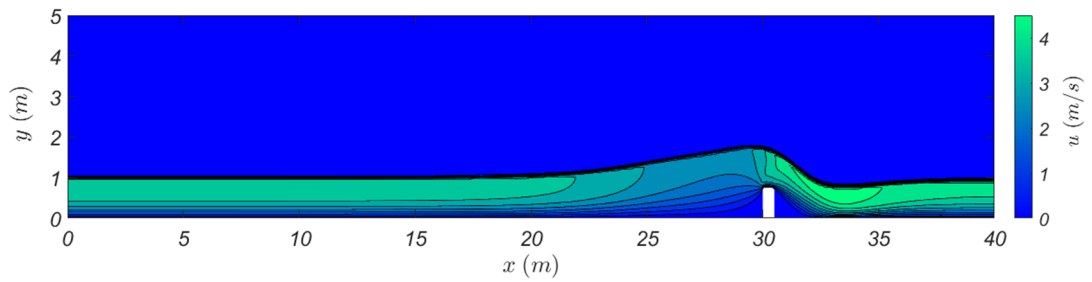
Figura A. 1: Campo de velocidade para estudo do comportamento do escoamento, variando a altura do corpo sólido. (a) $H_{CS} = 0,25$ m. (b) $H_{CS} = 0,50$ m. (c) $H_{CS} = 0,75$ m.



(a)

Figura A.1: *continuação.*

(b)



(c)

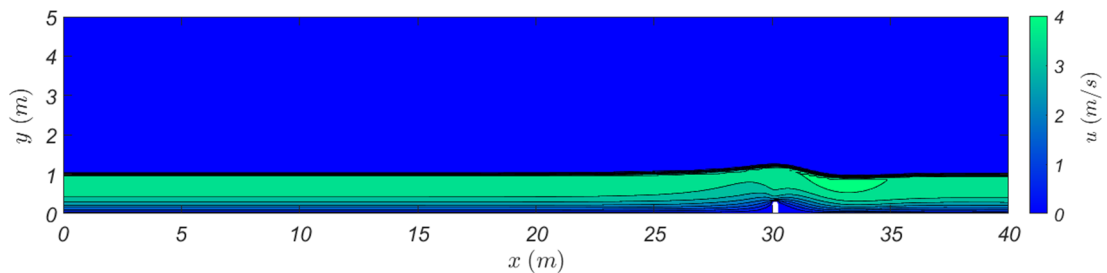
Percebe-se um aumento da região de baixa ou nula velocidade de acordo com o aumento da altura do corpo sólido para regiões próximas ao fundo do canal. Característica correspondente à zona morta. As maiores velocidades se desenvolvem à jusante do corpo sólido.

A

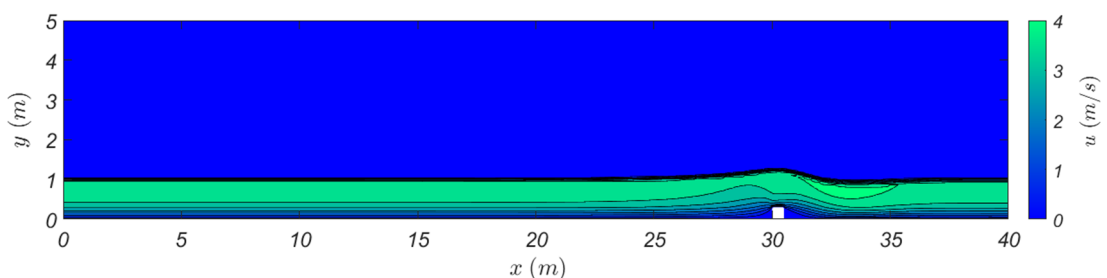
Figura A. 2, por sua vez, mostra o campo de velocidades simulado para uma variação na largura do corpo sólido, com altura constante de $H_{CS} = 0,30$ m:

Figura A. 2: Campo de velocidade para estudo do comportamento do escoamento, variando o comprimento do corpo sólido, com altura constante de $H_{CS} = 0,30$ m. (a) $L_{CS} = 0,25$ m.

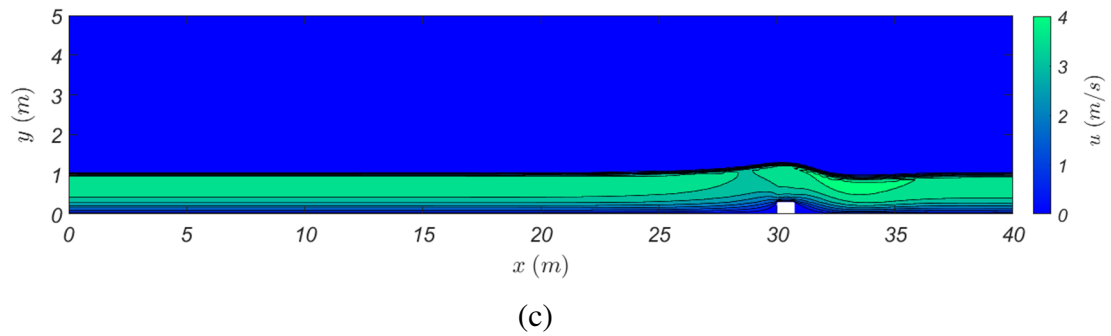
(b) $L_{CS} = 0,50$ m. (c) $L_{CS} = 0,75$ m.



