

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE PETRÓLEO E ÁGUA EM DUTOS CILÍNDRICOS HORIZONTAIS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA VIA CFX

Jéssica Lacerda de Oliveira, jessicalacerda07@hotmail.com¹

Enivaldo Santos Barbosa, enivaldo.santos@ufcg.edu.br²

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br³

^{1,2,3}Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó- Campina Grande – Paraíba, CEP: 58429-900

Resumo: Na indústria do petróleo, os oleodutos e gasodutos de seção transversal circular são os principais meios de escoamento da produção de óleo e água, interligando as regiões produtoras, terminais marítimos, refinarias, parques de estocagem até os centros consumidores. A indústria de petróleo está interessada em estudos que buscam otimizar a produção do óleo, aumentando as vazões dos fluidos nos sistemas de transporte, de uma maneira viável, utilizando tecnologias que permitam uma maior eficiência nesses sistemas. Tubulações de seção transversal elíptica são utilizadas na indústria em trocadores de calor, condensadores de vapor, pré-aquecedores de ar através de vapor, óleo ou água quente. Sua utilização se justifica por apresentar superioridade técnica principalmente em relação às seções circulares. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo, estudar o escoamento de petróleo e água em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) (Ansys CFX). Resultados das distribuições de velocidade e pressão são apresentados e analisados, propiciando a observação de detalhes do processo muitas vezes difíceis de serem detectados experimentalmente.

Palavras-chave: simulação numérica, escoamento bifásico, duto elíptico.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico consiste em uma fase fluida e uma fase particulada ou dispersa de qualquer número de componentes químicos, podendo a fase contínua se tratar de um meio líquido ou gasoso e a fase dispersa de partículas sólidas, bolhas de gás ou gotas de líquido. Mas, a definição mais usual é a que considera um sistema multifásico como aquele em que os fluidos componentes são imiscíveis e distinguidos por interfaces (SILVA et al., 2007).

Durante o transporte de petróleo, o escoamento bifásico é frequentemente observado nas tubulações de escoamento, ocorrendo em trechos horizontais, inclinados ou verticais. Devido ao caráter complexo do escoamento multifásico diversas metodologias foram desenvolvidas com a finalidade de identificar os padrões de escoamento e estimar o gradiente de pressão no duto. O conhecimento desses parâmetros é essencial para o dimensionamento dos dutos e dos equipamentos de produção, otimizar a produção do óleo, reduzir os custos e aumentar a eficiência na extração do óleo nos reservatórios e as vazões de fluidos nos sistemas de transporte (PACHECO et al., 2007; SILVA et al., 2000).

Santos et al. (2013) estudaram o escoamento trifásico de óleo, água e gás em dutos cilíndricos circulares verticais com vazamento e observaram que quanto maior o diâmetro do vazamento, maior são as diferenças causadas nos perfis de pressão. Assim, quanto menor o vazamento, maior a dificuldade que um sensor tem de detectá-lo.

Já Sarmento et al. (2014) estudaram o comportamento hidrodinâmico do escoamento bifásico óleo-água em um duto de 2 metros de comprimento com vazamento. Para isto foi utilizado técnicas de CFD com o objetivo de avaliar a influência do vazamento no comportamento do escoamento. Com o estudo, os autores comprovaram a influência do mesmo no gradiente de pressão.

Tubulações de seção transversal elíptica são utilizadas na indústria em trocadores de calor, condensadores de vapor, pré-aquecedores de ar através de vapor, óleo ou água quente, entre outros. Sua utilização se justifica por apresentar superioridade técnica principalmente em relação aos de seções circulares (ZHU et al., 2004).

Surgiu, então, a necessidade de conhecer se tais dutos são mais eficientes do que os dutos de seção circular, em se tratando do escoamento do petróleo e água ao ser transportado sem transferência de calor. Tendo em vista a escassez de

estudos relacionados a esse tema, ter informações do gradiente de pressão e do comportamento dos fluidos em oleodutos de seção transversal elíptica, torna-se de suma importância.

Cadé et al. (2010) realizaram um estudo matemático com a finalidade de prever o comportamento do escoamento interno de gás natural em tubos cilíndricos com seção transversal elíptica. Com razão de aspecto de 1,5, a queda de pressão no duto circular com diâmetro de 0,1 m foi maior em relação ao duto elíptico.

Rossetim (2011) estudou experimentalmente a superioridade técnica e a importância da utilização de dutos com seção transversal elíptica em trocadores de calor, em relação aos de seção circular. Os resultados dos testes comprovaram ganhos de eficiência energética da ordem de 10 a 15% quando do uso de tubo elíptico.

