

# VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE UM ESCOAMENTO DE FLUIDO NÃO-NEWTONIANO NO ÂMBITO DE CORRIDAS DE LAMAS

Yuri Taglieri Sao, João Batista Pereira, Renan Serralvo Campos e Geraldo de Freitas Maciel

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Univ Estadual Paulista, Brasil.

E-mail: yuri.taglieri27@gmail.com, jbpereira.eng@gmail.com, serralvo.renan@gmail.com, maciel@dec.feis.unesp.br

## Introdução

O conhecimento acerca da dinâmica das corridas de lama é fundamental para a melhor compreensão e previsão dos possíveis efeitos danosos deste fenômeno natural. Em se tratando de lamas, o escoamento é dependente das suas propriedades reológicas, estas podendo ser modeladas de maneiras mais simplistas ou mais complexas. A existência de modelos simplistas permite detectar o comportamento característico destas corridas de lama; entretanto, vale ressaltar que as ferramentas de hidráulica clássica seriam inadequadas na representação das características peculiares deste tipo de fluido. Desta forma, recorre-se ao uso dos modelos mais complexos, ditos não-Newtonianos, melhor representativos para o caso da lama, cujas características reológicas se adequam ao modelo Herschel-Bulkley (Maciel *et al.*, 2009).

As avaliações dos escoamentos lamosos, considerando a influência da reologia complexa deste tipo de fluido, permite mais subsídios para o entendimento do fenômeno e tomada de decisões. Frente a isso, a caracterização precisa dos parâmetros reológicos, que compõem o modelo representativo do fluido escoante, se mostra determinante para a boa análise do fenômeno em questão. Tal caracterização requer ferramentas de aferição da reologia do fluido, seja a partir de equipamentos robustos (reômetros), como citado por Wallevik e Wallevik (2011), seja por técnicas simples e empíricas (Pashias, 1996), destacando-se o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*). Os parâmetros reológicos aferidos são uma das condições iniciais para outro tipo de ferramenta de análise de escoamentos: as simulações numéricas, as quais são importantes para a validação de modelos experimentais, bem como, quando bem calibradas, para a previsão de fenômenos envolvendo fluidos.

Visto a importância das simulações numéricas, este trabalho visa a confrontação de um modelo numérico, implementado pelo software ANSYS *Fluent 14.5*, com um ensaio experimental do *slump test*, realizado a partir de um aparato automatizado, de um fluido lamoso. Ademais, busca-se a validar o modelo numérico através do modelo experimental, seja em regime permanente (*slump* propriamente dito), seja na fase de desenvolvimento do escoamento ao longo do tempo – regime transiente.

## Metodologia

### 1.1. Modelo Numérico

A simulação numérica do *slump test* foi feita através do software ANSYS *Fluent 14.5* aplicando o método dos volumes finitos para resolução das equações de conservação. O modelo reológico considerado é o modelo de Herschel-Bulkley a três parâmetros – tensão limite de escoamento  $\tau_c$ , índice de consistência  $K_n$  e índice de escoamento  $n$  – sendo implementado pelo código numérico com a seguinte função (Fluent 14.5 User's Guide, 2012):

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}} + K_n \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}\right)^{n-1}, & \text{para } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \\ \tau_c \frac{(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c})}{\dot{\gamma}_c} + K_n \left[ (2 - n) + (n - 1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right], & \text{para } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad [1]$$

Sendo  $\eta$  a viscosidade aparente,  $\dot{\gamma}$  a taxa de deformação e  $\dot{\gamma}_c$  a taxa de deformação crítica.

A garantia da continuidade da função da viscosidade aparente no modelo numérico depende fortemente da taxa de deformação crítica, parâmetro este essencial para o sucesso ou insucesso da simulação numérica de fluidos não-Newtonianos com modelo reológico de Herschel-Bulkley; adota-se um valor de  $\dot{\gamma}_c$  baixo o suficiente para simular adequadamente o modelo de Herschel-Bulkley, porém alto o suficiente para que não haja instabilidades numéricas (Gao, 2015).

A presença de uma interface entre o fluido teste e o ar requer um modelo de rastreamento de fronteiras para a captura desta interface no código numérico. O ANSYS *Fluent 14.5* utiliza o modelo *VoF (Volume of Fluid)* para a detecção desta interface, considerando um fluido imiscível ao outro (Brito, 2010).

