

MEDIÇÃO DE INSTABILIDADES NA SUPERFÍCIE LIVRE DE ESCOAMENTOS LAMOSOS

Fabiana de Oliveira Ferreira, Geraldo de Freitas Maciel, Evandro Fernandes da Cunha,
Vicente de P.G. Junior e Caio Von Zuben Peres

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP – Univ Estadual Paulista; Universidade Federal de São Paulo (Unifesp),
Campus de Diadema - Departamento de Física, Brasil.

E-mail: fabiana.of@gmail.com, maciel@dec.feis.unesp.br, evandrofernandesc@gmail.com,
vicenteeng.unesp@gmail.com, caiovonzuben@gmail.com

Introdução

A ocorrência de instabilidades em escoamentos é de grande interesse no ramo das engenharias com finalidades industriais ou ambientais. Quando se trata de escoamentos de fluidos altamente viscosos, seja com propriedades newtonianas ou não-newtonianas, como o caso dos escoamentos lamosos, estes exigem mais atenção, pois as propriedades do fluido influenciam na dinâmica do escoamento. Sabe-se que neste tipo de escoamento, em condições favoráveis, instabilidades denominadas *roll waves* podem surgir (Ng e Mei, 1994, Coussot, 1994, Maciel *et al.*, 2013).

O surgimento destas ondas é proveniente de perturbações no escoamento que, conforme análises matemáticas e numéricas realizadas por Ferreira (2013) e Maciel *et al.* (2013), mostram que além da condição de geometria do canal e dinâmica do escoamento, existe um domínio de frequências de perturbação ou frequência limite (também dependente das propriedades reológicas do fluido), aquém da qual perturbações presentes no escoamento evoluem na direção das *roll waves*. *Roll waves* em fluidos newtonianos (como a água) se propagam com velocidades elevadas, já em fluidos não-newtonianos com velocidades mais moderadas, como ondas longas e de grandes amplitudes, com capacidade de submersão (ou engolimento) pronunciada, o que pode potencializar os danos causados quando presentes em deslizamentos de terra ou corridas de lamas. É importante destacar que o tratamento da natureza de fluidos presentes neste tipo de evento exige cuidado, pois há necessidade de se identificar e qualificar a parcela sólida da mistura e a própria mistura (coesiva/não coesiva, por exemplo) assim como, e sobretudo, quantificar as correlações existentes entre tensões aplicadas no escoamento com as taxas de deformação decorrentes, ou seja, a reologia do material em escoamento, que apresenta uma certa complexidade. Matematicamente, as principais características das *roll waves*, tais como, comprimento, amplitude e velocidade de propagação têm sido estimadas tanto para fluidos newtonianos quanto não-newtonianos. Em se tratando de aferições de *roll waves* em escoamentos de fluidos não-newtonianos, ensaios têm sido realizados para fluidos binghamianos (Tamburrino e Lhle, 2013; Aranda *et al.* 2016), no entanto, os dados experimentais, ainda são escassos.

Neste contexto, o grupo RMVP - Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos da Unesp de Ilha Solteira tem trabalhado tanto com fluidos newtonianos altamente viscosos, como por exemplo, a glicerina pura, utilizada por Fiorot (2012) para a aferição de *roll waves* em escoamentos laminares quanto em fluidos não-newtonianos.

Em casos não-newtonianos, trabalhos têm sido desenvolvidos com fluidos representados pelo modelo reológico de Herschel Bulkley. Maciel *et al.* (2009), utilizando concentrações argilosas, realizaram testes para diferentes concentrações em volume (C_v) e observaram que para $5\% < C_v < 25\%$ a mistura é caracterizada como fluido de Herschel Bulkley. Minussi *et al.* (2012) utilizaram o gel de carbopol 940 como material representativo (reometricamente) de lama em trabalhos

experimentais e numéricos de ruptura de barragem e caracterizaram a solução também como do tipo Herschel Bulkley. Recentemente, as *roll waves* foram aferidas utilizando-se como fluido teste o gel de Carbopol (Maciel *et al.*, 2017) em uma rampa com 3 metros de comprimento. A aquisição das instabilidades geradas foi feita por sensores não intrusivos (ultrassom), o que se mostrou necessário devido à pequena lâmina (filmes finos) produzida. Através deste aparato experimental, com o canal em condições favoráveis, foi possível verificar a presença do fenômeno e a boa concordância entre as perturbações impostas e as instabilidades geradas.