Mota et al. (2014) simularam numericamente o escoamento turbulento transiente de gás natural em um duto de seção transversal elíptica com vazamento. Foi verificado que alguns métodos utilizados na detecção de vazamentos pela indústria de petróleo não apresentam a precisão necessária para detecção de vazamentos menores que 1 %.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo, analisar o escoamento interno de óleo e água em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) (Ansys CFX). Deseja-se, portanto, obter novas informações sobre escoamento que possam ser úteis na otimização de processos produtivos e redução impactos ambientais, e de uma forma geral, informações que sirvam como subsídios para que estudos mais aprofundados possam ser realizados e implementados na indústria do petróleo.

2. METODOLOGIA

2.1. A geometria e o problema físico

A geometria avaliada neste trabalho consiste em uma tubulação horizontal de seção transversal elíptica com 10 metros de comprimento, com escoamento multifásico composto de água e óleo. A Figura 1 representa a geometria desenvolvida para o estudo.

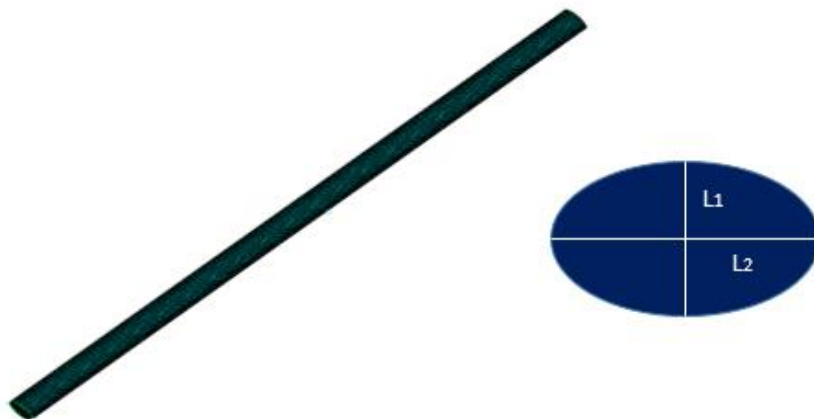
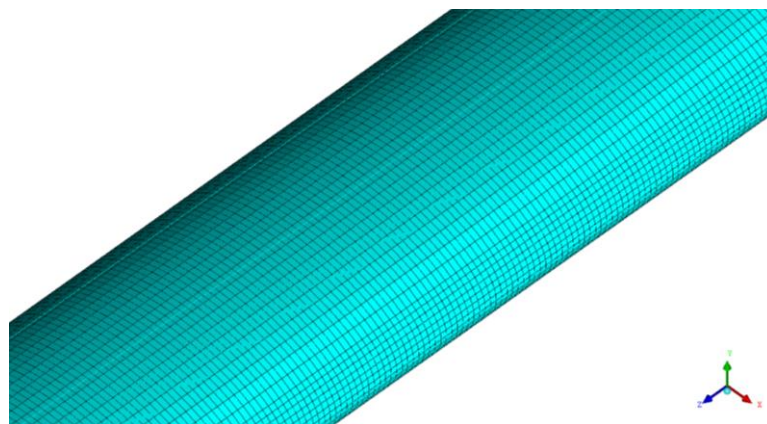
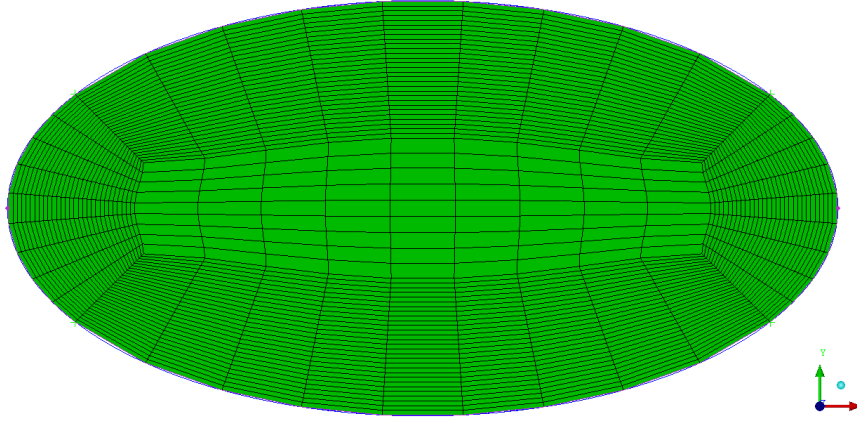


Figura 1. Geometria desenvolvida para o estudo.

