

REDUÇÃO DE ATRITO NO ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA-ÓLEO EM TUBOS HORIZONTAIS

Tony Herbert Freire de Andrade¹, tonyherbert2000@yahoo.com.br

Yuri Teles Damacena², yuriengmec@gmail.com

Kelen Cristina de Oliveira Crivelaro², kelencrivelaro@yahoo.com.br

Severino Rodrigues de Farias Neto¹, fariasn@deq.ufcg.edu.br

Antonio Gilson Barbosa de Lima², gilson@dem.ufcg.edu.br

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande-PB, Brasil, CEP 58429-900.

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande-PB, Brasil, CEP 58429-900.

Resumo: De toda reserva de petróleo existente no mundo, aproximadamente 70%, é representado por óleo pesado e ultraviscoso. O interesse na produção desses óleos tem aumentado nos últimos anos devido à grande quantidade de reservas acessíveis, apesar de a maior parte deste óleo encontrar-se sob uma lâmina de água com mais de 1000 m, o que exige tecnologias sofisticadas e caras para sua exploração e transporte. Este fato pode conduzir a uma menor produtividade do reservatório de óleos pesados, se comparado com a produção de óleos leves do tipo Brent. O transporte de óleos pesados e ultraviscosos é um dos principais desafios tecnológicos para a indústria de petróleo, o que está relacionado com a alta perda de carga devido ao atrito e os efeitos viscosos deste tipo de óleo. Devido a importância, o presente trabalho tem por objetivo estudar numericamente o escoamento bidirecional de óleos pesados em um tubo horizontal com 20 cm de diâmetro e 15 m de comprimento via técnica core-flow. Adotou-se o modelo de mistura para o escoamento bifásico água-óleo pesado e ultraviscoso. Foi igualmente considerado um escoamento transiente, isotérmico, sem empuxo, no regime laminar para fase óleo e turbulento para a fase água. As equações de conservação de massa, momento linear e o modelo de turbulência k - foram resolvidos via programa comercial ANSYS CFX®. Os resultados dos campos de velocidade, pressão e fração volumétrica, para uma razão de viscosidade entre as fases água e óleo pesado são apresentados e analisados. A diferença de pressão a montante e a jusante da tubulação, quando se emprega a técnica core-flow, apresentou uma redução de aproximadamente 59 vezes quando comparado ao escoamento monofásico de óleo pesado e ultraviscoso.

Palavras-chave: Core-flow, perda de carga, escoamento bifásico, simulação numérica, óleo pesado.

1. INTRODUÇÃO

O petróleo que é extraído dos reservatórios, na terra ou no mar, é transportado através de oleodutos ou navios petroleiros até os terminais marítimos (porto especial para carga e descarga). Deste ponto, o petróleo é transportado até as refinarias, onde será processado e dará origem a gasolina, diesel, gás, óleo combustível, lubrificantes, asfalto, entre outros derivados. Dentre os diferentes tipos de óleos, destaca-se os óleos pesados e ultra-viscosos. O óleo pesado é caracterizado por possuir baixo grau API (Sigla de American Petroleum Institute) entre 10° e 20° e alta viscosidade entre 100 cP e 10000 cP. Além destas características os óleos pesados possuem uma alta razão carbono/hidrogênio, grandes quantidades de resíduo de carbono, asfaltenos, enxofre, nitrogênio, metais pesados, aromáticos e/ou parafinas (Olsen e Ramzel, 1992).

Além de sua alta densidade e viscosidade, a maior parte deste óleo encontra-se sob uma lâmina de água com mais de 1000 m, o que exige tecnologias sofisticadas e caras para sua extração. Este fato pode conduzir a uma menor produtividade do reservatório de óleos pesados, se comparado com a produção de óleos leves do tipo “Brent”. Todavia, o interesse na produção de óleos pesados e ultraviscosos têm aumentado nos últimos anos por causa da grande quantidade de reserva acessível. A produção de óleo pesado impõe uma série de desafios tecnológicos, especialmente no seu transporte. Segundo Bensakhria et al. (2004), uma solução para assegurar o transporte do hidrocarboneto é reduzir os efeitos da viscosidade, por meio da adição de calor, diluição do óleo pesado com um óleo mais leve e a formação de emulsões. Outro ponto a ser considerado é que as perdas de carga causadas no transporte destes óleos também dependerão da possibilidade da presença de sólidos suspensos no meio e da ocorrência de componentes corrosivos (Silva, 2003). Dentre as diferentes técnicas para o transporte de óleos pesados e ultraviscoso destaca-se a do escoamento anular ou “Core-Annular Flow” (CAF), também conhecida como “core-flow”, caracterizada pela menor quantidade de energia necessária para bombear óleos pesados (Bannwart, 2001).