### 1.2. Simulação numérica do *slump test*

A axissimetria do caso *slump test* possibilita a simulação ser bidimensional (2D). A Figura 1 mostra a projeção do cone de Abrams e seu respectivo domínio computacional, subtraído de regiões onde não há escoamento do fluido teste, bem como as condições de contorno do problema. O domínio foi discretizado espacialmente em 60383 elementos retangulares de dimensões 1mm x 1mm. Os passos de tempo utilizados foram de 0,0005s, mantendo a *CFL condition* (condição de Courant-Friedrichs-Lewy) sempre menor que 0,25 para se garantir a estabilidade da simulação numérica.

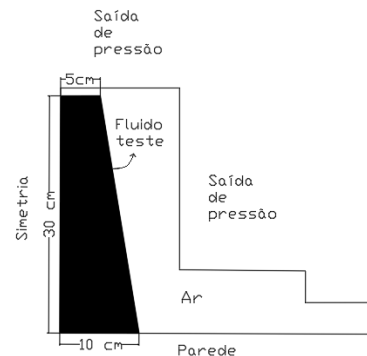


Figura 1.- Geometria e condições de contorno.

### 1.3. Procedimentos Experimentais

A fim de confrontar os resultados obtidos a partir da simulação numérica do *slump test*, ensaios experimentais de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67:1998) foram conduzidos com lamas produzidas a partir da mistura manual de argila e água deionizada. A concentração volumétrica ( $C_v$ ) de argila foi 30%.

As medidas de *slump* (abatimento) foram obtidas a partir do equipamento automatizado de *slump test*, de forma a garantir maior rigor na realização do ensaio e obtenção de tais medidas. Tal equipamento, ilustrado na Figura 2, faz uso de um sistema pneumático (a) e de medição por sensor a laser (b) cujas finalidades são, respectivamente, levantar o cone de Abrams (c) de forma controlada e medir o abatimento ao longo do ensaio, medidas as quais são captadas por um sistema de aquisição (d). Para mais informações do equipamento desenvolvido pelos pesquisadores, ver (Pereira *et al.*, 2016).

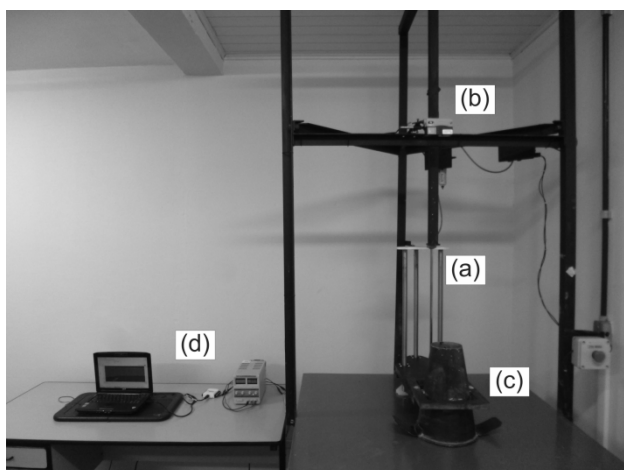


Figura 2.- Aparato experimental de slump test.

Simultaneamente aos ensaios de slump test automatizado, realizou-se, por meio do reômetro Brookfield R/S com sistema de medição Vane 40/20, a caracterização reológica da lama avaliada, obtendo o modelo de Herschel-Bulkley (a três parâmetros) como o mais adequado para descrever o seu comportamento de escoamento.

Para avaliar a repetibilidade da medida de slump e do comportamento reológico da lama, oito testes foram realizados para cada uma das avaliações executadas. A Tabela 1 apresenta, em termos médios, os parâmetros reológicos obtidos, taxa de deformação crítica adotada e informações de massa específica ( $\rho$ ) – como condições iniciais para a simulação numérica – e medida de slump da lama avaliada.

Tabela 1.- Parâmetros referentes à argila avaliada.

$\tau_c$ [Pa]	$K_n$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	$n$ [-]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$C_v$ [%]	Slump [mm]
96,55	7,46	0,55	1491,20	0,05	30,00	244,99

## Resultados e discussão

A Figura 3 ilustra os contornos numéricos nos tempos demarcados, mostrando a evolução da descida do material ao longo do tempo até atingir o regime permanente. A Figura 4 traz a confrontação numérico-experimental do slump ao longo do tempo.