Para a construção da malha, exportou-se a geometria construída no Autodesk Inventor Professional 2015 para o Icem CFD 15.0. A Figura 2 representa a malha utilizada na simulação, constituída de 581661 elementos. A malha da geometria foi definida de forma a assegurar que resultados numéricos não sofram influência da malha utilizada na simulação, bem como garantir um custo computacional adequado.



(a)



(b)

Figura 2. Representação da malha utilizada na simulação (a) lateral; (b) entrada.

A Tabela 1 apresenta os dados geométricos do duto em estudo.

Tabela 1. Dados geométricos do duto em estudo

Parâmetros	Valor
Comprimento do eixo maior - (L_2) (m)	0,2
Comprimento do eixo menor - (L_1) (m)	0,1
Comprimento do duto (L) (m)	10,0
Razão de aspecto	0,5
Diâmetro hidráulico (m)	0,2594

2.2. Modelagem Matemática

O modelo matemático proposto para o caso em estudo foi o modelo não homogêneo. As considerações feitas para o escoamento bifásico foram: escoamento permanente, tridimensional, laminar e incompressível. A modelagem matemática foi baseada nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Foi utilizado o modelo contínuo-disperso, onde o óleo consiste na fase contínua e a água a fase dispersa.

A equação de conservação de massa é dada por:

$$\frac{\partial(f_i \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_i \rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

onde, f_i , ρ , t , $\vec{U}$ são, respectivamente, a fração volumétrica da fase i , densidade, tempo e o vetor velocidade.

A equação da quantidade de movimento é definida por:

$$\frac{\partial(f_i \rho_i \vec{U}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot [f_i (\rho_i \vec{U}_i \otimes \vec{U}_i)] - f_i \nabla p_i + \nabla \left\{ f_i \mu_i \left[\nabla \vec{U}_i + (\nabla \vec{U}_i)^T \right] \right\} = \vec{S}_{mi} + \vec{M}_i \quad (2)$$

onde μ , $\vec{S}_{mi}$, $\vec{M}_i$ são, respectivamente, a viscosidade dinâmica do fluido, forças de momento devido às forças de corpo externas (força gravitacional) e forças interfaciais (arraste) agindo na fase i devido à presença de outras fases.

Para um duto cilíndrico com seção transversal elíptica é importante destacar a equação para o cálculo da área (A), do perímetro ($\bar{P}$) e do diâmetro hidráulico (D_h) (KAKAÇ et al., 1987; ROHSENOW et al., 1998):

$$A = \pi L_1 L_2 \quad (3)$$

$$\bar{P} = 4L_2 E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$D_h = \frac{\pi L_1}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

onde E representa a integral elíptica completa de 2º espécie (WOLFRAM, 1999).

Segundo Kakaç et al. (1987), o comprimento de entrada hidrodinâmico (L_{her}) e o coeficiente de fricção para a região com o regime laminar completamente desenvolvida são dados por:

$$L_{her} = \frac{0.5132}{\left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \left\{ \frac{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]}{\pi} \right\}^2 D_h \text{Re}_{Dh} \quad (6)$$

$$f_{fdr} \text{Re}_{Dh} = 2 \left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\pi}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \right\}^2 \quad (7)$$

onde Re_{Dh} é o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico.

Na região de entrada hidrodinâmica, o fator de fricção aparente é dado a partir da queda de pressão total axial desde a entrada do duto até o ponto de interesse (KAKAÇ et al., 1987):

$$\Delta P_{her}^* = \frac{P_{z=0} - P}{\rho w_m^2 / 2} = f_{her} \frac{4z}{D_h} \quad (8)$$

O fator de fricção aparente pode ser expresso como (ROHSENOW et al., 1998):

$$f_{her} \text{Re}_{Dh} = \frac{\Delta P_{her}^*}{\left(\frac{2z}{D_h \text{Re}_{Dh}} \right)} \quad (9)$$

sendo

$$\Delta P_{her}^* = \frac{2(1-\eta)(1+3\eta) - (1+\eta)^2 \ln \eta^3}{3(1+\eta)^2} \quad (10)$$

onde o termo η é obtido a partir da seguinte equação:

$$16 \left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\pi}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \right\}^2 \frac{z}{D_h \text{Re}_{Dh}} = \eta^2 - 1 - \ln \eta^2 \quad (11)$$

Na região completamente desenvolvida, o perfil de velocidade para um escoamento laminar em um duto de seção transversal elíptica é dado por (KAKAÇ et al., 1987; WHITE, 1991):

$$w(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left(-\frac{dP}{dz} \right) \frac{L_1^2 L_2^2}{L_1^2 + L_2^2} \left(1 - \frac{y^2}{L_1^2} - \frac{x^2}{L_2^2} \right) \quad (12)$$

ou ainda,

$$\frac{w}{w_m} = 2 \left(1 - \frac{x^2}{L_2^2} - \frac{y^2}{L_1^2} \right) \quad (13)$$

com

$$w_m = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dz} \left(\frac{L_1^2}{1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2} \right) \quad (14)$$

onde w_m é a velocidade média do escoamento.

