



ESTUDO DA ACUMULAÇÃO DE SEDIMENTOS EM TUBULAÇÕES PETROLÍFERAS NO ESCOAMENTO DE PETRÓLEO, USANDO O CFX

Olívia Del-Puppo Pereira Fernandes¹; Ana Sílvia Maciel de Oliveira²; José Jefferson da Silva Nascimento³; Bianca Thamires Alexandre Silva⁴; Wanggles Rodrigues Prates⁵

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
olivia_del-puppo@hotmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
aninhamcl17@gmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia dos Materiais -
jefferson@dema.ufcg.edu.br

⁴ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
biancathamires1@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
wangles.eng@gmail.com

RESUMO

Neste estudo é evidenciado o escoamento multifásico de óleo com partículas de areia, utilizando ANSYS CFX® 14.0. As equações de massa e momento das fases dispersas e contínuas de conservação são baseados no modelo Euleriano-Lagrangiano (rastreamento de partículas de Lagrange). O modelo utilizado foi o turbulência K-Epsilon. Portanto, as simulações de computador foram feitas duas vezes com três diferentes malhas de sua independência para analisar os resultados, a obtenção de frações em massa, e taxa de deposição volumétrica de partículas com três diâmetros diferentes, respectivamente, de 10,6 µm (partículas pequenas) 10 -5 µm (partículas de média) e 10-4 µm (partículas grandes). A este respeito, as taxas de deposição, massa e volume foram mais significativos para partículas médias e grandes, em grande parte do comprimento do tubo de saída de 0,23375 m para as pequenas partículas, as cargas mostraram valores menos intensa nas mesmas condições mencionadas. Os resultados são analisados e discutidos, indicando a necessidade de uma pré-filtragem da mistura imiscível, evitando assim problemas com a tubulação e assim melhorando a eficiência do transporte de petróleo. Neste contexto, a análise em CFD (Computational Fluid Dynamics) é essencial para a pesquisa que envolva um modelo Euleriano-Lagrangiano.

Palavras-chave: CFX, Simulação computacional, partículas de areia.

1. INTRODUÇÃO

As empresas petrolíferas frequentemente se deparam com um problema de difícil previsão ao extrair petróleo e transportá-lo à superfície, ao ser retirado do interior de rochas subterrâneas, o líquido oleoso carrega

sedimentos, como grãos de areia, que podem acumular e formardunas no interior das tubulações utilizadas para extração e transporte de petróleo, dificultando as operações de produção, gerando uma mistura imiscível com o óleo e causando uma série de problemas de ordem técnico-econômica, como, por exemplo, severas erosões e entupimento



em algumas partes das respectivas tubulações, acarretando diminuição da eficácia de escoamento e dificultando o fluxo do fluido, o que muitas vezes obriga a parada dos equipamentos para sua limpeza. [Carlon, 2007], [Wong *et al.*, 2012]. Segundo Zhou *et al.*, [2011], a taxa de erosão aumenta com o decréscimo da resistência da areia e com o aumento da taxa de fluxo.

Com o objetivo de investigar as causas desses problemas, o presente estudo mostra a deposição de frações volumétricas de partículas de areia presentes no escoamento da solução óleo e areia em tubulações do tipo “L”, abordando os possíveis danos às respectivas tubulações. Para isso, as ferramentas de estudo utilizadas foram as Simulações Fluidodinâmicas Computacionais (CFD), através do software ANSYS CFX® 14.0, que conforme a literatura [Chuah *et al.*, 2006] são extremamente eficientes.

1.1. Problemas gerados pela areia nas tubulações que escoam petróleo

Os danos causados pela areia durante o escoamento de óleo em tubulações podem variar em intensidade, podendo ou não ser necessária alguma intervenção. Segundo Cardoso (2007), dentre os principais contratempores deste tipo de escoamento podemos citar a deposição de areia na tubulação, reduzindo ou até mesmo causando a interrupção do fluxo; erosão do equipamento; e ainda, criação de grandes vazios por trás do revestimento, que poderão causar redução drástica da capacidade de escoamento.