O padrão de escoamento anular é caracterizado por um filme de água que se forma rente ou adjacente a parede interna da tubulação, funcionando como um lubrificante. O óleo, por sua vez, escoo no centro do tubo, rodeado por este filme de água. Isto causa uma redução na perda de carga longitudinal, cuja a intensidade depende das características do

óleo, (Bensakhria et al., 2004). Tem-se observado na literatura trabalhos relacionados com a utilização desta técnica no sentido de aperfeiçoar o transporte de óleos pesados usando água como lubrificante, (Oliemas et al. 1987; Bai, 1995; Joseph et al., 1997; Prada e Bannwart, 2000; Bannwart, 2001; Bensakhria et al., 2004; Ko et al., 2002; Ooms e Poesio, 2003). Prada e Bannwart, (2000) observaram que a perda de pressão por atrito no escoamento lubrificado é de 700 à 2000 vezes menor que para o escoamento monofásico de óleo no mesmo tubo, enquanto que o gradiente de pressão total foi reduzido de 45 à 150 vezes. Naturalmente esta redução é dependente das características físicas do óleo e da água usadas.

Bannwart (2001) propôs uma teoria para a estabilização do padrão anular quando dois líquidos de densidades e viscosidades diferentes escoam em um tubo horizontal. A teoria baseia-se na análise da equação de momento linear numa seção transversal do duto levando em consideração o efeito da tensão interfacial. Esta teoria possibilitou realizar uma analogia interessante entre o fluxo periférico e o fluxo contornando uma bolha ascendente observados posteriormente por Marinho (2008) e Lima (2008). Bannwart (2001) sugere que as forças viscosas e inerciais no escoamento anular podem ser combinadas dentro de uma única força de arraste analogamente a que é observado no escoamento com bolhas.

O escoamento anular ideal ou perfeito (“perfect core-annular flow”, PCAF) corresponde a uma solução exata do estudo do escoamento concêntrico de fluidos com densidades iguais e viscosidade diferentes em um tubo de seção transversal circular. PCAF é um escoamento retilíneo com uma componente de velocidade que só varia com a coordenada radial. Os dois fluidos são organizados simetricamente, tendo um fluido no centro ou núcleo e o outro adjacente a parede do tubo formando um anel. No PCAF o núcleo de óleo tem uma interface cilíndrica perfeita de raio uniforme. No entanto, o efeito da gravidade tende a desordenar o escoamento em tubos horizontais e neste caso o PCAF não pode acontecer, a menos que a gravidade seja anulada. Já em tubos verticais o mesmo não acontece, pois a gravidade é concêntrica para os dois fluidos (Bai et al., 1991). O escoamento anular perfeito (PCAF – perfect core-annular flow) parece ser muito raro e só pode existir para fluidos de densidades iguais.

Alguns estudos publicados tratam de uma estrutura interfacial ondulada observada no padrão de “Core-Annular Flow”. Na literatura, dados sobre as propriedades geométricas de tais ondas são bastante escassos. O problema da estabilidade hidrodinâmica é a determinação das condições (velocidades, propriedades dos fluidos, fração de água) para as quais uma configuração estável do escoamento anular possa ser mantida. De acordo com Bai et. al. (1991) e Vara (2001), dois fatores para a instabilidade da interface água-óleo devem ser considerados: Instabilidade tipo Rayleigh-Taylor, a qual é devido ao efeito combinado da tensão interfacial e/ou gradientes de densidade desfavoráveis nos fluidos e Instabilidade tipo Kelvin-Helmholtz, decorrente do desequilíbrio das velocidades interfaciais dos fluidos; manifesta-se por uma ondulação na interface dos fluidos. Um fator que tem grande influência na estabilidade do escoamento anular é a tensão interfacial. Ela modela a curvatura na interface água-óleo e isso ajuda na compreensão da configuração do padrão “Core-Annular Flow”. Bannwart (1998) relata que, no campo hidrostático com o escoamento completamente desenvolvido, uma condição de equilíbrio pode ser estabelecida entre a tensão superficial e o empuxo. Segundo esse autor, para números de Eötvos pequenos a curvatura é circular e com o aumento do número de Eötvos o raio de curvatura torna-se progressivamente maior no topo, quando o fluido central é mais leve do que o fluido que forma o anel lubrificante. Dois modelos tentam explicar a ação das forças hidrodinâmicas causadas pelas ondulações: modelo de lubrificação, desenvolvido pela Shell Oil Co, nos anos 80 na Holanda, juntamente com a Delf University of Technology, liderado por G. Ooms e R. V. A. Oliemans; e o modelo de levitação (Lift) hidrodinâmica, desenvolvido na Universidade de Minnesota, dirigido por Daniel D. Joseph (Vara, 2001).