A pressão total é dada por:

$$\Delta P_{overall} = \Delta P_{her} + \Delta P_{fdr} \quad (15)$$

onde, $\Delta P_{overall}$, ΔP_{her} e ΔP_{fdr} correspondem à queda de pressão total, queda de pressão na região de entrada hidrodinâmica e queda de pressão na região completamente desenvolvida.

2.3. Condições de contorno e propriedades dos fluidos

As condições de contorno e as propriedades dos fluidos utilizadas na simulação encontram-se respectivamente na Tabela 2 e 3.

Tabela 2. Condições de contorno na simulação

Condições de contorno	Velocidade (m/s)	Pressão (atm)	Fração volumétrica das fases	
			Óleo	Água
Entrada	3,0	-	0,99	0,01
Saída		0,98	-	-
Parede	0	-	-	-

Na parede do duto considerou-se a condição de não deslizamento, ou seja, $U_x = U_y = U_z = 0$ m/s.

Tabela 3. Propriedades dos fluidos usadas na simulação

	ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)	Tensão superficial (mN/m)	Diâmetro da partícula (m)
Água	997	$8,89 \times 10^{-4}$	0,072(Água/óleo)	5×10^{-5}
Óleo	905	4		-

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a metodologia utilizada neste trabalho, foram comparados os resultados analíticos com os resultados numéricos obtidos a partir do perfil de velocidade na seção transversal do duto, em $z = 6$ m, onde o perfil de velocidade encontra-se completamente desenvolvido. A Figura 3 apresenta esta comparação. Foi verificada um excelente ajuste

entre os resultados obtidos. O erro máximo obtido foi de 0,39% em $y=0$. A comparação foi possível devido ao fato de que a fração volumétrica de água é próxima de zero, o que leva a um escoamento monofásico de óleo, aproximadamente.

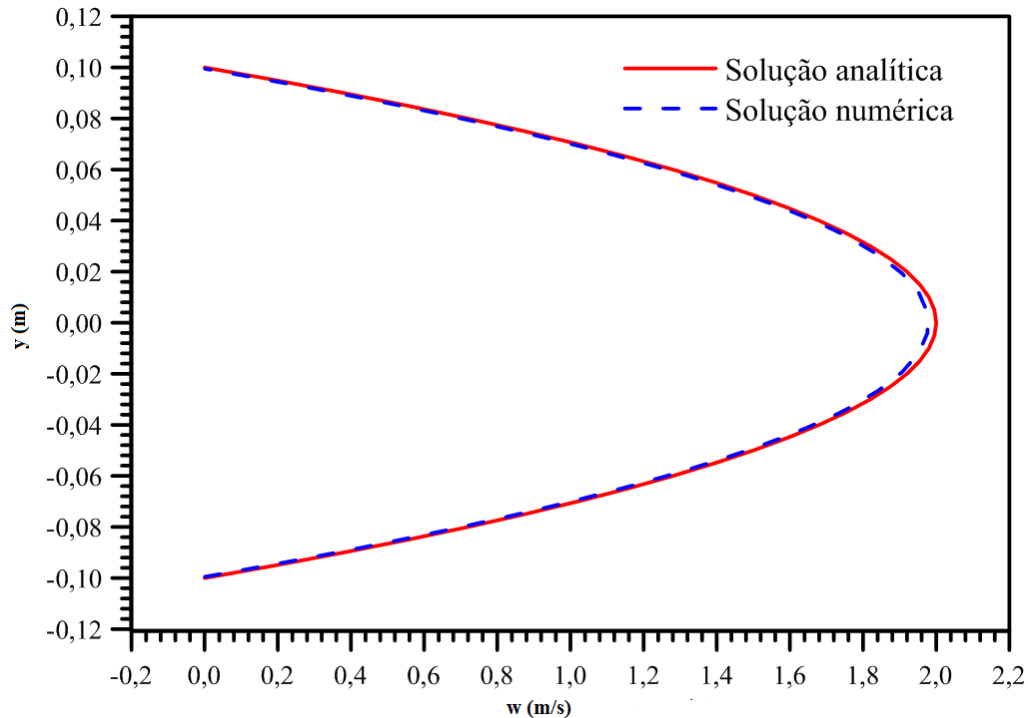


Figura 3. Comparação entre os resultados analíticos e numéricos em $z = 6$ m

De acordo com as Fig. 4, 5, 6, 7, e 8, pode-se observar que a velocidade no centro do duto possui um valor máximo, já nas paredes do duto a velocidade é zero devido a condição de não-eskorregamento. A partir de $z = 3$ m o perfil de velocidade praticamente não varia, comprovando que o escoamento se encontra na região completamente desenvolvida. Neste caso, $L_{her} = 2,786$ m.