De acordo com Zhou *et al.*, [2011] erosão de um material metálico é o desgaste mecânico provocado pela abrasão superficial de uma substância sólida, líquida ou gasosa.

A Figura 1 ilustra os danos causados pela areia em tubulações utilizadas na indústria petrolífera.

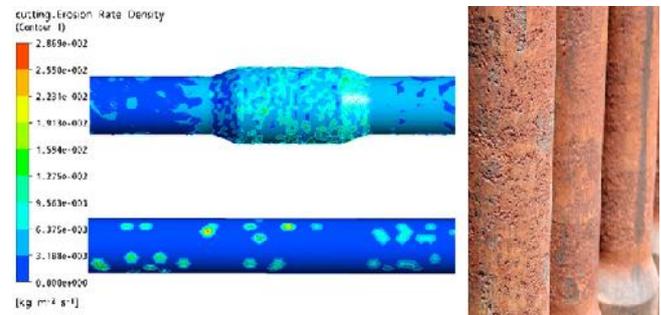


Figura 1 – Resultado de simulação de erosão em tubulação e tubo real erodido [Fonte: Zhu *et al.*, 2012]

1.1.1. Definição e aplicação de fluidodinâmica computacional (CFD)

De acordo com Correia [2009], Fluidodinâmica Computacional (CFD) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse de um dado escoamento. A origem dessas equações de conservação é a teoria de fenômenos de transporte.

1.4. Equações

O Equacionamento matemático do estudo é baseado no modelo multifásico *Lagrangeano – Euleriano* também conhecido como *Lagrangian particle tracking*. O modelo Euleriano resolve todas as variáveis para cada fase, por exemplo, o campo de velocidade, energia, concentração, etc. A abordagem lagrangeana tem o seu foco num conjunto de partículas, resolve um número finito de trajetórias representativas de partículas individuais que se deslocam através do domínio de cálculo e é indicado quando



informações pontuais são desejadas, como por exemplo, tempo de residência e distância percorrida.

O modelo lagrangeano bem documentado na literatura [Rao *et al.*,2002] e [Nugoro *et al.*,2002] calcula trajetórias de amostras de partículas que percorrem a fase contínua através da integração de equações diferenciais ordinárias para posição e velocidade de cada partícula.

A posição de uma partícula pode ser descrita pela Equação 2, que ao ser integrada fornece a posição da partícula em função do tempo. De acordo com a Figura 2 uma partícula de massa m_p se desloca com velocidade \vec{v}_p (Calculada na Equação 1) e está sob influência de uma força \vec{F} gerada pela fase contínua que possui velocidade \vec{v}_c . Já a velocidade da fase dispersa é dada por \vec{v}_p e equação da fase dispersa é dada por ANSYS [2009].

$$\frac{d\vec{x}_p}{d\tau} = \vec{v}_p \quad [1]$$

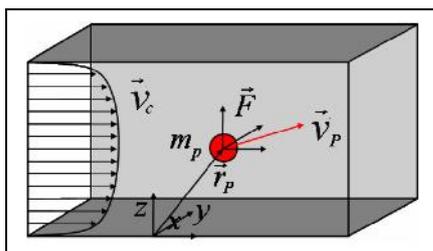


Figura 2 – Representação esquemática de uma partícula

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \sum \vec{F} \quad [2]$$

As equações de conservação de massa se subdividem para a fase contínua e dispersa. Para a fase contínua,

no caso do estudo, petróleo, o termo fonte (s_m) é dado pela Equação 3.

