



XXVIII CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM ESCOAMENTO LAMOSO DE SUPERFÍCIE LIVRE AGINDO SOBRE UM CORPO SÓLIDO SUBMERSO

William de Oliveira, williamoliveira0409@gmail.com
Guilherme Henrique Fiorot, guilherme.fiorot@ufrgs.br

Laboratório de Reologia e escoamento de Fluidos Não Newtonianos - ReoSul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Rua Sarmento Leite 425, Porto Alegre, RS, 90050-170.

Resumo. Movimentos de massa se configuram em riscos e alertas no que tangem a discussão sobre catástrofes naturais, sobretudo no Brasil. Regiões vulneráveis podem ser violentamente atingidas por corridas de lama e de detritos, por exemplo, e, quando vidas humanas estão no cerne desta problemática, a busca por soluções preventivas é inevitável. Visto que o escoamento de material lamoso arrasta material sólido e sedimentos, torna-se imprescindível conhecer a relação entre o escoamento e corpos sólidos submersos. 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 foi realizada em OpenFOAM, empregando o modelo VoF (volume de fluido) para configuração de escoamento de superfície livre, bidimensional, de um fluido Herschel-Bulkley. As configurações do fluido e do escoamento foram mantidas constantes enquanto as dimensões do corpo sólido, variadas. Assim, este trabalho inicialmente avaliou a dinâmica do escoamento incidente sobre o corpo sólido, mediante estudo dos campos de velocidade e pressão. Em seguida, estudou-se a magnitude das forças atuantes sobre o corpo sólido em função de sua dimensão característica. Funções de aproximação foram inseridas aos dados obtidos com o objetivo de prever as imposições trazidas ao obstáculo pelo escoamento e prever a capacidade de carregamento do escoamento.

Palavras chave: Corridas de lama. Fluido não newtoniano. Corpo sólido fixo. CFD. Herschel-Bulkley.

Abstract. Mass movements constitute risks and warnings regarding the discussion of natural catastrophes, especially in Brazil. Vulnerable regions can be violently hit by mud and debris flows, for example, and when human lives are at the heart of this problem, the search for preventive solutions is inevitable. Since the flow of muddy material drags solid material and sediments, it is essential to know the relationship between the flow and submerged solid bodies. 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 fix solid body. The computational simulation was performed in OpenFOAM, using the VOF (volume of fluid) model to configure the two-dimensional free surface flow of a Herschel-Bulkley fluid. The fluid and flow configurations were kept constant while the dimensions of the solid body were varied. Therefore, this work initially evaluated the dynamic of the incident flow over a solid body by studying the velocity and pressure fields. Then, it studied the forces magnitude acting on the solid body as a function of its characteristic dimension. Approximation functions were added to the obtained data with the objective of predicting the impositions brought to the obstacle by the flow and predicting the carrying capacity of the flow.

Keywords: Mud flow. Non-Newtonian fluid. Fixed solid body. CFD. Herschel-Bulkley.

1. INTRODUÇÃO

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 por mistura sólido-líquido em canal aberto de plano inclinado (Coussot and Meunier, 1996). Condições climáticas favoráveis aos movimentos de massa, como o volume e a intensidade de chuvas em uma determinada região, aumentam o risco de mobilização do solo (Kanji *et al.*, 2008). 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 movimentos de massa. Os efeitos catastróficos de eventos desta natureza 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 and Arduin, 2015). Neste contexto, o presente estudo teve por base, portanto, a avaliação dos esforços que seriam capazes de mobilizar um corpo sólido de diferentes dimensões.

1.1 Objetivos

De uma maneira geral, este trabalho buscou o entendimento da dinâmica do escoamento de um fluido lamoso sobre um corpo sólido submerso, mediante abordagem numérica. Mais especificamente, estudos cinemáticos e dinâmicos, aliados à inserção de um modelo reológico apropriado ao tipo de fluido, foram confrontados com a variação das características geométricas do corpo sólido. Para tanto, os campos de velocidade e pressão foram calculados numericamente, resolvendo as equações de conservação totais, bem como as forças impostas ao corpo pelo escoamento, durante o entendimento de cenários simulados com vistas à aplicação.