O modelo de lubrificação propõe que o movimento ondulado do núcleo de óleo com respeito à parede da tubulação gera um gradiente de pressão na região anular exercendo forças na direção vertical, contrabalanceando as forças de empuxo sobre o núcleo devido à diferença de densidade. Sendo assim, a presença das ondas é de fundamental importância na lubrificação do núcleo. Se a amplitude destas ondas for nula, o núcleo alcança a parte superior do duto, ou seja, a parede da tubulação (Ooms et al., 1984). A teoria de lubrificação é válida quando a inércia é desprezada (Teoria de Lubrificação de Reynolds), quando a amplitude da onda é pequena e a velocidade radial é desprezada (Bai, 1995). O modelo de levitação ou sustentação explica que os mecanismos inerciais, os mesmos que regem a levitação de um aerofólio, são igualmente responsáveis pela estrutura do escoamento anular, onde a alta velocidade relativa faz com que o núcleo de óleo flutue no anel formado pelo fluido menos viscoso, que neste caso é a água.

Ooms e Poesio (2003) analisaram o escoamento anular em regime estacionário em um tubo horizontal e propuseram um modelo teórico baseado na teoria de lubrificação hidrodinâmica. De acordo com este modelo, foi observado um movimento harmônico no escoamento anular, ou seja, o fluido mais viscoso (óleo) se movimentou de forma ondulada no centro do tubo horizontal; tal comportamento é conhecido por “Wavy Core- Annular Flow” (WCAF). Ko et al. (2002) usaram o método dos elementos finitos para simulação de ondas turbulentas no padrão “Core-Annular Flow” via o modelo de turbulência ω . Eles estudaram o comportamento das ondas quanto ao comprimento, gradiente de pressão, distribuição de pressão na interface água-óleo e o formato das ondas variando com o número de Reynolds e a razão volumétrica entre óleo e água. Segundo Preziosi et al. (1989) as perturbações do “Core-Annular Flow” são estáveis quando o comprimento das ondas for infinitamente pequeno (para um número de Reynolds tendendo a zero) e quando a relação entre o raio do tubo e o raio da interface não exceder um valor crítico que depende da relação de viscosidade. Uma das perguntas centrais com relação ao “Core-Annular Flow” em um tubo horizontal é: de que maneira a força de empuxo no núcleo de óleo, resultado de qualquer diferença de densidade entre óleo e água, será contrabalanceada? Diante disto, um modelo teórico foi desenvolvido por Ooms et al. (1984) que dá uma possível resposta para esta pergunta. Nesse modelo foi assumido que a viscosidade do óleo é tão alta que qualquer variação na

forma da interface de água-óleo com o tempo, pode ser negligenciada. Desta maneira, foi assumido que o núcleo de óleo é um sólido e assim a interface passou a ser uma interface de sólido-líquido. De acordo com este modelo, um movimento ondulado do núcleo de óleo induz a variações de pressão no filme formado por água, o qual pode exercer uma força no núcleo no sentido vertical. Esta força pode ser tão grande que contrabalança a força de empuxo no núcleo formado por óleo, permitindo um escoamento anular estável.