A Figura 9 ilustra a distribuição de pressão ao longo do duto. Para que o escoamento seja garantido, é necessária uma diferença de pressão entre os pontos inicial e final do escoamento. Como esperado, ocorre uma diminuição da pressão ao longo do duto. Essa diminuição é consequência da atuação das forças viscosas ao longo do escoamento.

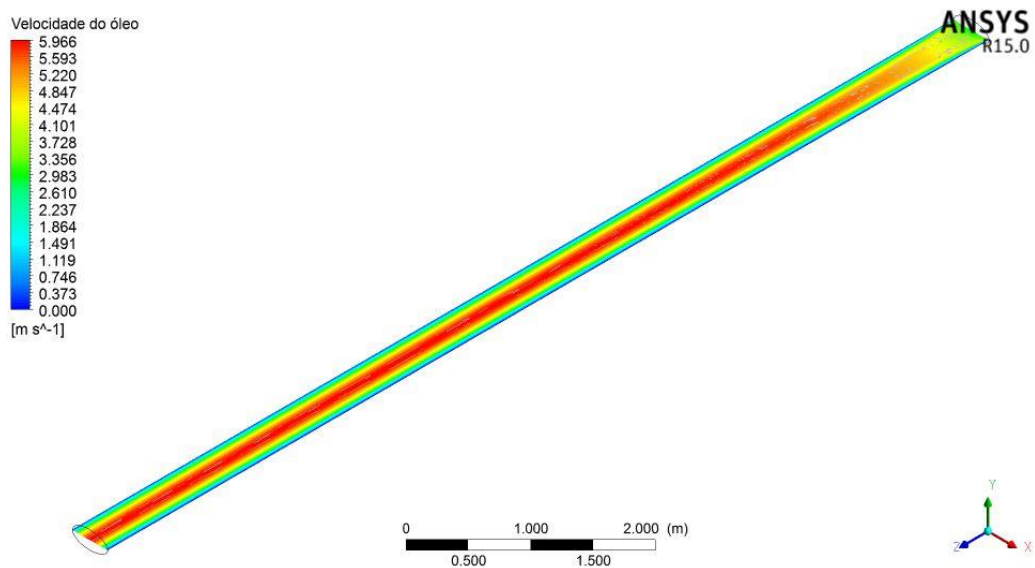


Figura 4. Perfil de velocidade do óleo sobre o plano longitudinal ZX.

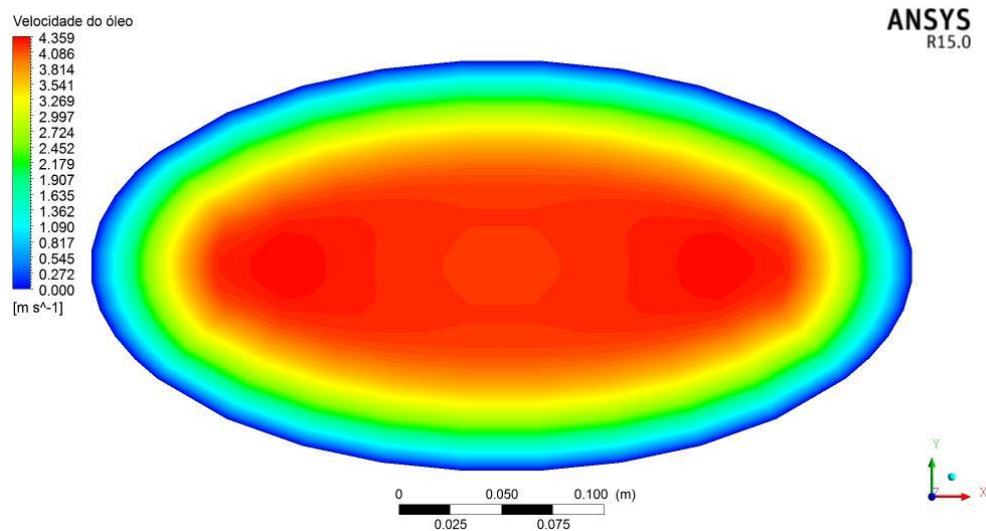


Figura 5. Perfil de velocidade do óleo no plano XY em $z = 0,3\text{m}$.

