

Estudo Numérico-Experimental do Escoamento Líquido- Sólido Estratificado em Canal Horizontal

RESUMO

Felipe Barboza Pereira
felper@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Silvio Luiz de Mello Junqueira
silvio@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Na indústria petrolífera a quantidade de processos e fenômenos em atividades de engenharia de poços associados ao escoamento líquido-sólido é significativa (e.g., carreamento de cascalhos, limpeza de poços, utilização de materiais de perda de circulação – LCM para tamponamento de fraturas, formação de reboco particulado em formações porosas). Neste trabalho, o escoamento particulado estratificado em um canal horizontal é investigado numérica e experimentalmente. O objetivo é verificar qualitativamente, com resultados experimentais, um modelo numérico capaz de reproduzir o escoamento líquido-sólido. Para tanto, a solução acoplada das fases discreta (partículas) e contínua (fluido) é realizada através da combinação dos modelos Dense Discrete Phase Model (DDPM) e Discrete Element Method (DEM). O aparato experimental, desenvolvido no LaMP-CERNN-UTFPR, é composto por uma seção de teste retangular de acrílico, instrumentada com medidores de vazão, pressão e temperatura. Resultados mostram o efeito da variação da vazão de entrada no canal, viscosidade do fluido, massa específica da partícula (plástico) e concentração de sólidos. A caracterização do escoamento particulado estratificado é realizada através do monitoramento da perda de carga ao longo do canal, assim como a evolução da formação do leito de partículas (posição inicial, altura e comprimento) ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento particulado. Aparato experimental. Modelo DDPM-DEM.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento bifásico líquido-sólido está presente em diversas situações e aplicações industriais, como: separadores ciclônicos, leitos fluidizados, transporte de sedimentos, entre outras. De tal forma, que os estudos dos fenômenos envolvidos neste tipo de escoamento têm sido de grande importância ao longo dos anos. O foco do presente trabalho estará voltado para a perfuração de poços.

Na indústria de exploração de petróleo um dos maiores desafios encontra-se na área de perfuração de poços. A perfuração é realizada através do método rotativo que consiste no movimento de rotação de uma broca que comprime e esmerilha a rocha, gerando uma grande quantidade de cascalhos. Os cascalhos são continuamente removidos utilizando-se fluidos de perfuração. O fluido é injetado para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e da coluna (Azar e Samuel, 2007). Devido as características deste tipo de processo, a presença de elevados gradientes de pressão geralmente acaba ocasionando a formação de fraturas no conjunto poço-formação, além dos poros e fissuras pré-existentes (Dietrich *et al.*, 2005). As fraturas resultam em uma intensificação da invasão de fluido de perfuração para a formação rochosa, a chamada perda de circulação diminuindo o seu fluxo no interior do reservatório, contribuindo para uma ineficiência na remoção de cascalhos e até mesmo para uma devida refrigeração inadequada da extremidade da broca. Muitas vezes o processo necessita ser paralisado por longos períodos de tempo aumentando o tempo não produtivo (*nonproductive time* - NPT) e interferindo na produtividade do poço. Além disso a perda desse fluido tem um custo muito elevado. Estima-se que as perdas associadas à perda de circulação custem entre dois e quatro bilhões de dólares cada ano (COOK *et al.*, 2012).

Existem diversas formas de controlar este problema, uma dessas formas é a injeção de material LCM (*lost material circulation*), material particulado de granulometria selecionada utilizado para o preenchimento das fraturas. No presente trabalho, o escoamento líquido sólido em um canal horizontal é avaliado através de uma perspectiva experimental e de uma simulação numérica de Euler-Lagrange através do DDPM-DEM. É avaliado o efeito da variação do número de Reynolds no canal bem como a capacidade do método numérica do reproduzir os resultados experimentais.

