

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO ANULAR DE ÁGUA - ÓLEO PESADO - AR EM DUTOS HORIZONTAIS

CON-2016-0905

Nome do primeiro autor, e-mail¹

Nome do segundo autor, e-mail²

Nome do terceiro autor, e-mail³

Nome do quarto autor, e-mail⁴

Nome do quinto autor, e-mail⁵

Nome do sexto autor, e-mail⁶

¹Nome da instituição, endereço para correspondência

²Nome da instituição, endereço para correspondência

³Nome da instituição, endereço para correspondência

⁴Nome da instituição, endereço para correspondência

⁵Nome da instituição, endereço para correspondência

⁶Nome da instituição, endereço para correspondência

Resumo: Este artigo tem como objetivo apresentar via simulação numérica, o comportamento fluidodinâmico do escoamento trifásico água – óleo pesado - ar, durante o transporte de óleos pesados e ultraviscosos em dutos horizontais, utilizando a técnica “core annular flow” em sistema isotérmico. Os resultados obtidos, comparados com dados experimentais, demonstraram que a modelagem matemática utilizada foi adequada, uma vez que os dados numéricos obtidos na simulação foram devidamente validados através de dados experimentais.

Palavras-Chave: core-flow, simulação computacional, escoamento multifásico.

1. INTRODUÇÃO

A constatação da eficiência da técnica de transporte de óleos pesados pela injeção de água (“core-flow”), em sistema bifásico água-óleo, tanto em termos de consumo de energia como em volume produzido, faz com que ela seja avaliada em outras situações práticas antes de ser implementada para a elevação e transporte deste tipo de óleo.

Dentre as situações práticas destaca-se o transporte de óleo pesado com a presença de uma terceira fase, o gás, que inicialmente está em solução, porém, em consequência da queda de pressão ao longo do duto, se desprende, formando bolhas, inicialmente pequenas e com baixa velocidade superficial, que, ao longo da tubulação, se expandem e aceleram. Assim como sua presença deve-se ao fato de que na maioria dos poços de petróleo existe uma grande concentração de gás e quando da extração do petróleo, o gás presente no poço também é extraído e passa a escoar junto a esse óleo. A presença desta terceira fase no escoamento modifica significativamente o padrão de escoamento bifásico anular óleo-água, assim como sua queda de pressão.

Para validar os resultados numéricos desta pesquisa, foram utilizados os resultados experimentais de queda de pressão, obtidos por Trevisan (2003), ao estudar os padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado, água e ar.

1.1. Materiais e Métodos

O trabalho experimental que será referenciado para validação numérica de simulação foi realizado no Laboratório de Fluxo Multifásico da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas por Trevisan (2003), cujos dados, já publicados, são utilizados neste artigo.

Do aparato experimental utilizado por Trevisan (2003), foi escolhido, como domínio de estudo, um segmento da seção de teste horizontal. Este segmento consistiu de uma tubulação de vidro de 3 m de comprimento e 0,0284 m de

diâmetro interno, dos quais, 0,003 m correspondia ao espaço anular que permitiu a formação de um anel de água adjacente à parede da tubulação (Figuras 1 a - b). Por sua vez, a entrada da tubulação apresenta duas regiões distintas, denominadas entrada de água e de óleo (Figura 1 c). Quanto a saída, foi definida uma única região, denominada saída (Figura 1d).

Para garantir que os dados fossem coletados quando o escoamento já tivesse atingido o desenvolvimento hidrodinâmico, as tomadas de pressão, espaçadas 81 cm uma da outra, foram instaladas a uma distância de 30 vezes o diâmetro interno da tubulação, tomando-se como referência o cotovelo a direita da tubulação da seção de teste horizontal.

Maiores detalhes do aparato e procedimento experimental podem ser obtidos em Trevisan (2003).