No âmbito experimental, testes que visavam a geração e medição dessas instabilidades em superfície livre, utilizando fluidos de reologia não newtoniana como soluções lamosas (água+argila) ainda não foram realizados. Pensando na temática de riscos e catástrofes naturais, ensaios, inicialmente com soluções argilosas, e depois com inclusão de areia de granulometria estendida, deverão ser realizados, já que se aproximam mais dos escoamentos na natureza, seja quando do rompimento de barragens, ou corridas de lama (*mudflows*) propriamente ditas. A partir desta perspectiva é que serão confeccionadas as lamas para a realização de ensaios com a presença de *roll waves*.

Neste trabalho propõe-se a aferição da superfície livre de misturas água+argila caulínica, com condições favoráveis de geração e propagação de *roll waves*, em uma rampa de 8 metros de comprimento, utilizando-se sensores ultrassônicos, tendo como fonte de perturbação um fluxo de ar emitido por um alto-falante, locado a montante do escoamento. Os resultados destes ensaios serão confrontados com modelos matemáticos e numéricos.

Materiais e métodos

Para verificar a geração e propagação de instabilidades, o escoamento deve evoluir em condições favoráveis de geometria e dinâmica (Ferreira, 2013), e uma perturbação deve ser imposta ao mesmo. Neste trabalho a imposição da perturbação é realizada através da associação de um gerador de sinais, amplificador e alto-falante que emite uma lâmina de ar ao abrir e fechar de uma membrana interna do próprio alto-falante, perturbando o escoamento de forma controlada. Para aferir a amplitude dessas instabilidades é utilizado ultrassom em modo pulso eco, conforme detalhado em Cunha (2012).

Aparato experimental

O aparato experimental é constituído de equipamentos necessários para a caracterização reométrica e para os ensaios do escoamento em canal (Figura 1). Para o ensaio reométrico é utilizado o reômetro R/S Brookfield do tipo cilindros coaxiais, equipamento que pode ser utilizado de duas formas de trabalho: controlando a tensão de cisalhamento e medindo a taxa de deformação (CSS – *controlled shear stress*) ou controlando a taxa de deformação e medindo a tensão de cisalhamento (CSR – *controlled shear rate*).

O canal onde ocorre o escoamento do fluido teste foi confeccionado de forma que se pudesse incliná-lo até 30 graus.

O fluido circula no canal através de um sistema fechado, impulsionado por uma bomba de descolamento positivo WEATHERFORD modelo HF-80L, com pressão de recalque de 6 kgf/cm² própria para fluidos de elevada massa específica (hiperconcentrados, lamosos), com vazão constante, regulada por um inversor de frequência WEG modelo CW09.

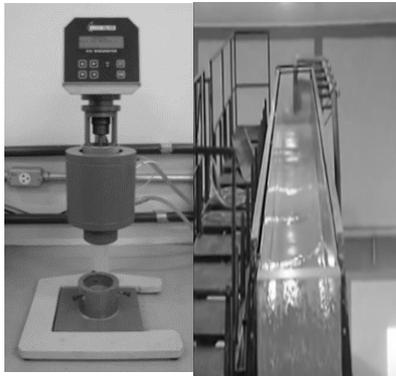


Figura 1.- Reômetro R/S Brookfield e Canal de Escoamento.