2. ABORDAGEM NUMÉRICA

Algumas características essenciais devem ser observadas no escoamento líquidos-sólido como: escoamento disperso, deposição de partículas, interação fluido-partícula, interação partícula-partícula e interação partícula-superfície (obstáculos). A modelagem do escoamento bifásico é realizada utilizando uma abordagem discreta para as partículas, que é chamada de lagrangiana, e contínua para o fluido a qual é denominada euleriana. No programa ANSYS FLUENT (2017), tais abordagens estão presentes no modelo de fase discreta densa (DDPM) no qual as equações para a fase contínua e dispersa são acopladas (Popoff e Braun, 2007), porém solucionadas separadamente. As equações para cada fase são apresentadas na Tabela 1. Sobre cada partícula individualmente atuam as forças F_d de arrasto (MORSI e ALEXANDER, 1980), F_{if} de sustentação, F_p devido ao gradiente de pressão e a F_{vm} de massa virtual. A força F_{DEM} é a força de colisão entre um par partícula-partícula ou partícula-parede sendo calculada pelo

Método dos Elementos Discretos (DEM) (Cundall e Strack, 1979) utilizando o modelo de contato mecânico visco elástico linear.

As interações fluido-partícula concentram-se nas forças F_d , F_{if} , F_p e F_{vm} que são função do campo de velocidade do fluido u_β (CROWE *et al.*, 2011). A interação partícula-fluido, por sua vez, é realizada através do termo F_β .

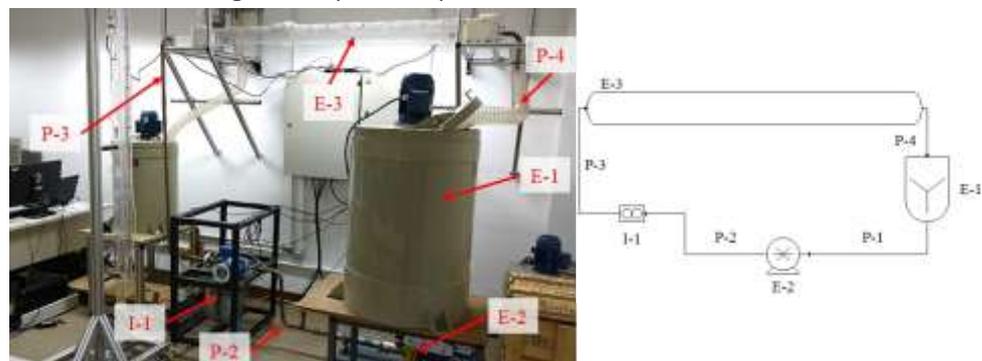
Tabela 1 – Equações para a fase contínua do modelo DDPM

Fluido: DDPM	Partícula
$\frac{\partial \varepsilon_\beta \rho_\beta}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{u}_\beta) = 0$	$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} =$
$\frac{\partial (\varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{u}_\beta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{u}_\beta \mathbf{u}_\beta) = -\varepsilon_\beta \nabla p +$	$= \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_{gb} + \mathbf{F}_{pg} + \mathbf{F}_{vm} + \mathbf{F}_{ls} + \mathbf{F}_{DEM}$
$+ \nabla \cdot (\varepsilon_\beta \mu_\beta \nabla \cdot \mathbf{u}_\beta) + \varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{g} + \mathbf{F}_{DPM} + \mathbf{S}_{DPM}$	$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p$

3. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Meios Porosos (LAMP) do Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não-Newtonianos (CERNN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR – Campus Ecoville) com a utilização do aparato experimental mostrados e identificados pela Figura 1 (Schneider *et al.*, 2016).

Figura 1 - Aparato experimental e circuito hidráulico.