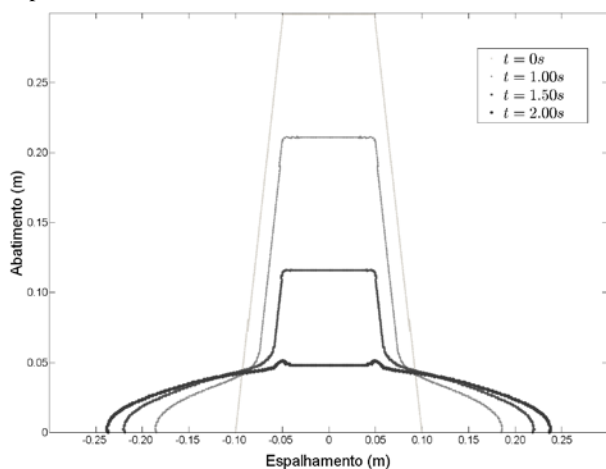


Figura 3.- Contornos numéricos nos respectivos tempos definidos.

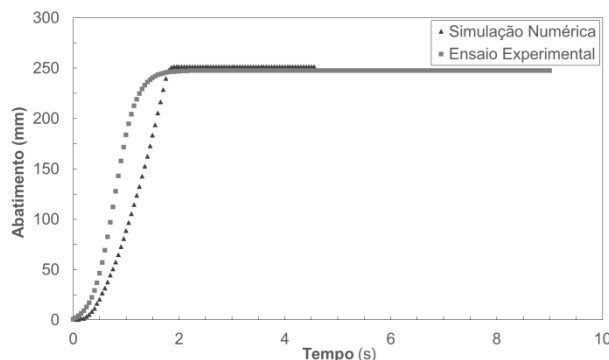


Figura 4.- Confrontação numérico-experimental do desenvolvimento do slump (abatimento) pelo tempo.

Vale ressaltar que a Figura 4 expõe o mesmo comportamento da descida do material (slump) ao longo do tempo, ainda que se perceba um ligeiro afastamento antes de se atingir o regime permanente ( $t \rightarrow \infty$ ). Em regime permanente (patamar horizontal), verifica-se uma diferença de aproximadamente 6mm entre os resultados numérico e experimental, o que representa um erro percentual na ordem de 2%.

## Conclusão

Os resultados expostos demonstram uma concordância aceitável do modelo numérico, do ponto de vista de engenharia, simulando um fluido de reologia não-Newtoniana do tipo Herschel-Bulkley, quando confrontado com os ensaios experimentais em aparato automatizado. Mesmo que se tenha observado uma excelente previsão do slump do material, precisa-se ainda investir em um processo de calibração mais refinado, com vista à melhor previsão da descida do material no regime transiente. O modelo numérico utilizado se mostra, portanto, capaz de simular adequadamente o escoamento de um fluido lamoso em ensaios de slump test, podendo este ser estendido a outras concentrações de corridas de lama.

## Referências bibliográficas

- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas (1998). “Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR NM 67”. Rio de Janeiro.
- Brito, M. G. (2010). “Simulação numérica de tomadas de água”. Dissertação de M.Sc., Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 134p.
- Fluent 14.5. User's Guide. (2012). Lebanon: Fluent Incorporated, 2012. 2546 p.
- Gao, J. and Fourie, A. (2015). “Spread is better: An investigation of the mini-slump test”. *Minerals Engineering*, Vol. 71, 2015, pp. 120-132.
- Maciel G. F., Santos H. K. and Ferreira F. O. (2009). “Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 64-74.
- Pashias, N. et al. (1996). “A fifty cent rheometer for yield stress measurement”. *Journal of Rheology*, Vol. 40, No. 6, 1996, pp. 1179-1189
- Pereira, J. B., Maciel, G. F. and Barbosa M. P. (2016). “Desenvolvimento e implementação de aparato mecânico para a medida automatizada do slump de concretos”. *Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto*, Belo Horizonte, Brasil.
- Wallevik, O. H. and Wallevik, J. E. (2011). “Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 12, 2011, pp. 1279-1288.