Várias observações experimentais têm mostrado que ondas são formadas na interface água-óleo conduzindo a WCAF (Bai et al., 1991). Estes autores apresentaram resultados experimentais em tubos verticais lubrificado por água com escoamento ascendente e descendente. De acordo com estes autores, no escoamento ascendente o óleo tende a se manter flutuando de forma concêntrica ao eixo do tubo devido ao centro de gravidade, o gradiente de pressão e o empuxo têm a mesma direção, ondas se desenvolvem e as forças de lubrificação juntamente com a força de empuxo tendem a estender as ondas.

Rodriguez e Bannwart (2006) realizaram um estudo experimental sobre a interface água-óleo em um escoamento anular vertical, onde foi avaliada a amplitude das ondas, o comprimento, a velocidade e o perfil das ondas. Segundo os autores, a amplitude da onda diminui de forma abrupta até certa razão de injeção de óleo e água. Porém, assim que o óleo tende a preencher todo o volume do tubo, a diminuição da amplitude se torna muito mais lenta; esta diminuição da amplitude é devida principalmente ao aumento do raio mínimo da onda. Sendo assim, há uma função linear clara entre o raio da onda e o seu comprimento.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo estudar numericamente o escoamento bidirecional e transiente de óleos pesados em um tubo horizontal com 20 cm de diâmetro e 15 m de comprimento via técnica core-flow, usando o programa comercial ANSYS CFX®.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelagem Matemática

O escoamento de óleos pesados e ultraviscosos em dutos, usando água como fluido lubrificante, é governado pelas leis gerais de conservação:

2.1.1. Equação da Continuidade

É dada por :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathcal{f}_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\mathcal{f}_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha) = \mathcal{S}_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (1)$$

onde \mathcal{f}_α é a fração volumétrica da fase α ; ρ_α é a densidade da fase α ; \mathbf{U}_α é o vetor velocidade da fase α . α e β são fases.

Os termos de fonte de massa \mathcal{S}_{MS} e o termo de difusividade mássica $\Gamma_{\alpha\beta}$ foram desconsiderados, o que permite escrever Eq. (1) como sendo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathcal{f}_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\mathcal{f}_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha) = 0 \quad (2)$$

2.1.2 Equação da Quantidade de Movimento

É dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\mathcal{f}_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha) + \nabla \cdot [\mathcal{f}_\alpha (\rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha)] = & -\mathcal{f}_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \left\{ \mathcal{f}_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \mathbf{U}_\alpha + (\nabla \mathbf{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \\ & + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \mathbf{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \mathbf{U}_\alpha) + \mathcal{S}_{M\alpha} + \mathcal{M}_\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

onde o sub-índice α é o indicador de fase no escoamento bifásico água-óleo pesado e ultraviscoso, μ é a viscosidade dinâmica, p é pressão, $\mathcal{S}_{M\alpha}$ representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume. No termo referente a transferência de momento induzida pela transferência de massa interfacial (terceiro termo do lado direito da igualdade) os sub-índices α e β correspondem as fases envolvidas, água-óleo pesado e ultraviscoso, $\Gamma_{\alpha\beta}^+$ corresponde à taxa de fluxo mássico por unidade de volume da fase β para a fase α e vice-versa, \mathcal{M}_α descreve a força total por unidade de volume (força de arraste interfacial, força de sustentação, força de lubrificação de parede, força de massa virtual, força de dispersão turbulenta, etc.) sobre a fase α devido à interação com a fase β . No caso do

modelo de mistura é considerado apenas o arraste total exercido pela fase β sobre a fase α por unidade de volume, $D_{\alpha\beta}$, dado por:

$$D_{\alpha\beta} = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} \left| \vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right| \left(\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right) \quad (4)$$

onde C_D é o coeficiente de arraste no qual foi assumido um valor igual a 0,44 e $\rho_{\alpha\beta}$ corresponde a densidade da mistura dada por:

$$\rho_{\alpha\beta} = f_\alpha \rho_\alpha + f_\beta \rho_\beta \quad (5)$$

A densidade de área interfacial por unidade de volume, $A_{\alpha\beta}$ é dada por:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{f_\alpha f_\beta}{d_{\alpha\beta}} \quad (6)$$

onde $d_{\alpha\beta}$ é o coeficiente de escala de comprimento da mistura (considerou-se este parâmetro como sendo igual a 1mm).