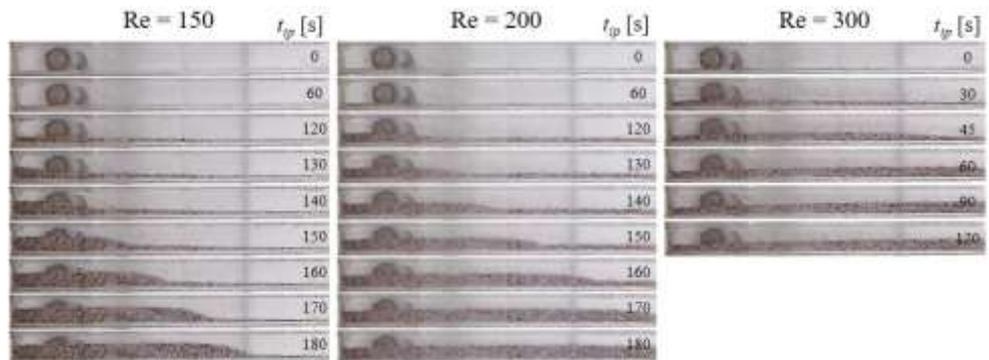
A seção de testes é fabricada em acrílico para possibilitar a visualização do escoamento particulado possuindo comprimento de 2m, espessura de 45mm e profundidade de 16mm. O material particulado utilizado é um abrasivo plástico (Urea), que possui uma coloração branca mesclada com massa específica variando entre 1,5 – 1,6 g/cm³ e diâmetros de 0,8 a 1,2 mm. A concentração mássica das partículas (c_p) é de aproximadamente 2%. O fluido de trabalho é uma mistura de água com glicerina com comportamento newtoniano. A concentração mássica de glicerina em água (c_g) é de aproximadamente 70%, com densidade de 1181 kg/m³ e viscosidade de 19,5 × 10⁻³ Pa.s. A razão de massa específica de partículas com relação ao fluido ($\rho_{p/\beta}$) de 1,35, aproximadamente.

O tempo zero do experimento ocorre quando as partículas são injetadas no tanque misturador (E-1). A mistura segue para a bomba helicoidal (E-2) e, na sequência, para o medidor de vazão Coriolis (I-1), sobe pela tubulação de recalque vertical (P-3) e entra na seção de testes (E-3), saindo na outra extremidade com pressão atmosférica retornando ao tanque misturador, caracterizando um ciclo fechado.

4. RESULTADOS

Os resultados experimentais obtidos pela variação do número de Reynolds (Re) no canal são mostrados na Figura 2.

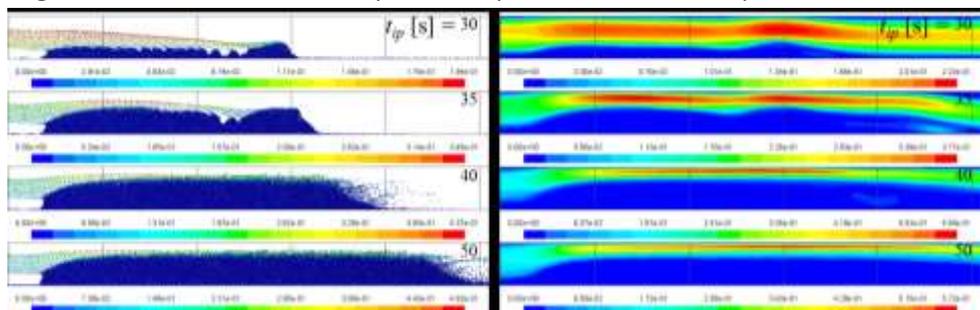
Figura 2 - Resultados experimentais para a variação do Re.



Observa-se na Figura 2 o tempo de preenchimento do canal para três números de Re. Para Re=150, as partículas começam a se depositar por volta de 120 s. Este é o tempo da trajetória da partícula desde a injeção no tanque misturador até a chegada à seção de testes. Observa-se que para Re=300 o preenchimento ocorre antes, aos 30s, devido a maior velocidade do escoamento e maior vazão, conseqüentemente as partículas chegam em menor tempo ao canal. As principais características observadas nos experimentos são de que quanto maior o Re mais rápido se dá a formação de leito particulado. Porém, a altura do leito é menor quanto maior for o Re. Observa-se que existe uma estabilização da altura dos leitos, que ocorrem em instantes diferentes para cada Re. Em Re=150 esse instante se dá por volta de 160s, a partir deste momento apenas o comprimento do leito irá variar, até o completo preenchimento. Está característica se dá pelo estreitamento do canal conforme a altura do leito cresce, aumentando a velocidade e empurrando as partículas que se depositam na frente do leito.