Para a criação do domínio e geração da malha do tubo de seção transversal circular, foi utilizado o *software* Ansys Icem CFD 11.0

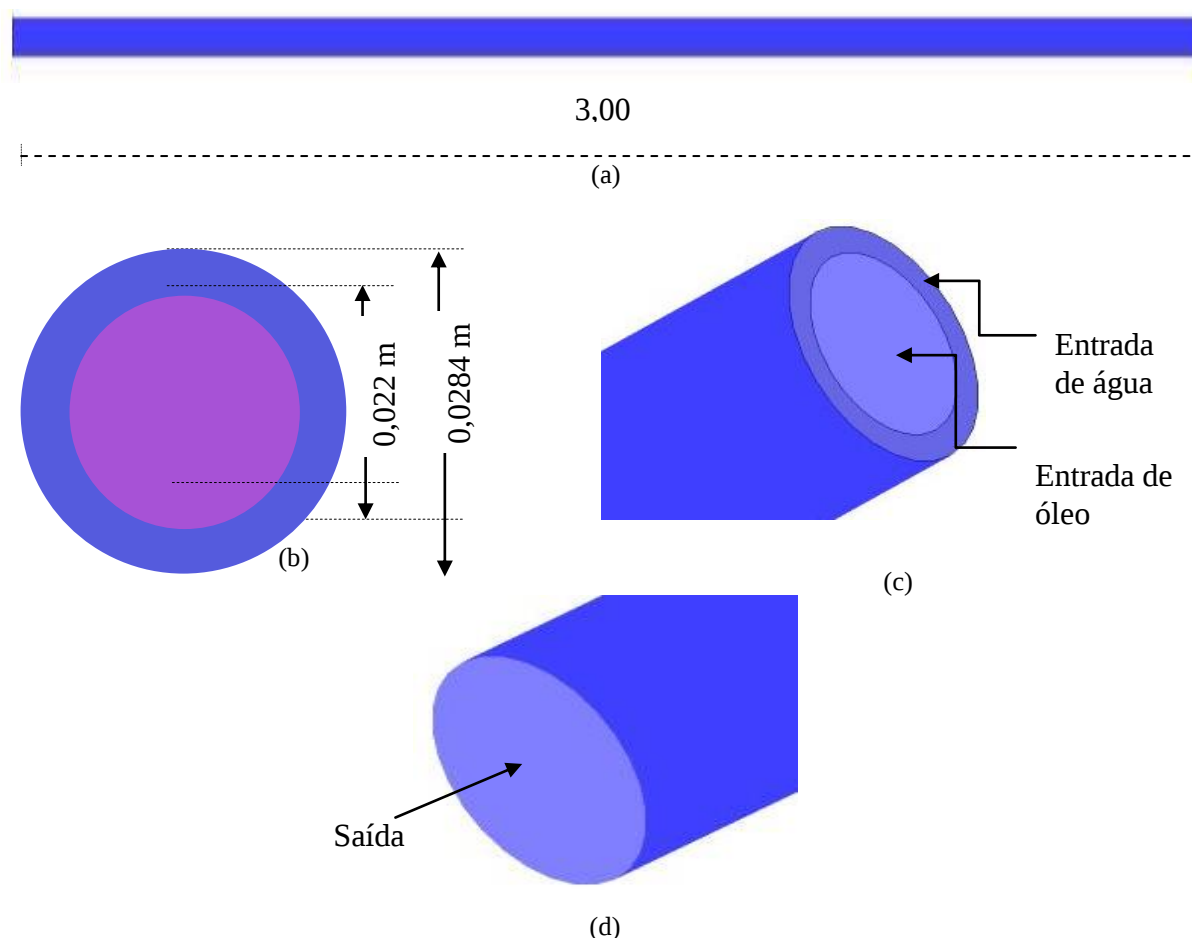


Figura 1 - Representação da tubulação: (a) visão geral, (b) ilustração do espaço anular, (c) região de entrada e (d) região de saída.

Após a geração da malha, foram realizados refinamentos a fim de eliminar a dependência dos resultados com a malha.

As Figuras 2 e 3 ilustram as malhas estruturadas geradas, correspondentes a geometria do duto implementada no espaço tridimensional. A malha estruturada foi confeccionada no domínio fictício tridimensional em coordenadas generalizadas que, após diferentes refinamentos de malha (visando a não dependência dos resultados numéricos com as mesmas), resultou em uma malha constituída por 72.000 elementos hexaédricos.