2. METODOLOGIA

2.1 Geometria

Para o entendimento do problema, avaliou-se um escoamento de superfície livre em canal aberto de plano inclinado, regido pela ação da aceleração gravitacional g , conforme apresenta a Fig. 1. O ângulo de inclinação do canal vale $\theta = 7^\circ$. O eixo cartesiano das ordenadas corresponde à y , enquanto o das abcissas, à x ; x^* é o eixo secundário, de mesma direção e sentido contrário em relação ao eixo horizontal, tendo sua origem posicionada na parede lateral esquerda do corpo sólido. O fluido escoante de massa específica ρ é do tipo Herschel-Bulkley e possui propriedades reológicas n , K e τ_0 , e representam, respectivamente, o índice de escoamento, o índice de consistência do escoamento e a tensão limite de escoamento. Em regime permanente e uniforme, o perfil de velocidade é dado por $u(y)$. 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.

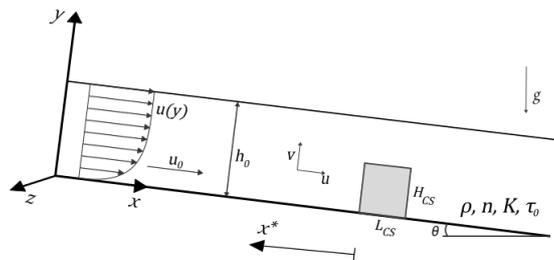


Figura 1: Representação esquemática do escoamento de superfície livre, incidindo sobre obstáculo

O escoamento em canal aberto foi tratado empregando-se a hipótese de águas rasas, negligenciando efeitos das paredes laterais. Nesse sentido, o fluido pode ser estudado como um filme de profundidade h_0 . Ademais, o problema compreende o escoamento de um fluido considerado homogêneo, uma mistura sem a distinção de partículas sólidas, e incompressível. O fundo do canal não apresenta porosidades ou qualquer irregularidade. O canal é infinitamente largo, o que implica na repetição da solução ao longo do eixo z e, também, na classificação do mesmo como sendo de domínio bidimensional.

2.2 Equacionamento

Neste trabalho o fluido tipo (lama) foi caracterizado pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley (HB), no qual a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, em condições de cisalhamento simples, pode ser dada conforme a Eq. (1):

$$\tau_{xy} = \tau_0 + K \left(\frac{du}{dy} \right)^n, \quad (1)$$

para $\tau_{xy} > \tau_0$, caso contrário a magnitude da taxa de deformação por cisalhamento (du/dy) é igual a zero.

Empregando tal modelo nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento linear bidimensional (Irgens, 2014; Fiorot and Maciel, 2019), aplicando-se também as hipóteses de simplificação, chegou-se às equações solução para o regime permanente e uniforme, utilizadas na validação do modelo numérico. O perfil de velocidade é dado pela Eq. (2):

$$u(y) = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\rho g y_0^{n+1} \sin \theta^{\frac{1}{n}}}{K} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{y}{y_0} \right)^{\frac{1}{n}+1} \right] \quad (2)$$

onde y_0 é a profundidade do escoamento na região cisalhada.

A velocidade de *plug*, dada pela Eq. (3), corresponde à região sem cisalhamento, ou seja, onde o perfil de velocidade

é constante ao longo do eixo y :

$$u_{y0} = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\rho g y_0^{n+1} \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

A velocidade média é dada pela Eq. (4)

$$u_0 = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\rho g y}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1+n+nC}{2n+1} \right) \quad (4)$$

sendo C a tensão de cisalhamento adimensional, como apresentada na Eq. (5):

$$C = \frac{\tau_0}{\rho g h_0 \sin \theta} \quad (5)$$

2.3 Definição do escoamento tipo

Para identificação dos parâmetros dinâmicos e reológicos do fenômeno estudado, o estudo do solo, o volume total de material deslocado e a geometria canal fornecem os dados necessários ao entendimento do problema. Nesse contexto, partiu-se de evento ocorrido na bacia de Acquabona, Itália (Berti *et al.*, 2000). 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 verificaram, para o escoamento, profundidades de até 2 metros, aproximadamente.

A composição granulométrica de material sólido para solos típicos deste tipo de evento, quando incorporada às misturas aquosas, fornece indicadores dos parâmetros reológicos associados. Conforme avaliado nos estudos de Berti *et al.* (2000), Coelho (2020) e Malet *et al.* (2003), tem-se a distribuição granulométrica organizada conforme apresenta a Fig. 2.