Os efeitos da gravidade não foram levados em consideração em virtude da proximidade das densidades das fases envolvidas. Não há reações químicas nem tampouco transferência de massa interfacial. O termo de transferência de massa interfacial não foi levado em consideração tendo em vista que a transferência de massa interfacial na equação de quantidade de movimento é usada para uma fase sólida dispersa representando uma força adicional devido a colisões entre partículas (ANSYS, CFX-Theory Manual, 2005), logo a Eq. (3) reduz a;

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \right) + \nabla \cdot \left[f_\alpha \left(\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha \right) \right] = - f_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + \left(\nabla \vec{U}_\alpha \right)^T \right] \right\} + M_\alpha \quad (7)$$

2.1.3 Modelo de Turbulência $k-\varepsilon$

O modelo de turbulência $k-\varepsilon$ é um modelo de viscosidade turbulenta no qual se assume que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta, (idealização conhecida como hipótese de Boussinesq). Modelos deste tipo são baseados numa viscosidade turbulenta (CFX®, 2005).

A característica destes tipos de modelos é que duas equações de transporte modeladas, separadamente, são resolvidas para o comprimento turbulento e a escala de tempo ou para quaisquer duas combinações linearmente independentes delas. As equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k e a taxa de dissipação turbulenta, ε são:

$$\frac{\partial (\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \left[\rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{tx}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho_\alpha f_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{tx}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (9)$$

onde G_α é a geração de energia cinética turbulenta no interior da fase α , C_1 e C_2 são constantes empíricas. Ainda nesta equação, ε_α corresponde a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase α e k_α a energia cinética turbulenta para a fase α , respectivamente, definidas por:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu \bar{q}_\alpha^3}{l_\alpha} \quad (10)$$

$$k_\alpha = \frac{\bar{q}_\alpha^2}{2} \quad (11)$$

onde L_α é o comprimento de escala espacial, q_α é a escala de velocidade, c_μ é uma constante empírica calculada por:

$$c_\mu = 4c_\alpha^2 \quad (12)$$

onde c_α também é uma constante empírica, μ é a viscosidade dinâmica da fase α , μ_{tx} corresponde a viscosidade turbulenta, definida por:

$$\mu_{tx} = c_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha} \quad (13)$$

onde as constantes utilizadas nas equações anteriores são: $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

2.1.4 Condições Iniciais e de Fronteira

Foi considerado que a tubulação, rugosa inicialmente, estava cheia com água.

- a) Na seção anular referente à entrada de água foi adotado um valor prescrito e não nulo para a componente de velocidade normal e fração volumétrica de água, ou seja:

$$R - \Delta r < r < R \Rightarrow \begin{cases} U_A^N = U_A \\ f_A = 1 \\ U_o^N = f_o = 0 \end{cases}$$

onde U^N corresponde a componente de velocidade normal a seção de entrada de água.

- b) Na seção referente à entrada de óleo foi adotado um valor prescrito e não nulo para a componente de velocidade e para fração volumétrica de óleo na direção z e nulo para as componentes nas direções r e θ , ou seja:

$$0 < r < R - \Delta r \Rightarrow \begin{cases} U_o^z = U_o \\ f_o = 1 \\ U_o^r = U_A^r = U_A^\theta = f_A = 0 \end{cases}$$

- c) Nas fronteiras referentes as paredes da tubulação foi considerada a condição de não deslizamento, ou seja:

$$\begin{aligned} U_A^r = U_A^\theta = U_A^z &= 0 \\ U_o^r = U_o^\theta = U_o^z &= 0 \end{aligned}$$

- d) Na seção de saída foi prescrito uma pressão estática constante $p_{est} = 98100$ Pa.

Na Tabela (1) estão ilustradas as propriedades referentes aos fluidos (água e óleo pesado e ultraviscoso) usadas no presente trabalho.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas dos fluidos usados neste trabalho.

Propriedades físicas	Água	Óleo pesado
Densidade (kg/m ³)	997	905
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	8,89 x 10 ⁻⁴	12,0
Velocidade (m/s)	0,8	0,4
Tensão superficial (N.m ⁻¹)	0,072	

2.2. Geração da Malha

A Figura (1) ilustra a representação fictícia da tubulação usada para o estudo do escoamento bifásico água/óleo pesado e ultraviscoso criada no módulo CFX Build do CFX® 5.5. Em virtude da simetria angular observada em escoamentos em tubos de seção transversal circular foi considerado que o domínio de estudo seria confeccionado em um espaço bidimensional sobre o plano rz. Este domínio foi criado por meio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos descrevendo o seu tamanho e o seu formato, conforme pode ser observado na Fig. (2).