As Figuras 4 e 5 ilustram os detalhamentos do refinamento da malha na saída e parede do duto, respectivamente.

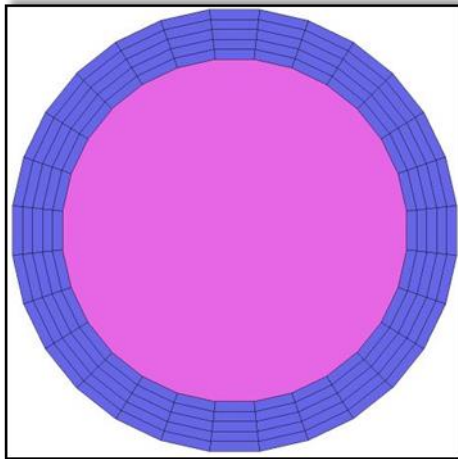


Figura 2 – Ilustração da malha estruturada na entrada de água.

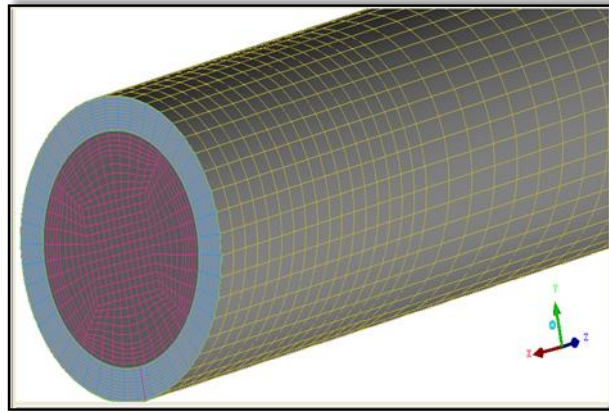


Figura 3 – Ilustração da malha estruturada referente à parede do duto próxima a região de entrada.

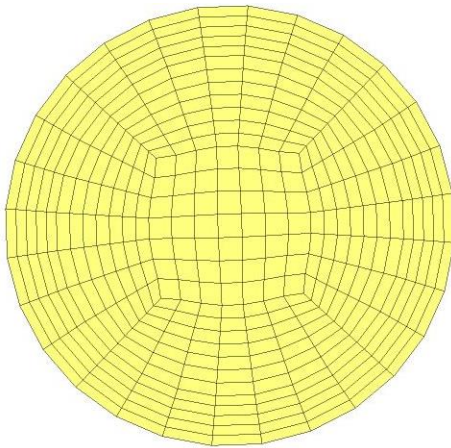


Figura 4 – Ilustração da malha estrutura na saída do duto.

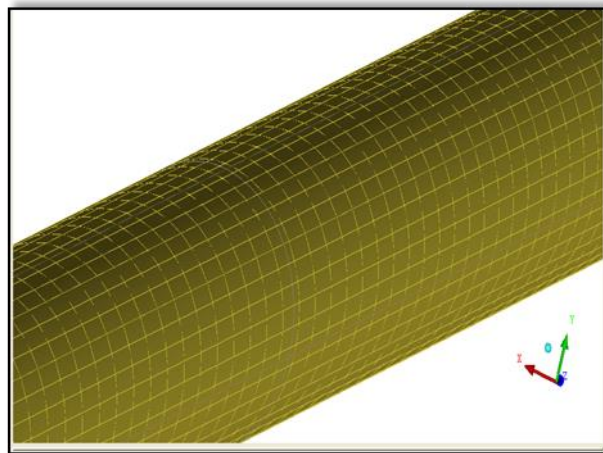


Figura 5 – Detalhes da malha estruturada na parede do duto.

1.1.1. Considerações sobre o modelo e condições de contorno

Para o estudo do comportamento fluidodinâmico do escoamento trifásico no interior de duto levando-se em consideração as fases líquida (água e óleo) e gasosa (ar), situação real no transporte de óleo pesado, foi utilizado o modelo para escoamentos multifásicos com transferência interfacial (aproximação Euleriana – Euleriana).