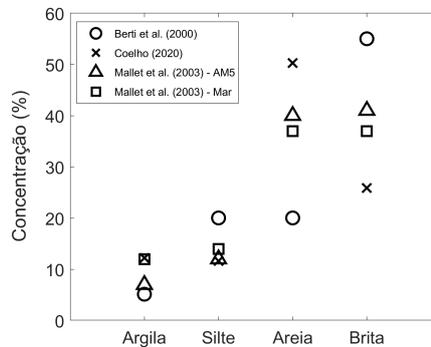


Figura 2: Granulometria e composição dos solos, conforme dados extraídos da literatura

Pode-se inferir que a granulometria desses solos é caracterizada por uma distribuição percentual bem definida de argila, silte, areia e brita. Neste tipo de composição, Malet *et al.* (2003) utilizam o modelo de Herschel-Bulkley para descrever a mistura. Além disso, Coussot (1994) também mostra que o comportamento de uma mistura sólido-líquido sem sedimentação da parcela sólida pode ser descrito pelo modelo reológico não-linear de HB. Assim, com base nesses casos, os parâmetros reológicos do fluido para o presente estudo foram assumidos como sendo: $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, $\tau_0 = 50 \text{ Pa}$, $K = 1000 \text{ Pa}^{-1}$ e $n = 0,30$.

A partir das propriedades reológicas estabelecidas, e empregando-se o equacionamento previamente desenvolvido, assumiu-se um movimento de massa contínuo e longo em bacia hidrográfica de altura $h_0 = 1 \text{ m}$ — o que permite identificar uma velocidade média equivalente a $u_0 = 3,14 \text{ m/s}$.

O número de Reynolds do escoamento, número adimensional que relaciona as forças inerciais às viscosas, calculado segundo Thompson and Soares (2016), é conforme a Eq. (6):

$$Re = \frac{8\rho u_0^2}{\tau_0 + K \left(2\frac{u_0}{h_0} \right)^n} \quad (6)$$

Para identificar a dinâmica do escoamento calculou-se o adimensional como sendo $Re = 88$. Como $Re \ll 2000$, o escoamento é laminar.

As forças impostas ao corpo sólido submerso podem ser viscosas, Eq. (7), ou de pressão, Eq. (8):

$$F_v = \sum_m s_{f,m} \cdot \mathbf{R}_{dev} \quad (7)$$

$$F_p = \sum_m \rho_m s_{f,m} (p_m - p_{ref}) \quad (8)$$

onde s_{fm} é o vetor de área de face, \mathbf{R}_{dev} o tensor de tensão Deviatórico¹, m o índice de face e p_{ref} a pressão de referência ou manométrica.