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_c \rho_c) = s_m \quad [3]$$

Já para a fase dispersa, partículas de areia, a taxa mássica M é calculada através da Equação 4.

$$\dot{M} = \frac{\Delta m_p}{m_{p,c}} n p_j \quad [4]$$

Da mesma forma, existem duas equações para o cálculo do momento da fase contínua. Para a fase contínua temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}_c) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}_c \vec{v}_c) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \vec{F} \quad [5]$$

Onde a primeira parcela da equação, $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}_c) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}_c \vec{v}_c)$, refere-se às forças inerciais e $-\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \vec{F}$, refere-se às forças viscosas e de pressão e forças adicionais (gravitação, gradientes de pressão na partícula) e forças de arrasto.

A Equação 6 é dada para o transporte de partículas, tal que F_d é a força de arrasto (*Drag Force*) e $\vec{F}_{adicionais}$ (*Non-Drag*) é composta pelas forças de empuxo, rotação e peso.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \sum \vec{F} = \vec{F}_d + \vec{F}_{adicionais} \quad [6]$$

A equação acima foi resolvida pelo método de Runge-Kutta, Zill [2003], sendo assim, um número de iterações é necessário para garantir precisão na solução. O modelo de turbulência adotado foi o K-Épsilon, Launder e Spalding [1974]. Para a solução do problema, foi utilizado um esquema de interpolação *upwind* segunda para os termos convectivos e um esquema de



interpolação *simple* para o acoplamento pressão-velocidade.

condições utilizadas no presente estudo estão dispostas na Tabela 2.

2. METODOLOGIA

Para a realização do estudo, foram elaboradas simulações computacionais, utilizando software ANSYS CFX® 14.0, com auxílio das literaturas de Kostetzer [2007] e Berkeley [2012].

No estudo computacional aplicado a este trabalho, foi utilizado o software de simulação computacional ANSYS CFX 14.0®, para a construção da geometria, e assim representar o volume de controle através do qual o fluido escoar. A malha geométrica gerada foi refinada progressivamente e seus dados seguem abaixo na Tabela 1. É na malha onde são definidos os pontos de integração e os limites dos volumes de controle.

Tabela 1 – Dados das Malhas

	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Espaçamento do Volume(cm)	0,53	0,30	0,10
Ângulo Min. (deg)	2,50	2,50	10,0
Número de Nós	981	5630	119204
Número de Elementos Tetraédricos	3839	26406	644593

As condições de contorno (*Boundary Conditions*) de uma malha são de crucial importância para o resultado final da simulação, pois definem as condições físicas na fronteira do sistema. As

	Tipo	Detalhe	
Entrada	Inlet	Subsônico	
		Taxa de Fluxo de massa	0,0563 kg/s
		Turbulência Média 5%	
		Direção do Fluxo Normal	
Núcleo	Wall	Sem Deslizamento	
		Parede Lisa	
Saída	Outlet	Pressão Estática	1 atm
		Subsônico	

A Figura 3 apresenta a tubulação gerada em formato de “L” e seus respectivos contornos (Boundary) destacadas em laranja. Já a Figura 4 evidencia a malha.

Tabela 2 – Condições de Contorno

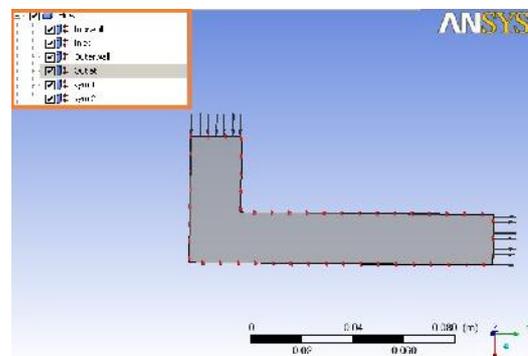


Figura 3 – Tubulação “L”