Inicialmente, visando simplificar o modelo e a solução das equações governantes, foram feitas as seguintes suposições:

- a1) Fluidos newtonianos.
- a2) Escoamento incompressível, regime permanente e trifásico, formado por duas fases contínuas (água - α e óleo - γ) e uma fase dispersa (ar - β).
- a3) Sistema isotérmico, com temperatura igual a 298K; que corresponde a temperatura de trabalho utilizada por Trevisan (2003).
- a4) Propriedades termodinâmicas (massa molar, massa específica e capacidade de calor específico) e de transporte (viscosidade dinâmica e condutividade térmica) constantes.
- a5) Regime de escoamento turbulento (modelo $k - \varepsilon$) para a água e laminar para o óleo e o ar.
- a6) Modelos de mistura para modelar os termos de transferência de momento interfacial entre as fases contínuas e Modelo de partícula para modelar os termos de transferência de momento interfacial entre as fases dispersa e contínua, respectivamente.
- a7) A transferência de momento interfacial entre as fases α , γ e β é função apenas da força de arraste. Esta suposição foi respaldada na afirmação de que a força de arraste é a força que exerce maior efeito nos modelos de transferência de momento interfacial (CHEN et al., 2005).

a8) Considerando que as bolhas de ar eram esféricas e a distribuição escassa, as determinações dos coeficientes de arraste (C_D) para os pares de fluidos água/ar e óleo/ar foram realizadas por meio da correlação de Ishii Zuber (1979).

Para o par de fluidos água/óleo, o C_D foi considerado constante e igual a 0,44.

a9) A fonte de momento devido à força corpo externa depende apenas do empuxo.

a10) A transferência de massa interfacial foi considerada desprezível.

a11) Núcleo de óleo estático e no centro do duto, no início do processo.

a12) Rugosidade do duto de vidro igual a $1,5 \times 10^{-5}$ m.

a13) Considerando-se que superfícies rugosas podem causar efeitos significativos sobre o fluxo - como conduzir ao aumento da produção de turbulência próximo a parede, resultando no aumento significativo tanto na tensão de cisalhamento na parede como nos coeficientes de transferência de calor - a predição do fluxo próximo a parede foi modelada por meio da utilização da condição de contorno *no slip wall*.

a14) Modelo de contato com a parede: *specify area fraction*.

a15) Escoamento hidrodinâmico completamente desenvolvido.

a16) Misturas de óleo, água e ar nas duas regiões de entrada da tubulação (entrada de água e de óleo). Esta suposição foi baseada na consideração de que os fluidos, provenientes do tanque de separação, ao serem reintroduzidos no sistema, de forma pressurizada, eram parcialmente misturados, principalmente ao passarem pelo cotovelo que unia as tubulações das seções de teste vertical e horizontal, o que favorecia a formação de misturas.

1.1.2. Modelo Matemático

Mediante as hipóteses formuladas, as equações governantes podem ser reescritas da seguinte forma:

- Conservação de massa:

- Para a fase contínua - água (α):

$$\nabla \bullet (r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (1.1)$$

- Para a fase contínua - óleo (γ):

$$\nabla \bullet (r_\gamma \rho_\gamma \vec{U}_\gamma) = 0 \quad (1.2)$$

- Para a fase dispersa - ar (β):

$$\nabla \bullet (r_\beta \rho_\beta \vec{U}_\beta) = 0 \quad (1.3)$$

- Conservação de momento linear:

- Para a fase contínua - água (α):

$$\begin{aligned} \nabla \bullet \left[r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha) \right] = & -r_\alpha \nabla p + \nabla \bullet \left\{ r_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \\ & r_\alpha (\rho_\alpha - \rho_{ref}) g + c_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \end{aligned} \quad (1.4)$$

- Para a fase contínua - óleo (γ):

$$\nabla \bullet \left[r_\gamma (\rho_\gamma \bar{U}_\gamma \otimes \bar{U}_\gamma) \right] = -r_\gamma \nabla p + \nabla \bullet \left\{ r_\gamma \mu_\gamma \left[\nabla \bar{U}_\gamma + (\nabla \bar{U}_\gamma)^T \right] \right\} + r_\gamma (\rho_\gamma - \rho_{ref}) g + c_{\gamma\alpha}^{(d)} (\bar{U}_\alpha - \bar{U}_\gamma) \quad (1.5)$$