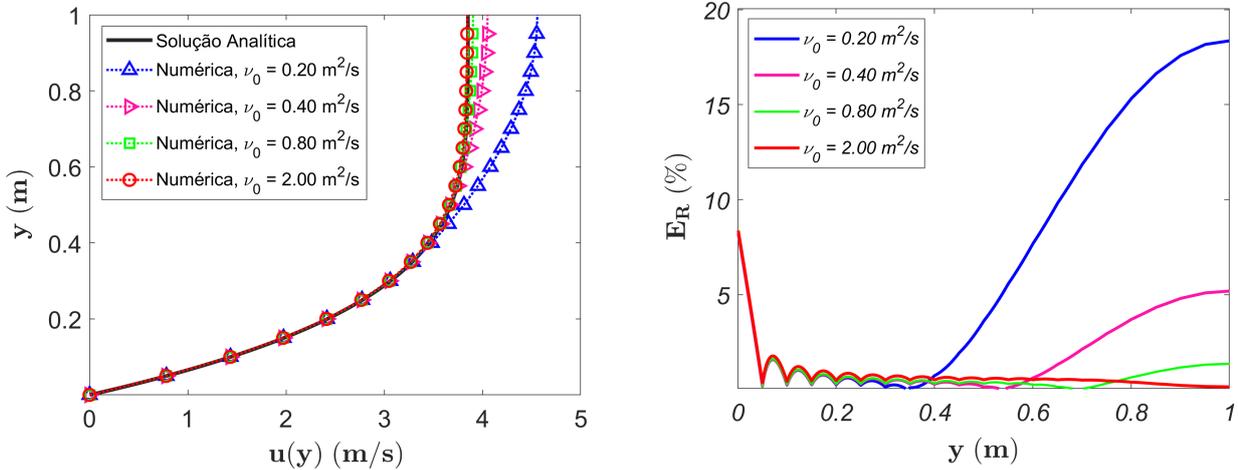
2.4 Modelo Reológico Numérico

Para resolução numérica de um problema envolvendo um fluido HB, é necessário que a descontinuidade existente no modelo matemático seja adaptada numericamente. Nguyen *et al.* (2006) propõem um modelo bivisco, que emprega a linearização através um modelo newtoniano para baixas taxas de deformação conforme mostra a Eq. (9):

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0, & \text{se } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0 \\ \nu &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \right), & \text{se } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \end{aligned} \quad (9)$$

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.

A Figura 3 traz a comparação entre as soluções numérica e analítica sob diferentes valores assumidos pela viscosidade aparente, para um escoamento em regime permanente e uniforme na ausência de obstáculo. Ao aproximar-se da região pistonada, o perfil de velocidade se estrutura em função da viscosidade aparente, como mostra a Fig. 3a. Já a Figura 3b apresenta o erro relativo referente a cada ν_0 adotado. Os perfis de velocidade simulados apresentam todos o mesmo comportamento a uma altura de 40% da profundidade total do escoamento, aproximadamente. 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 $2,00 \text{ m}^2/\text{s}$ — este último sendo o valor utilizado na simulação por apresentar menor E_R .



(a) Perfis de velocidade em relação à profundidade do escoamento

(b) E_R em relação à profundidade do escoamento

Figura 3: Comparação entre as soluções numérica e analítica para diferentes valores de ν_0

2.5 Malha e Condições de Contorno

A malha numérica utilizada é apresentada na Fig. 4a. 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 Figura 4b e a Tabela 1 identificam as condições de contorno relacionadas às respectivas localizações geométricas no domínio. 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 $h_0 = 1 \text{ m}$. Consequentemente, as dimensões geométricas são $L_x = 40 \text{ m}$, $L_y = 20$

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

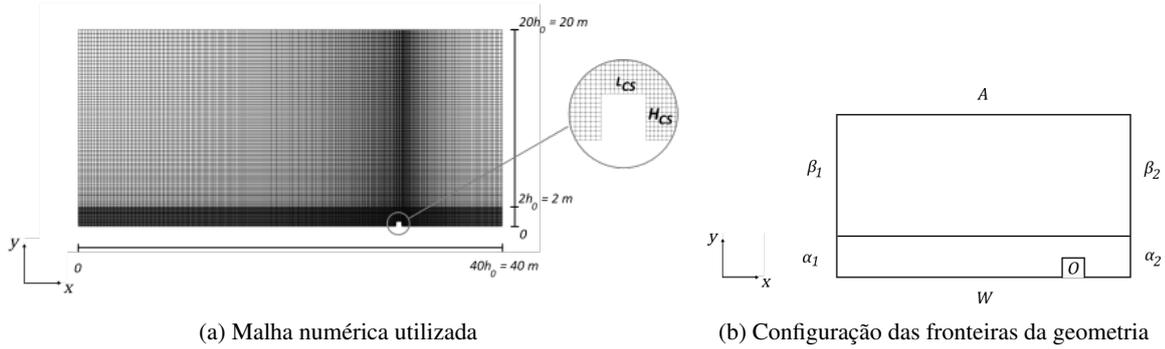


Figura 4: Comparação entre as soluções numérica e analítica para diferentes valores de ν_0

m e $L_z = 1$ m. Nas faces frontal (x, y e $z = 0$) e anterior (x, y e $z = L_z$) do domínio tridimensional, as equações não são resolvidas pelo software.

Tabela 1: Condições de contorno de acordo com os limites geométricos

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

*, **, ***: Fluxo igual a zero se o fluxo é em sentido positivo

e valor prescrito igual a zero para o caso de escoamento em sentido negativo

À 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* 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.