(a)

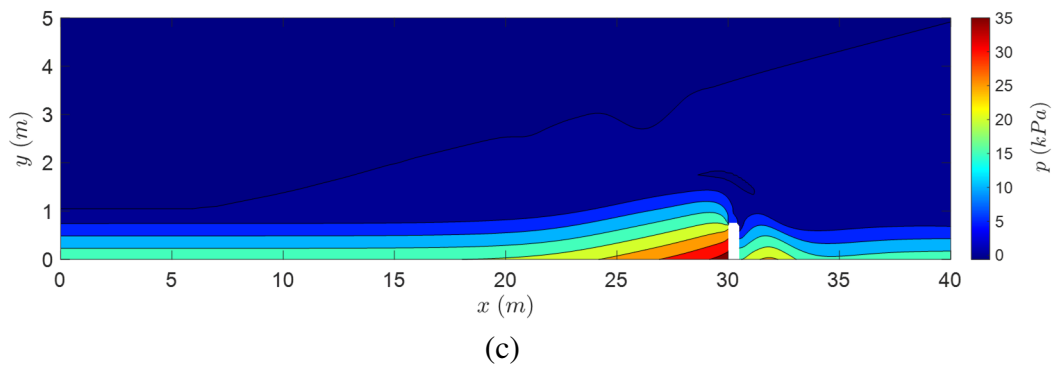
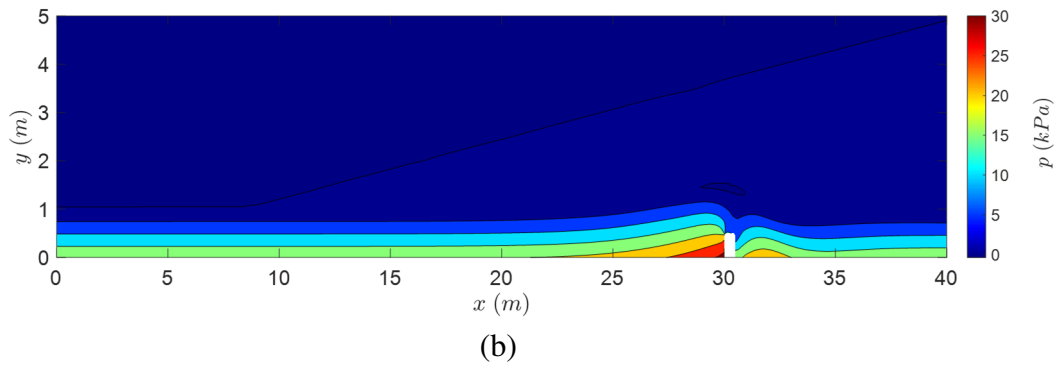
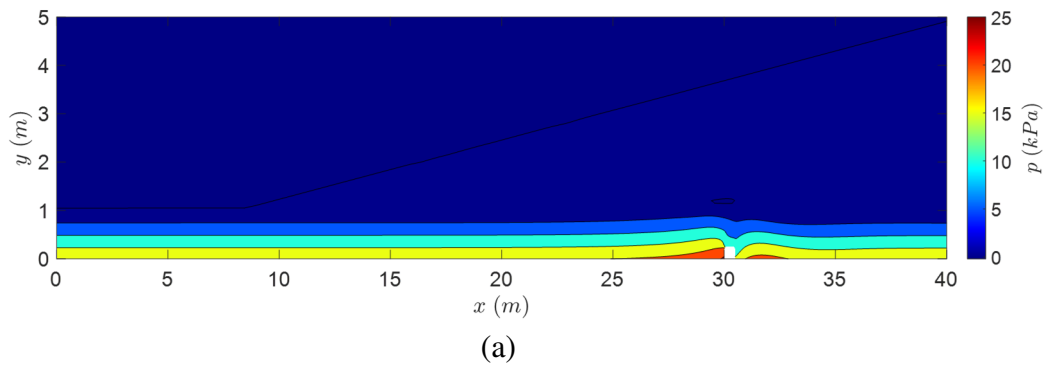


(b)

Figura A.2: *continuação.*

A Figura A. 3 apresenta o campo de pressão (dinâmica + hidrostática) simulado para uma variação na altura do corpo sólido, com comprimento constante de $L_{CS} = 0,50$ m.:

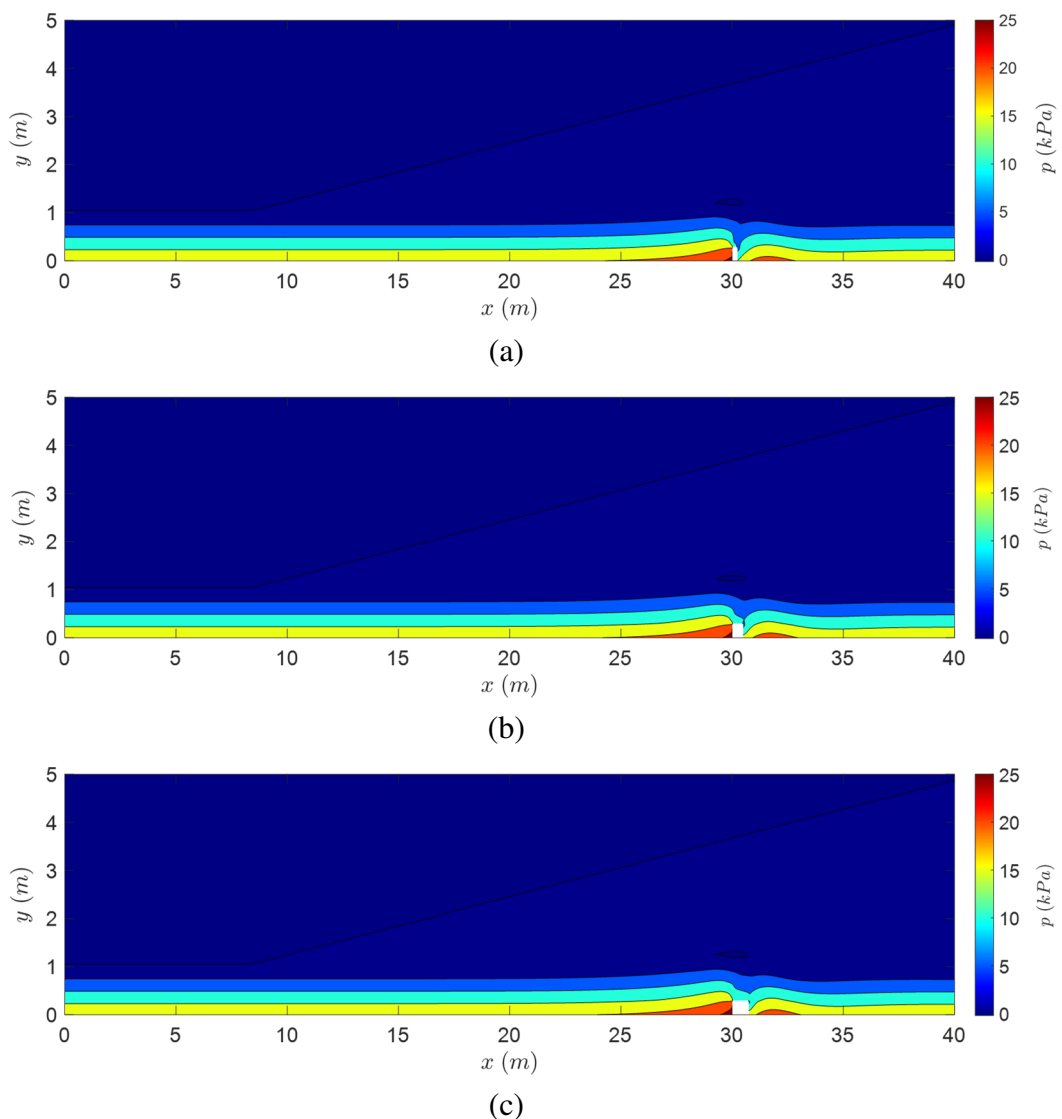
Figura A. 3: Campo de pressão para estudo do comportamento do escoamento, variando a altura do corpo sólido, com comprimento constante de $L_{CS} = 0,50$ m. (a) $H_{CS} = 0,25$ m. (b) $H_{CS} = 0,50$ m. (c) $H_{CS} = 0,75$ m.



Percebe-se um aumento significativo do campo de pressão na face esquerda do corpo sólido, já que se trabalha em escala de kPa, de acordo com o aumento na altura do mesmo. Enquanto que para um corpo sólido de altura de 0,25m a pressão atinge um valor máximo de 25 kPa à montante, para um corpo sólido de altura de 0,35m a pressão atinge um valor máximo de 35 kPa.

Finalmente a Figura A. 4 mostra o campo de pressão simulado para uma variação na largura do corpo sólido, com altura constante de $H_{CS} = 0,30$ m.:

Figura A. 4: Campo de pressão para estudo do comportamento do escoamento, variando o comprimento do corpo sólido, com altura constante de $H_{CS} = 0,30$ m. (a) $L_{CS} = 0,25$ m. (b) $L_{CS} = 0,50$ m. (c) $L_{CS} = 0,75$ m.



Verificam-se pressões menores e curvas de contorno mais lineares do que aquelas da figura anterior. Os campos de pressão também caracterizam e localizam a chamada zona morta: ao fundo do canal, onde os maiores gradientes de pressão são verificados.