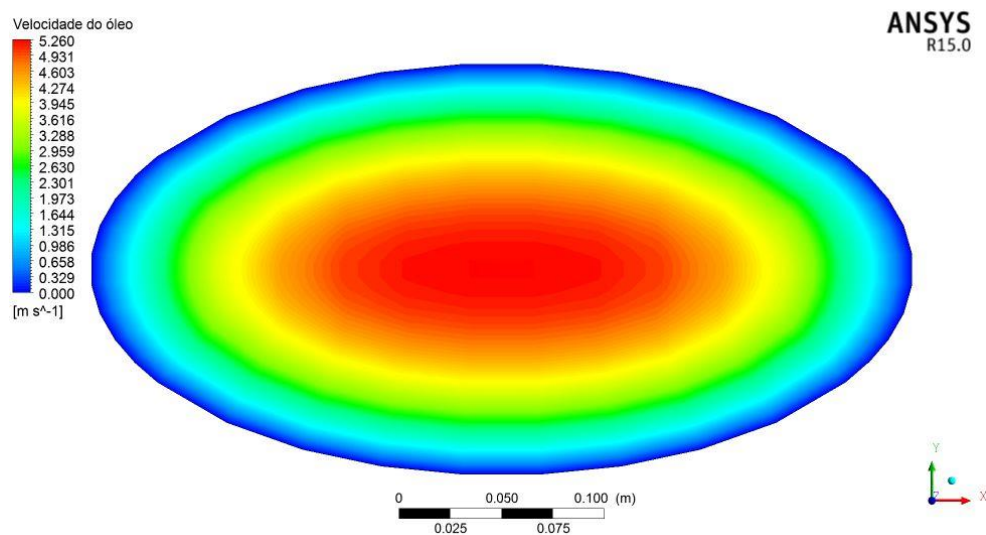


Figura 6. Perfil de velocidade do óleo no plano XY em $z = 1,0\text{m}$.

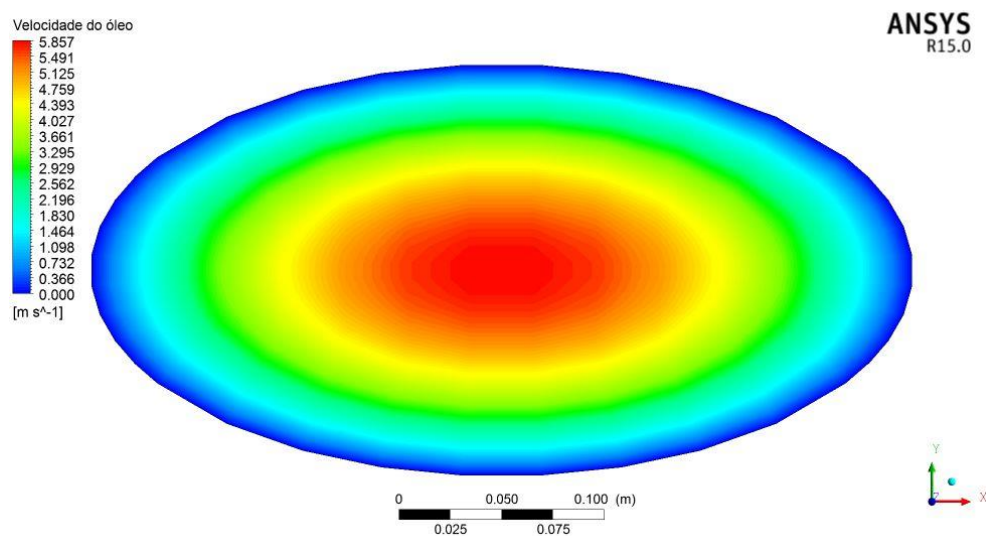


Figura 7. Perfil de velocidade do óleo no plano XY em $z = L_{\text{her}}$.