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos na simulação do problema estudado. A pressão e a velocidade foram avaliadas conforme a proximidade com o bloco, em função dos diferentes valores da altura H_{CS} . Nestes casos, o comprimento foi mantido constante, com valor $L_{CS} = 0,5$ m. Por fim, apontam-se as solicitações ao corpo sólido (forças de pressão e viscosas) com suas respectivas funções de aproximação em relação a cada variação (altura e comprimento) na geometria do mesmo. A Figura 5 apresenta os perfis de velocidade 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. Re tem dimensão característica em função da altura do obstáculo.

Para distâncias de $x^* \geq 10$ m, os perfis de velocidade permanecem praticamente inalterados e são semelhantes ao perfil exato de solução teórica quando da ausência de obstáculo (Eq. (2)). Verifica-se que o escoamento ainda não percebe qualquer bloqueio à montante. Já para distâncias menores ($x^* < 10$ m), o escoamento se adapta de diferentes formas ao

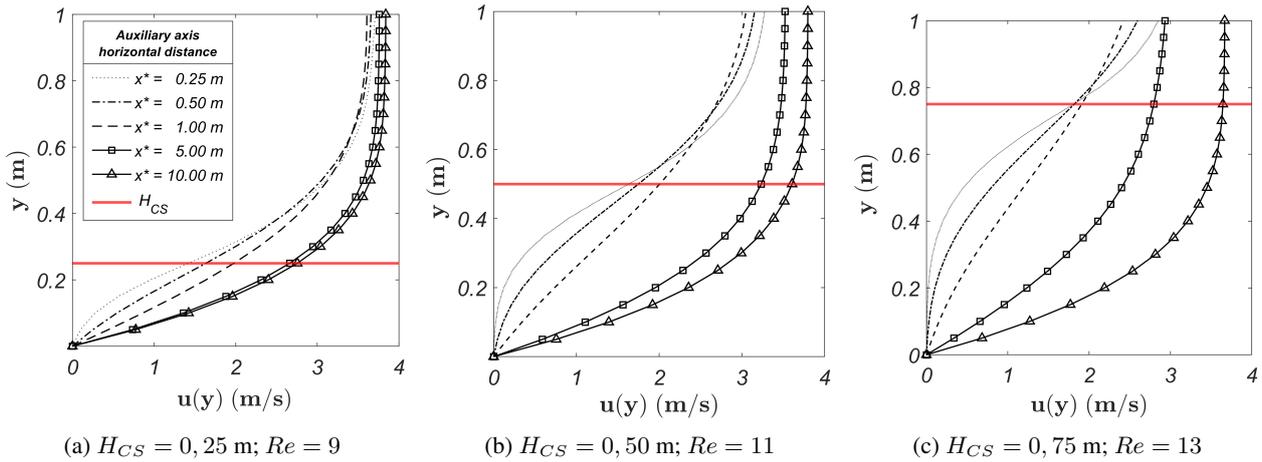


Figura 5: $u(y)$ em relação às três alturas de H_{CS} adotadas

se aproximar do objeto. Nos gráficos das Figuras 5a, 5b e 5c verifica-se que, para regiões mais próximas do obstáculo ($x^* \leq 0,5$ m) e inferiores à altura do mesmo ($y \leq H_{CS}$), as curvas dos perfis de velocidade apresentam magnitudes tendendo a zero ou muito baixas — ocorrendo de forma mais acentuada quando $H_{CS} = 0,75$ m. Cabe ressaltar o surgimento de região com velocidade nula nas adjacências do obstáculo, zona na qual o fluido estaria sem movimento e com baixa taxa de deformação, efeito da tensão limite de escoamento. Essa porção é tanto maior quanto H_{CS} .