- Para a fase dispersa - ar (β):

$$\nabla \bullet \left[r_\beta (\rho_\beta \bar{U}_\beta \otimes \bar{U}_\beta) \right] = -r_\beta \nabla p + \nabla \bullet \left\{ r_\beta \mu_\beta \left[\nabla \bar{U}_\beta + (\nabla \bar{U}_\beta)^T \right] \right\} + r_\beta (\rho_\beta - \rho_{ref}) g + c_{\beta\gamma}^{(d)} (\bar{U}_\gamma - \bar{U}_\beta) \quad (1.6)$$

A equação da energia não foi usada, já que o sistema é isotérmico. Tendo em vista que a água escoou no refino turbulento, considerou-se o modelo k - ϵ como modelo de estudo.

Para fluxos multifásicos, considerando o modelo k - ϵ , são acrescentados os termos referentes à transferência interfacial para energia cinética turbulenta ($T_{\alpha\beta}^k$) e para taxa de dissipação turbulenta ($T_{\alpha\beta}^\epsilon$):

- Para a energia cinética turbulenta:

$$\nabla \bullet \left\{ r_\alpha \left[\rho_\alpha \bar{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = r_\alpha (P_\alpha - \rho_\alpha \epsilon_\alpha) + T_{\alpha\beta}^k \quad (1.7)$$

- Para a taxa de dissipação turbulenta:

$$\nabla \bullet \left[r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha \epsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_\alpha \right] = r_\alpha \frac{\epsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_{\epsilon 1} P_\alpha - C_{\epsilon 2} \rho_\alpha \epsilon_\alpha) + T_{\alpha\beta}^\epsilon \quad (1.8)$$

onde k_α , ϵ_α e $\mu_{t\alpha}$ correspondem, respectivamente, a energia cinética turbulenta, a taxa de dissipação turbulenta e a viscosidade turbulenta da fase contínua (α). $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k e σ_ϵ são constantes, cujos valores são: 1.44; 1.92; 1.0 e 1.3, respectivamente.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades termofísicas dos fluidos para os casos simulados na temperatura de 298 K..

Tabela1 – Propriedades termofísicas dos fluidos.

Propriedade	Fase contínua (água)	Fase dispersa (óleo)	Fase dispersa (ar)
Densidade (ρ : kg/m ³)	997	971	1,18
Viscosidade dinâmica (μ : Pa s)	8,899x10 ⁻⁴	5	1,831x10 ⁻⁵
Diâmetro (d_β : m)	-	-	0,000010
Tensão superficial (σ : N/m)			
(água -ar)	(água -óleo)		(ar -óleo)
0,07257	0,045		0,026

As condições de fronteira que foram especificadas para todas as variáveis em análise, para os casos estudados (casos 1, 2, 3 e 4), considerando o escoamento trifásico e as hipóteses formuladas acima, estão contidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de fronteira especificadas sobre o domínio de estudo, considerando o sistema isotérmico (298 K), para os casos 1, 2, 3 e 4.

Fronteira	Parâmetros de fronteira	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Entrada de Água	$U_{\text{água}}(m/s)$	0,6700	0,4500	0,5500	0,5400
	$r_{\text{água}}$	0,9200	0,8000	0,9400	0,9600
	$U_{\text{óleo}}(m/s)$	0,7100	0,4800	0,5700	0,5700
	$r_{\text{óleo}}$	0,0796	0,1900	0,0600	0,0396
	$U_{\text{ar}}(m/s)$	0,7500	0,5200	0,5900	0,5900
	r_{ar}	0,0004	0,0100	0,0004	0,0004
Entrada de Óleo	$U_{\text{água}}(m/s)$	0,2000	0,7100	0,6300	0,9000
	$r_{\text{água}}$	0,0100	0,0250	0,0001	0,0100
	$U_{\text{óleo}}(m/s)$	0,2200	0,8900	0,6560	0,9900
	$r_{\text{óleo}}$	0,9700	0,9700	0,9400	0,9400
	$U_{\text{ar}}(m/s)$	0,2500	0,9400	0,6900	1,0600
	r_{ar}	0,0200	0,0050	0,0400	0,0420
Parede	$A_{\text{contatada água}}$	0,9995	0,9997	0,9998	0,9997
	$A_{\text{contatado óleo}}$	0,0005	0,0003	0,0002	0,0003
	$A_{\text{contatado ar}}$	0,00000	0,0000	0,0000	0,0000
Saída	Pressão _{estática} (Pa)	101.325			