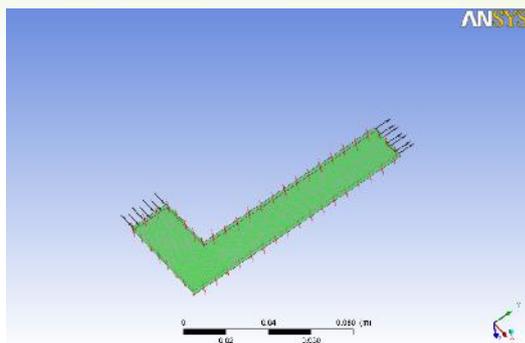


Figura 4 – Malha Gerada

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após estabelecer todos os parâmetros e equações a serem utilizadas na simulação, através do CFX-PRE 14.0®, foi gerado um conjunto de equações lineares acopladas, que foram resolvidas com o auxílio da ferramenta computacional CFX-SOLVER® 14.0. Na verdade, só é possível a aplicação da fluidodinâmica computacional devido ao grande poder computacional existente nos dias de hoje. Os parâmetros do Solver são: 100 iterações máximas e critério de convergência de 10^{-4} .

Finalmente, a solução obtida foi analisada e interpretada, gerando recursos gráficos como planos de corte, iso-superfícies, gráficos X-Y e animações. Os modelos extraídos foram considerados extremamente confiáveis e através dos mesmos foram possíveis extrair as variáveis de interesse e visualizar as condições desejadas.

O modelo computacional apresentou respostas adequadas para os valores das propriedades e parâmetros considerados para simulação. Essas observações são capazes de certificar a validade do modelo, por apresentar comportamentos semelhantes aos observados nas tubulações “L” e descritos em outros trabalhos científicos. Por meio de indução para confirmação de efeitos teóricos

previamente estudados, o modelo também apresentou as respostas esperadas.

3.1 Taxa de deposição (*Deposition Rate*)

A taxa de deposição das partículas grandes, médias e pequenas de areia foram observadas claramente nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente. Nesse sentido, fica evidenciado uma taxa de deposição bastante acentuada das partículas grandes (*Large Particles*) na primeira parte da base de saída do contorno Outerwall, mais especificamente de 0.00 até 0.025m.

Nota-se uma taxa de deposição mais largamente distribuídas, de 0.0625m até 0.1375m, indicando que as partículas médias (*Medium Particles*) depositam-se ao longo de toda a extensão da tubulação, por sua vez, pode-se constatar que as menores partículas (*Small Particles*) têm uma pequena taxa de deposição no equipamento, apenas na faixa entre 0.22875m e 0.23375m, indicando que essas partículas continuam misturadas no sistema sem haver deposição significativa.

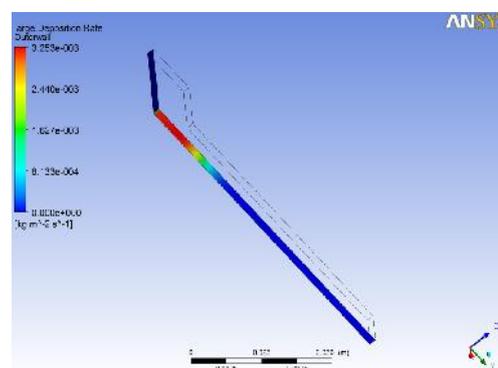


Figura 5 - Taxa de deposição das partículas grandes de areia

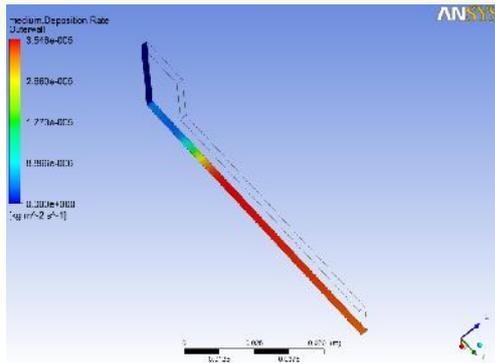


Figura6 - Taxa de deposição das partículas médias de areia.