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, o campo de velocidade e pressão (dinâmica e hidrostática), em simulação utilizando um comprimento de $L_{CS} = 0,50$ m e altura de $H_{CS} = 0,75$ m. O campo de velocidade é uniforme na fronteira esquerda do domínio, visto a presença de isolinhas horizontais. Em aproximadamente $x = 14$ m o campo de velocidade começa a apresentar modificações, indicando que o escoamento começa a perceber a presença do obstáculo. Nas adjacências do corpo, à montante, o fluido sofre redução de velocidade e, ao ultrapassá-lo, vencendo a obstrução imposta, apresenta as maiores velocidades encontradas. Na parede inferior do domínio, bem como nas fronteiras do obstáculo, percebem-se regiões de velocidade zero e taxas de deformação que tendem a zero. Essa região recebe o nome na literatura de zona morta (Tiberghien *et al.*, 2007), e surge da combinação da condição de não deslizamento aliada à tensão limite de escoamento e baixas solicitações por parte do escoamento. Percebe-se que tal região é maior nas adjacências das fronteiras com o obstáculo. O campo de pressão apresentado considera a pressão total, ou seja, a soma das parcelas de pressões dinâmica e hidrostática. São indicadas maiores magnitudes junto à lateral esquerda do bloco, com valor máximo da ordem de $p = 35$ kPa. Após a análise das pressões, verificou-se a importância da captação de dados referentes às forças atuantes no corpo sólido.

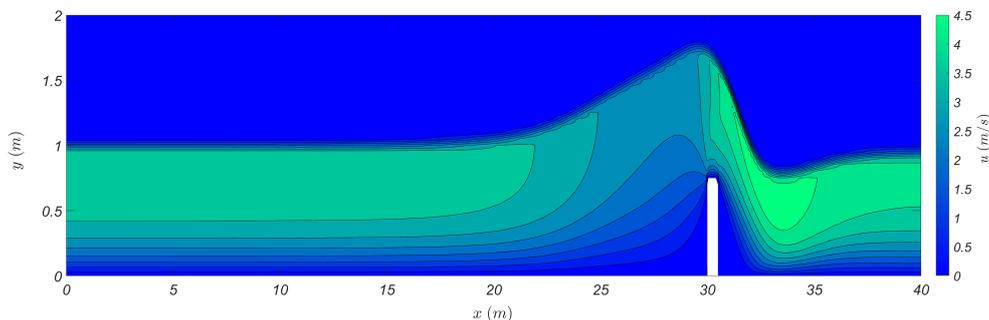


Figura 6: Campo de velocidade para estudo do comportamento do escoamento, com $H_{CS} = 0,75$ m

As Figuras 8 e 9 correspondem às solicitações dinâmicas experimentadas pelo corpo sólido, em virtude do escoamento lamoso que o encobre. Pode ser observado que, de maneira geral, maiores dimensões características da estrutura implicam em maiores forças experimentadas pela mesma. Cabe salientar que na Figura 8a existe um ponto de inflexão na função aproximada de segundo grau, ocorrendo quando $H_{CS} = 0,3$ m. Esta dimensão foi mantida fixa para as análises com variações de L_{CS} , Fig. 8b e Fig. 9b, visto corresponder 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).

Na Figura 9 também é verificado o mesmo comportamento dos esforços vistos na Fig. 8 de acordo com cada dimensão da estrutura. Existe, entre as duas figuras, uma diferença na função de aproximação: a Fig. 9a usa uma equação quadrática, enquanto que a Fig. 9b, uma função linear.

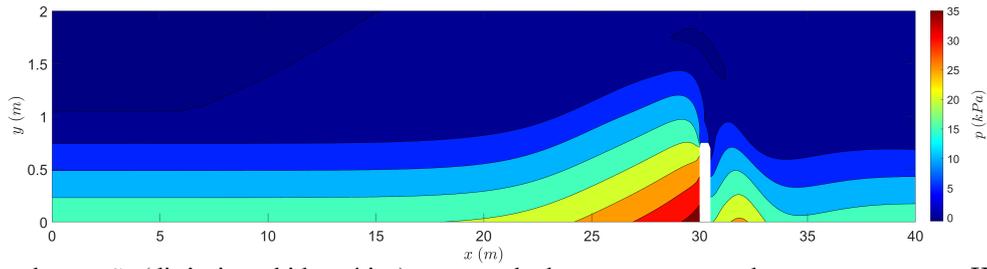


Figura 7: Campo de pressão (dinâmica + hidrostática) para estudo do comportamento do escoamento, com $H_{CS} = 0,75m$