Caracterização do fluido teste: mistura argilosa

Neste trabalho o fluido teste (mistura água+argila caulínica) já foi confeccionado e caracterizado para uma concentração em volume C_v de 25%. Com as análises reológicas feitas, pôde-se observar que o fluido teste é pseudoplástico ($n < 1$), ou seja, a viscosidade aparente do fluido diminui com o aumento da taxa de deformação. Os ensaios reométricos apontaram para um fluido de características de Herschel Bulkley (Eq. 1), sendo os parâmetros dados por: $K_n = 5.76 [Pa \cdot s^n]$, $\tau_c = 10.89 [Pa]$, $n = 0.29$ com massa específica $\rho = 1403,5 [kg/m^3]$.

$$\begin{cases} \tau = \tau_c + K_n \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^n, & \tau > \tau_c \\ \frac{\partial u}{\partial z} = 0, & \tau < \tau_c \end{cases} \quad [1]$$

Com: τ a tensão de cisalhamento, $\partial u / \partial z$ o gradiente de velocidade ou taxa de deformação, τ_c a tensão limite de escoamento ou crítica, K_n o índice de consistência do fluido e n o índice de escoamento do fluido.

Considerações finais

A reologia de Herschel-Bulkley tem-se mostrado, conforme a literatura, representativa do material presente nas corridas de lama e eventos similares, simulados nesta pesquisa através de misturas argilosas. Para efeito de visualização e comparação com resultados de modelos matemáticos e numéricos, os eventos com fluidos não-newtonianos estão em fase de ensaio e exploração, onde já se pode verificar a geração de instabilidades que se propagam em forma de trem de ondas (*roll waves*) bem estabilizados dentro dos domínios estabelecidos pelo modelo matemático. Ademais, já se pôde observar também que a presença de *roll waves* está condizente com os critérios de geração apontados por Maciel et al (2013) e Ferreira (2013), quais sejam; número de Froude superior a um Froude crítico e frequência de perturbação abaixo da frequência limite de geração (frequência de corte).

Referências bibliográficas

Aranda, A., Amigo, N., Ihle, C., and Tamburrino, A. (2016). "Digital image correlation applied to the calculation of the out-of-plane deformation in ducted by the formation of roll waves in a non-Newtonian fluid". Opt. Eng., 55(6), 064101.

Cunha, E. F. (2013). *Implementação de aparato experimental para medição de instabilidades tipo roll waves em fluidos não-newtonianos*. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- Unesp, Ilha Solteira.

Coussot, P. (1994). "Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 32, n. 4, p. 535-559.

Fiorot, G. H. (2012). *Mitigação de riscos e catástrofes naturais: análise numérico-experimental de roll waves evoluindo em canais inclinados*. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- Unesp, Ilha Solteira.

Ferreira, F. O. (2013). *Estabilidade e controle dinâmico de roll waves*, 204 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- Unesp, Ilha Solteira

Leite, L. O. B. (2009). *Determinação física e numérica de corridas de lama em escoamentos resultantes de ruptura de barreira retendo material viscoplástico*, 185 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

Lachamp, P. (2003). *Modélisation numérique de l'effet d'un obstacle sur les écoulements de fluides à seuil par la méthode SPH*, 231 f. Tese (Doutorado) - Université Joseph Fourier-Grenoble 1, Grenoble.

Maciel G. F.; Santos H. K.; Ferreira F. O. (2009). "Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals". *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 64-74.

Maciel G. F.; Ferreira F. O.; Fiorot, G. H. (2013). "Control of instabilities in non-newtonian free surface fluid flows". *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Rio de Janeiro, v. 35, n. 3, p. 217 - 229.

Maciel, G. F. ; Ferreira, F. O. ; Cunha, E. F. ; Fiorot, G.H. (2017). Experimental Apparatus for Roll Wave Measurements and Comparison with a 1D Mathematical Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 143, p. 04017046-1-04017046-10.

Minussi, R. B.; Maciel, G. F. (2012). "Numerical experimental comparison of dam break flows with non-Newtonian fluids". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 34, p. 167-178.

Ng, C. O.; Mei C. C. (1994). "Roll waves on a layer of fluid mud modelled as a power law fluid. *Journal of Fluid Mechanics*". Cambridge, v. 263, p. 151-184.

Tamburrino, A., and Ihle, C. F. (2013). "Roll wave appearance in bentonite 534 suspensions flowing down inclined planes." *J. Hydraul. Res.*, 51(3), 535 330-335.