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados nesta seção referem-se às simulações executadas no software Ansys CFX 11.0.

2.1. Validação Experimental

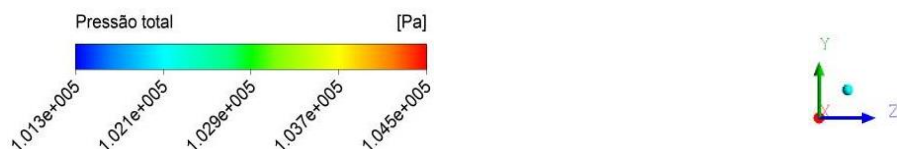
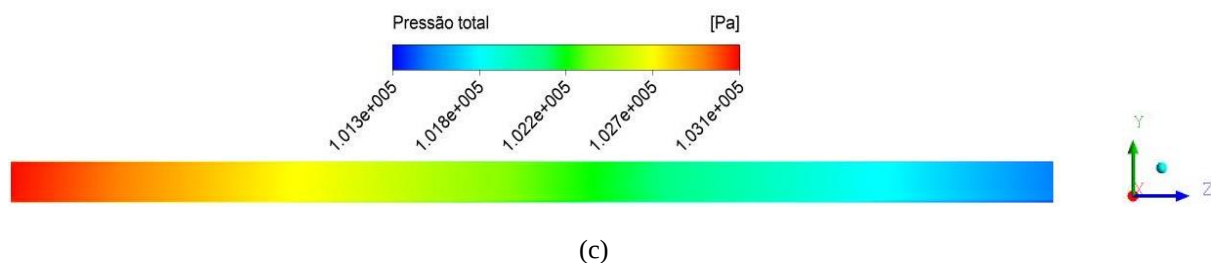
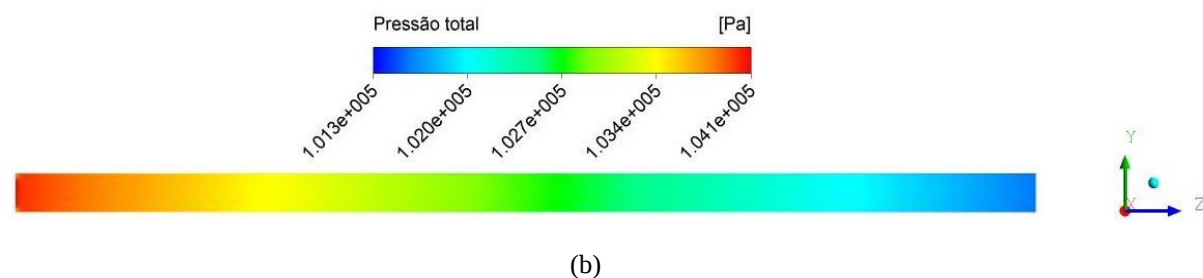
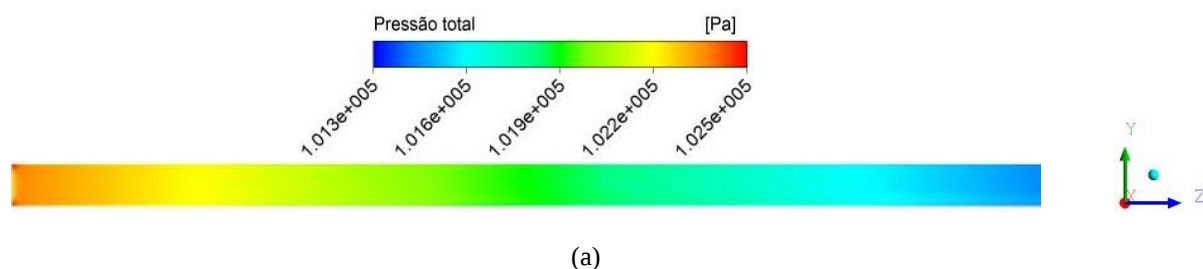
Na Tabela 3 constam os resultados da queda de pressão obtidos nas simulações dos casos 1, 2, 3 e 4 e os obtidos experimentalmente por Trevisan (2003). Estas simulações tiveram como objetivo validar o modelo matemático adotado para representar o comportamento hidrodinâmico do escoamento trifásico água – óleo pesado - ar no interior do duto horizontal.