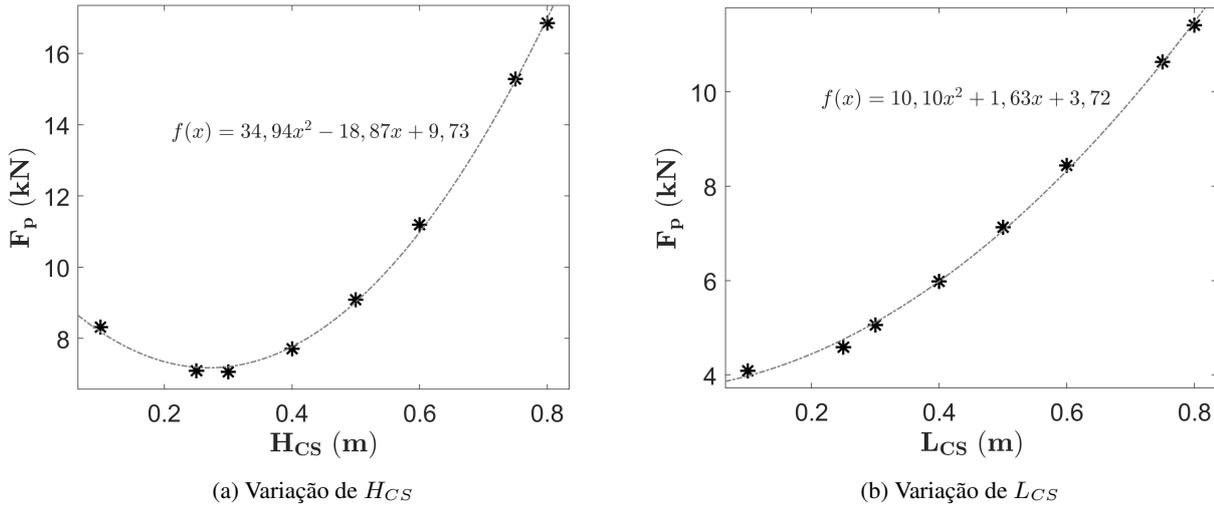


Figura 8: Forças de pressão para os diferentes parâmetros geométricos

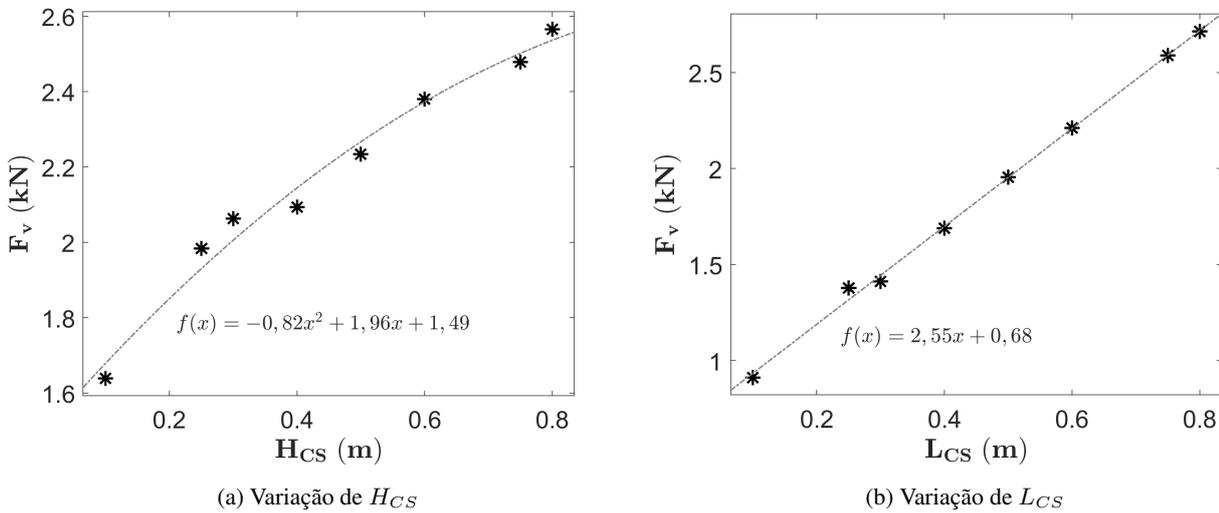


Figura 9: Forças viscosas para os diferentes parâmetros geométricos

4. CONCLUSÃO

Através do estudo numérico com evento de corrida de lama simulado em um plano inclinado, incidente sobre um corpo sólido, pôde-se compreender o comportamento do fluido à proporção em que se aproxima do obstáculo à jusante. Os perfis de velocidade sofreram sensível modificação para estruturas de maior altura e uma região conhecida como zona morta surge com maior protuberância. Tal região se desenvolveu tanto à jusante quanto à montante do obstáculo. Maiores pressões foram observadas junto à face esquerda do bloco. A avaliação das forças mostrou que a magnitude das mesmas é proporcional à dimensão característica do obstáculo: de maneira geral, quanto maior H_{CS} ou L_{CS} , maior a força observada na simulação.