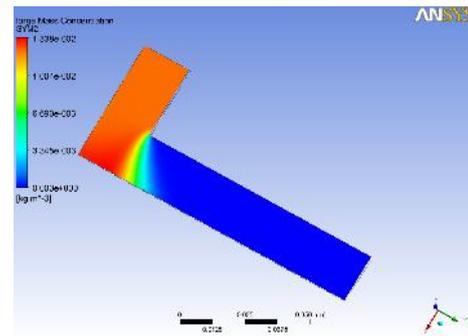


Figura 8 - Fração mássica das partículas grandes

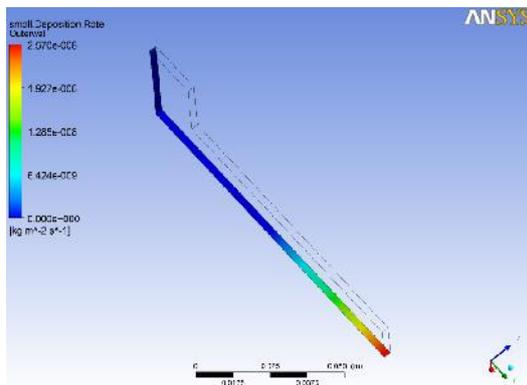


Figura 7 – Taxa de deposição das partículas pequenas de areia.

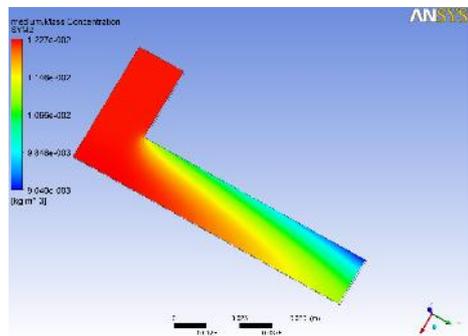


Figura 9 - Fração mássica das partículas médias.

3.2 Frações mássicas (*Mass Fractions*) e frações volumétricas (*Volume Fractions*)

Com relação a fração mássica (Figuras 8-10), observa-se claramente maior intensidade das partículas grandes ($1 \times 10^{-4} m$) no início da base de saída de 0,00m até 0,025m. No caso das partículas médias ($1 \times 10^{-5} m$), elas estão distribuídas no intervalo de 0,0625m até 0,1375m com relação as partículas pequenas ($1 \times 10^{-6} m$), há uma pequena concentração mássica próximo a saída da tubulação de 0,22875m a 0,23375m, indicando que sua fração mássica fica mais dispersa no sistema. No sentido geral, as frações volumétricas das partículas grandes, médias e pequenas se comportam de uma forma, similar a fração mássica, em termos de sua intensidade no espaçamento da tubulação, ver (Figuras 11 – 13)