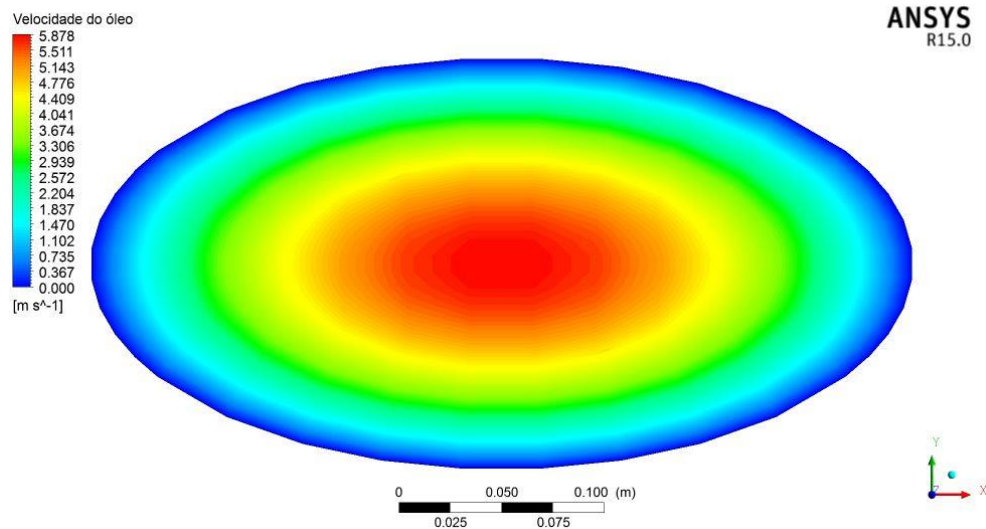


Figura 8. Perfil de velocidade do óleo no plano XY em $z = 3\text{m}$.

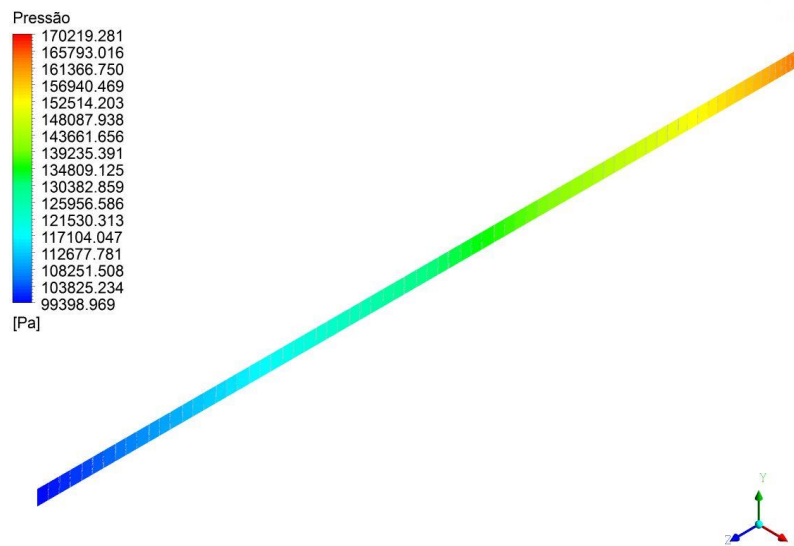


Figura 9. Distribuição de pressão sobre o plano YZ.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros obtidos neste trabalho. A Tabela 5 compara os resultados numérico e analítico da queda de pressão durante o escoamento. O erro obtido foi de 2,5 %.

Tabela 4. Parâmetros obtidos

D_h (m)	0,2594
Re_{Dh}	176,0732
L_{her} (m)	2,7866
$f_{fdr} Re_{Dh}$	16,8232
$f_{her} Re_{Dh}$	12,0399
ΔP_{her} (Pa)	21470,0
ΔP_{fdr} (Pa)	43279,9
$\Delta P_{overall}$ (Pa)	64749,9

Tabela 5. Comparação da variação de pressão analítica e numérica

Velocidade média (m/s)	$\Delta P_{analítico}$ (Pa)	$\Delta P_{numérico}$ (Pa)	Erro (%)
3,0	64749,9	66373,4	2,5

Para realizar a comparação entre um duto de seção transversal elíptica (1) e um duto de seção transversal circular (2), foi usado um duto circular ($L_1 = L_2 = 0,141421\text{m}$) com a mesma área da seção transversal do duto elíptico ($L_1 = 0,1$ e $L_2 = 0,2\text{m}$). Foi utilizada a mesma velocidade de entrada para ambos os casos. Assim, como os dutos 1 e 2 possuem a mesma área de seção transversal e a mesma velocidade de entrada, possuem também a mesma vazão mássica.

Comparando a variação de pressão obtida para o duto 2 ($\Delta P = 47363,6 \text{ Pa}$) com a variação de pressão obtida para o duto 1 ($\Delta P = 64749,9 \text{ Pa}$), pode-se observar que a variação de pressão no duto 1 é 36,7 % maior que a do duto 2.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pode-se afirmar que os campos de pressão e velocidade obtidos estão coerentes com o fenômeno real do escoamento de óleo e água.

Os perfis de velocidade obtidos numericamente apresentaram-se aproximados aos perfis de velocidade analíticos, validando-se assim, a metodologia utilizada no presente trabalho.