Tabela 3 – Comparação entre os resultados da queda de pressão (ΔP) obtidos nas simulações (casos 1, 2, 3 e 4) e os obtidos experimentalmente por Trevisan (2003).

Caso	ΔP (Pa)		Erro (%)
	Simulado	Experimental (Trevisan, 2003)	
1	256	243,5	4,9
2	656	637,0	2,9
3	435	443,8	2,0
4	741	794,8	7,3

Observando-se a Tabela 3 constata-se que a modelagem adotada para representar o problema físico mostrou-se adequada, já que a comparação entre os dados experimentais de queda de pressão obtidos por Trevisan (2003) e os resultados numéricos obtidos em simulação apresentaram diferenças sempre inferiores a 10%; erro nesta ordem é considerado aceitável em simulação.

A Figura 6 ilustra os campos de pressão que se estabeleceram no interior do duto ao longo do escoamento, para os casos 1, 2, 3 e 4. Observando-se esta figura, constata-se que ocorreram quedas de pressão (ΔP) ao longo do duto, onde a pressão máxima encontra-se na entrada do duto (extremidade esquerda do duto) e a mínima na saída (extremidade direita do duto). Tal comportamento era naturalmente esperado, já que para um fluido deslocar-se é necessário que haja gradiente de pressão. Este deslocamento ocorre sempre no sentido decrescente da queda de pressão; nos casos analisados, da esquerda para a direita.





(d)

Figura 6 – Campo de pressão sobre o plano yz para os casos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

3. REFERÊNCIAS

CFX SOLVER THEORY, Manual Ansys CFX 10.0, ANSYS, 2005.

Chen, P., Sanyal, J., Dudukovic, M. P. Numerical simulation of bubble columns flows: effect of different breakup and coalescence closures. **Chemical Engineering Science**. Vol. 60, pp 1085 – 1101. (2005).

Ishii, M., Zuber, N. **Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet and particulate flow**. AIChE Journal., Vol 25, pp 834 – 854. (1979) *apud* Manual CFX 10.0. Ansys, Harwell, UK, (2005).

Trevisan, F. E. **Padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado, água e ar**, Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

4. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELING AND SIMULATION DRAIN WATER VOID - HEAVY OIL - AIR IN PIPELINES HORIZONTAL

First Author's Name, e-mail¹

Second Author's Name, e-mail²

Third Author's Name, e-mail³

Fourth Author's Name, e-mail⁴

Fifth Author's Name, e-mail⁵

Sixth Author's Name, e-mail⁶

¹Institution and address for first author

²Institution and address for second author

³Institution and address for Third author

⁴Institution and address for Fourth author

⁵Institution and address for Fifth author

⁶Institution and address for Sixth author

Abstract. *In this article numerical simulation was employed to study the fluid dynamic behavior of a three-phase flow system comprised by water-heavy oil- air. The focus was on the transport of heavy oils and ultraviscous in horizontal pipelines, using the technique "core annular flow" in isothermal system. The results obtained were compared with experimental data and showed that Conclusively, the mathematical model approach was adequate for the physical representation of the of three-phase flow water- heavy oil -air, as well it was able to predict pressure drops along of duct.*

Keywords: Core-flow, Numerical simulation, Multiphase flow.