Como o presente estudo discorre sobre a dinâmica de um fluido não newtoniano, uma pergunta que surge é sobre os possíveis efeitos adicionais de tal escoamento quando se avalia comparativamente o comportamento de um fluido newtoniano equivalente sob as mesmas características geométricas do canal e do corpo sólido. Dado que o fluido não newtoniano viscoplástico apresenta efeitos viscosos distintos (como não-linearidade e zonas mortas), torna-se assim relevante a comparação dos parâmetros resultantes para os dois tipos de fluido, numa tentativa de apontar critérios de projeto e previsão de eventos desta natureza com maior acurácia.

5. REFERÊNCIAS

- Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A. and Tecca, P.R., 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*, Vol. 25, No. 9, pp. 707–715. ISSN 14641909. doi:10.1016/S1464-1909(00)00090-3.
- Chen, M., Tang, C., Zhang, X., Xiong, J., Chang, M., Shi, Q., Wang, F. and Li, M., 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*, Vol. 293, No. October 2020, p. 106319. ISSN 00137952. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106319. URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106319>.
- Coelho, R.D., 2020. *Caracterização das propriedades físicas do solo e a instabilidade das encostas na Serra do Mar (Itaóca - SP)*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.8.2020.tde-29092020-183051. URL <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-29092020-183051/>.
- Coussot, P., 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*, Vol. 32, No. 4, pp. 535–559. ISSN 00221686. doi:10.1080/00221686.1994.9728354.
- Coussot, P. and Meunier, M., 1996. “Recognition, classification and mechanical description of debris flows”. *Earth-Science Reviews*, Vol. 40, No. 3-4, pp. 209–227. ISSN 00128252. doi:10.1016/0012-8252(95)00065-8.
- Fernández, D.S., Baumann, V. and Carrizo, N., 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*, Vol. 106, No. November 2020. ISSN 08959811. doi:10.1016/j.jsames.2020.103086.
- Fiorot, G.H. and Maciel, G.d.F., 2019. “Free-surface laminar flow of a Herschel–Bulkley fluid over an inclined porous bed”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 272, No. April, p. 104164. ISSN 03770257. doi:10.1016/j.jnnfm.2019.104164. URL <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.104164>.
- Gramani, M.F. and Arduin, D.H., 2015. “Morfologia da drenagem e dos depósitos de debris flow em Itaóca, São Paulo”. *15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, Vol. -, No. 11, pp. 1–10.
- Irgens, F., 2014. *Rheology and non-Newtonian Fluids*. Springer Netherlands, Trondheim, Norway. ISBN 9783319010526.
- Kanji, M.A., Cruz, P.T. and Massad, F., 2008. “Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil”. *Landslides*, Vol. 5, No. 1, pp. 71–82. ISSN 1612-510X. doi:10.1007/s10346-007-0110-3. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10346-007-0110-3>.
- Malet, J.P., Remaître, A., Maquaire, O., Ancey, C. and Local, J., 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*, Vol. 1, No. January, pp. 351–362.
- Nguyen, V.H., Rémond, S., Gallias, J.L., Bigas, J.P. and Muller, P., 2006. “Flow of Herschel-Bulkley fluids through the Marsh cone”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 139, No. 1-2, pp. 128–134. ISSN 03770257. doi:10.1016/j.jnnfm.2006.07.009.
- Thompson, R.L. and Soares, E.J., 2016. “Viscoplastic dimensionless numbers”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 238, No. December, pp. 57–64. ISSN 03770257. doi:10.1016/j.jnnfm.2016.05.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2016.05.001>.
- Tiberghien, D., Laigle, D., Naaim, M., Thibert, E. and Ousset, F., 2007. “Experimental investigations of interaction between mudflow and an obstacle”. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings*, Vol. -, No. January, pp. 281–292.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.