Com relação aos ensaios numéricos, apresentados na Figura 3, foram considerados os mesmos parâmetros para as propriedades do fluido (viscosidade dinâmica de $19,5 \times 10^{-3}$ Pa.s e massa específica de $1,181 \text{ g/cm}^3$).

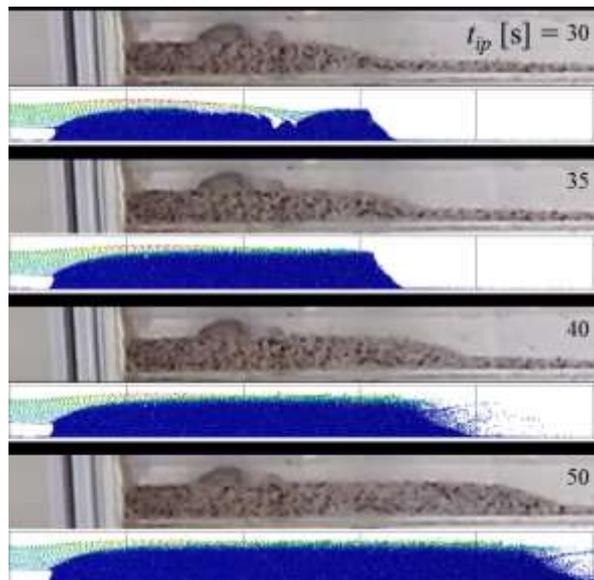
Figura 3 – Resultados numéricos para o campo de velocidades das partículas e do fluido.



As partículas, consideradas como esferas, possuem um diâmetro único de 1 mm, com massa específica de $1,6 \text{ g/cm}^3$ mantendo a razão entre fluido-partícula de 1,355. Outros parâmetros numéricos importantes são os passos de tempo do fluido ($\Delta t_f = 2,0 \times 10^{-2}$) e da partícula ($\Delta t_p = 4,0 \times 10^{-4}$). A Figura 3 mostra o campo de velocidade das partículas e do fluido para o processo de preenchimento do

escoamento horizontal estratificado ao longo do tempo, considerando um número de Reynolds de $Re = 150$. Da mesma forma que observado para os resultados experimentais, após um certo instante ($t_{ip} = 35s$) a altura do leito permanece inalterada, iniciando o processo de aumento do comprimento. Para o campo de velocidade do fluido fica evidente o aumento da velocidade a medida que ocorre o estreitamento do canal livre. Na Figura 4 é apresentado a comparação dos resultados numéricos (Figura 3) e experimentais (Figura 2) para $Re = 150$. Algumas diferenças são evidentes na comparação entre os resultados, principalmente nos instantes iniciais. Isto se deve, principalmente pela diferença na forma das condições de injeção das partículas. A injeção numérica é controlada e permite uma entrada uniforme e constante de partículas. Por outro lado, a injeção experimental não garante uma entrada uniforme de partículas, devido ao processo de mistura no tanque e ao circuito hidráulico percorrido até a entrada do canal. Outro fator a se considerar é o formato e distribuição de diâmetros das partículas de Urea. Estas diferenças podem influenciar de forma direta nos parâmetros geométricos do leito de partículas depositadas no canal.

Figura 4 - Comparação entre resultados para o mesmo número Re ($Re=150$).