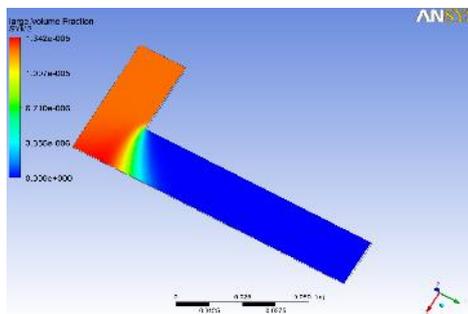


Figura 10 - Fração mássica das partículas pequenas

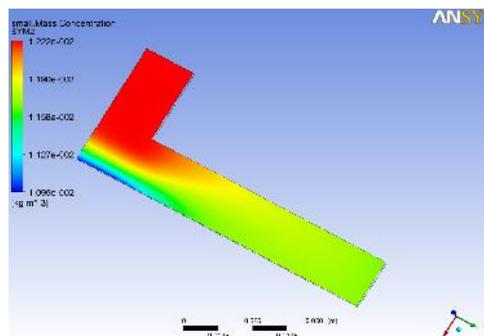


Figura11 - Fração volumétrica das partículas grandes

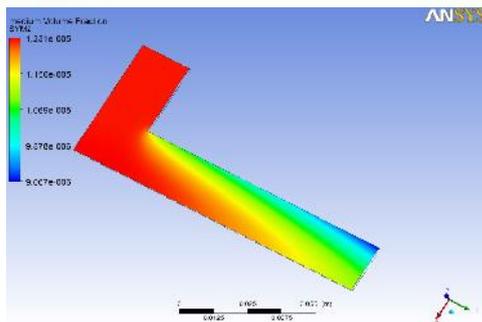


Figura 12 – Fração volumétrica das partículas médias

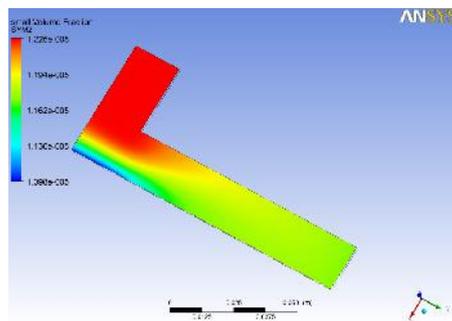


Figura 13- Fração volumétrica das partículas pequenas.

4. CONCLUSÕES

A simulação computacional desenvolvida no presente estudo mostrou-se adequada para descrever o fenômeno de forma realística e com ampla gama de detalhes, adequadas a natureza física do problema, comprovando que o CFD se constitui em uma ferramenta valiosa para estudos fenomenológicos de sistemas de fluidos imiscíveis.

Os testes realizados evidenciaram deposição de partículas, frações mássicas e volumétricas no transporte de petróleo em solução com areia através de tubulações do tipo “L”, indicando a necessidade de uma pré-filtragem da areia da mistura imiscível, evitando assim problemas e melhorando a eficiência do transporte de petróleo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, ANSYS-CFX12.0 *User Manual*, ANSYS Inc., Pittsburgh, USA, 2009.

CARDOSO, L. C. dos S. *Logística do Petróleo: Transporte e Armazenamento*. Interciência, 2007.

CARLON, J.; GURLEY, D.; KING, G.; PRICE-SMITH, C.; WATERS, F. *Sand Control: Why and How? Oilfield Review*, p. 41-53, 2007

CARVALHO, A. T. de. *Otimização de Ciclone para a Pré-Separação de Areia na Produção de Petróleo* 77p. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química. 2008

CFX(2012), *CFX 14.0 Solver Theory Guide*, Ansys Inc., Berkeley.

CHUAH, T.G. A CFD *Study of effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics*, Powder Technology, 162P. 2006.

FONTES, C.E., SILVA, L.F.L.R., LAGE, P.L.C., RODRIGUES, R.C., *Introdução a Fluidodinâmica Computacional*. Escola Piloto Virtual, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

KOSTETZER, A. L. DE. *ESSS - Engineering Simulation and Scientific Software*, 2007

LAUNDER B.E., SPALDING D.B., *The numerical computation of turbulent flows*, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3 (1974) 269–289.

MARIANO, G. C. *Estudo do Escoamento Imiscível Água/Óleo Mediante Experimentação em Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD*. 102p., Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.

NUGROHO S.S., MCLAURY B.S., SHIRAZI S.A., *Application of CFD-based erosion prediction procedure for*



sudden expansions. ASME, Montreal, Quebec, Canada, 14–18 July, 2002, pp. 231–235.

RAO P.V., YOUNGS.G., BUCKLEYD.H., ***Morphology of an aluminium alloy eroded by a normally incident jet of angular erodent particles***, Wear 92 (1983) 31–49.

ROSA, A. J.; Carvalho, R. de S.; Xavier, J. A. ***Engenharia de Reservatórios de Petróleo***. Interciência, 2009

ZHU, X., LIU, S., TONG, H., HUANG, X., LI, J., ***Experimental and numerical study of drill pipe erosion wear in gas drilling***, 11P. 2012.ZILL, D.G., ***Equações Diferenciais com aplicações em Modelagem***. Cengage Learning, 2003