A comparação realizada entre um duto de seção transversal circular e um duto de seção transversal elíptica, ambos com a mesma vazão mássica, comprovou que o duto elíptico possui uma perda de carga 36,7 % maior do que o duto de seção transversal circular.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, FINEP, CNPq, ANP e PETROBRAS SA pelo suporte financeiro.

6. REFERENCIAS

- CADÉ, M.A., LIMA, A.G.B., LIMA, W.C.P.B., FARIAS NETO, S. R., 2010, **Natural gas laminar flow in elliptic cylindrical pipes: A numerical study**. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, Vol. 4, n°. 1, pp. 019-033.
- KAKAÇ, S., SHAH, R. K., AUNG, W., 1987, **Handbook of single-phase convective heat transfer**, Chapter 3: Laminar convective heat transfer in ducts, Ed. John Wiley&Sons, New York, USA, p.3.1-1.137
- MOTA, C. A. A.; LIMA, A. G. B.; ALBUQUERQUE, A. E. S.; LEITE, B. E.; BARBOSA, E. S.; NETO, S. R. F., 2014, **Escoamento transiente e turbulento de gás natural em duto cilíndrico elíptico com vazamento**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2014, Minas Gerais.
- PACHECO, F.; CAVALCANTE, C. C. P.; MENDES, J. R. P.; BANNWART, A. C.; SERAPIÃO, A. B. S., 2007 **Identificação de padrões de escoamento multifásico e determinação da perda de carga com o auxílio de redes neurais**. IV Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, Campinas.
- ROHSENOW, W. M. HARTNETT, J. P., CHO, Y. I., 1998, **Handbook of heat transfer**, Third Edition, Ed. Mc Graw-Hill, Boston.
- ROSSETIM, M. A., 2011, **Comparação de desempenho e aplicação de trocadores de calor de tubos elípticos aletados otimizados globalmente, empregados em sistemas de climatização**. 2011. 149f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SANTOS, W. R. G.; L. S.; BARBOSA, E. S.; FARIAS, S. R.; LIMA, A. G. B., 2013 **Hidrodinâmica do Escoamento Multifásico em Duto Vertical com Vazamento**. 7º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás – 7º PDPetro, Aracaju.
- SARMENTO, L. R. B.; LEITE, B. E.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B., 2014, **Hydrodynamics of oil-water with leakage by CFD**, Defect and Diffusion Forum, v. 348, p. 58-63.
- SILVA, C. B. C.; FILHO, M. J. B.; PINHEIRO, J. A., 2000, **Medição de vazão e propriedades em escoamento multifásico: solução econômica para diferentes atividades industriais**. Bol. Téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, pp. 45-50.
- SILVA, R.M; FARIAS NETO, S. R.; ALBUQUERQUE, S. F.; LIMA, A.G.B., 2007, **Simulação numérica do escoamento bifásico de petróleo e água em conexões tipo “T”**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco.
- ZHU, Y. D.; SHU, C.; QIU J.; TANI, J., 1999, **Numerical simulation of natural convection between two elliptical cylinders using DQ method**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, 2004, pp. 797–808.
- WHITE, F. M. , 1991, **Viscous fluid flow** Ed. MacGraw Hill, Inc, New York, USA, 614p.
- WOLFRAM, S., **The mathematic book**, Ed. Wolfram Research, Inc, New York, USA, 1403p.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

HYDRODYNAMICS OF WATER AND OIL TWO-PHASE FLOW IN HORIZONTAL CYLINDRICAL PIPES OF ELLIPTICAL CROSS-SECTION VIA CFX

Enivaldo Santos Barbosa, enivaldo.santos@ufcg.edu.br²

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br³

^{1,2,3}Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprigio Veloso, 882 – Bodocongó- Campina Grande – Paraíba, CEP: 58429-900

Abstract. *In the petroleum industry, oil and gas pipeline of circular cross-section are the usual means for oil and water transportation, linking the producing regions, marine terminals, refineries, storage parks to the consumer centers. The oil industry is interested in studies that seek to optimize oil production, increasing the fluid flow into the transport system, using technologies that enable high efficiency in these systems. Elliptical cross-section pipes cylindrical are used in industry in heat exchangers, steam condensers, air preheaters using steam, hot oil or hot water, and its use is justified by presenting technical majority especially in relation to the circular sections. Thus, this work aims to study the flow of oil and water in cylindrical pipes with elliptical cross-section using the computational fluid dynamics (CFD) (Ansys CFX). Results of velocity and pressure distributions are presented and analyzed, providing the details of the process often difficult to detect experimentally.*

Keywords: *numerical simulation, two-phase flow, elliptical duct.*