5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que quanto maior for o número de Re mais rápido se dará a formação do leito particulado sobre o canal, enquanto que para Re mais baixos, temos um empacotamento maior de partículas na região de entrada e um preenchimento mais lento ao longo da seção. Podemos concluir ainda que após a estabilização da altura do leito existe apenas o aumento do comprimento, que é uma característica do leito móvel deslizante formado pelo estreitamento e aumento da velocidade no canal, empurrando as partículas com maior inércia. Resultados numéricos possibilitaram ter uma maior compreensão do caso e diferiram de forma significativa nos instantes iniciais do processo de preenchimento, devido principalmente ao controle das condições de injeção de partículas. Para instantes de tempo superiores, que apresentem apenas o aumento do comprimento do leito os resultados se mostraram adequados para descrever o fenômeno observado experimentalmente, possibilitando a simulação de casos de maior complexidade.

Numerical-experimental study of the stratified liquid-solid flow in horizontal channel

ABSTRACT

In the petroleum industry, the number of processes and phenomena in well-engineering activities associated with liquid-solid flow is significant (eg, gravel casing, well cleaning, use of lost materials control- LCM for fracture, particulate material in porous substrates). In this work, the stratified particulate flow in a horizontal channel is investigated, numerically and experimentally. The objective is to verify qualitatively, using experimental results, a numerical model capable of reproduce the liquid-solid flow. To do so, the coupled solution of the discrete (particles) and continuous (fluid) phases is performed through the combination of Dense Discrete Phase Model (DDPM) and Discrete Element Method (DEM). The experimental apparatus, developed at the LaMP-CERNN-UTFPR, is composed of a rectangular acrylic test section, instrumented with pressure, temperature and mass flow rate sensors. Results show the effect of the variation of the inlet flow on the channel, fluid viscosity, specific particle mass (made of plastic) and solids concentration. The characterization of the stratified particulate flow is performed by monitoring the pressure drop along the channel, as well as the evolution of the particle bed formation (initial position, height and length) over time.

KEYWORDS: Particulate flow. Experimental apparatus. DDPM-DEM model.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CENPES/PETROBRAS, ao Programa de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Educação, Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico da UTFPR (FUNTEF-PR).

REFERÊNCIAS

ANSYS FLUENT. v17.2 - Theory Guide, ANSYS, Inc., 2017.

AZAR, J. J.; SAMUEL, G. R. Drilling Engineering. Tulsa: Penn Well Corporation, 2007.

COOK, J., GROWCOCK, F., GUO, Q. et al, Stabilizing the Wellbore to Prevent Lost Circulation. Oilfield Review, n. 4, p. 26-35, 2012.

CROWE, C.T.; SCHWARZKOPF, J.D.; SOMMERFELD, M.; TSUJI, Y.. Multiphase Flows with Droplets and Particles, 2ed. CRC Press, 2011.

CUNDALL, P.A.; STRACK, O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47–65, 1979.

DIETRICH, P.; HELMIG, R.; SAUTER, M.; HÖTZL, H.; KÖNGETER, J.; TEUTSCH, G. 2005, “Flow and transport in fractured porous media”, Springer, Berlin.

MORSI, S.A.; ALEXANDER, A.J., An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 55, n. 2, p. 193–208, 1972.

POPOFF, B.; BRAUN, M., A Lagrangian Approach to Dense Particulate Flows. In: International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Germany, 2007.

SCHNEIDER, C.L.; DE LAI, F. C.; JUNQUEIRA, S.L.; Análise Experimental do Escoamento Líquido-Sólido Para o Controle de Perda de Circulação em Canal Fraturado: Efeito da Espessura da Fratura, Rio Oil & Gas, Brasil, 2016.

Recebido: 31 ago. 2017.

Aprovado: 02 out. 2017.

Como citar:

PEREIRA, F. B. et al. Estudo Numérico-Experimental do Escoamento Líquido-Sólido Estratificado em Canal Horizontal. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Felipe Barboza Pereira
Rua Doutor Murici, 30, Centro, Curitiba, Paraná, Brasil.

Direito autoral:

Este resumos expandidos está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