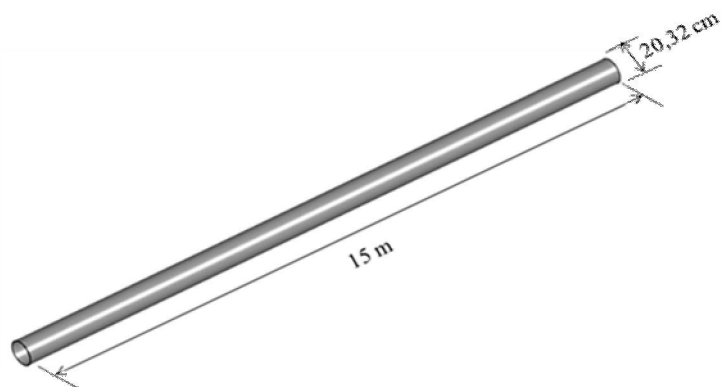


Figura 1. Representação fictícia do tubo para o escoamento óleo pesado e água.

A malha não estruturada foi confeccionada no domínio fictício bidimensional em coordenadas cilíndricas que, após diferentes refinamentos de malha e de tempo (visando a não dependência dos resultados numéricos com os mesmos), resultou em uma malha constituída por 127210 volumes de controles (84.178 tetraédricos, 42.974 prismáticos e 58 piramidais).

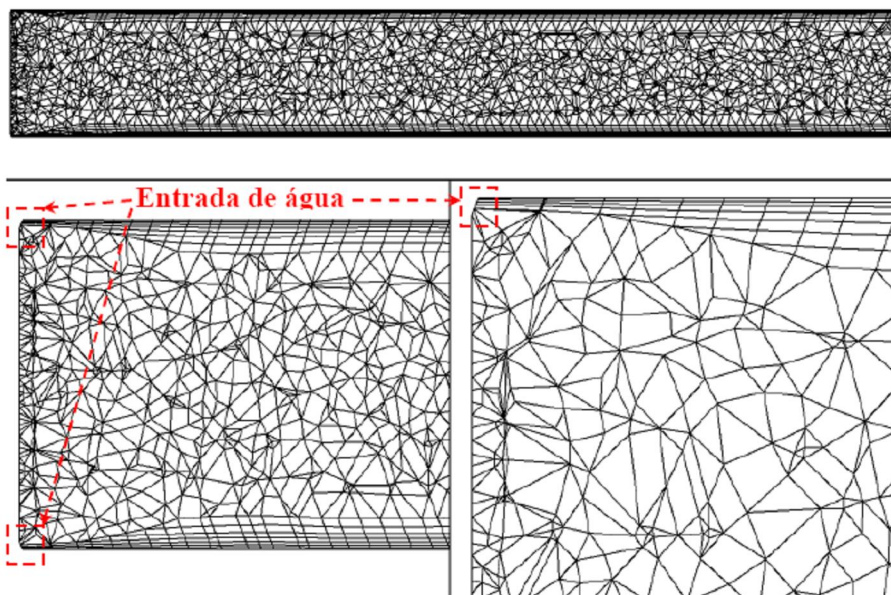


Figura 2. Representação da malha bidimensional da tubulação com detalhes na seção de entrada.

Após a elaboração da malha numérica, criou-se um arquivo com todas as informações da malha geométrica e em seguida anexado numa versão mais recente do CFX (Ansys CFX® 10.0). Este arquivo foi gerado no CFX® 5.6 e incorporado no CFX® 10.0 pré para a inclusão dos dados de entrada do processo como: modelo matemático (que corresponde a um conjunto de dados contidos no aplicativo), fluidos (newtoniano ou não-newtoniano), condições de contorno, dados iniciais, tipo de regime (laminar ou turbulento), velocidade de entrada e saída do fluido, entre outros.

A Tabela (2) mostra os modelos numéricos necessários para execução do problema (métodos de solução do sistema de equações lineares, por exemplo), além da função de interpolação, do método de acoplamento pressão-velocidade, entre outros.

Tabela 2. Condições gerais do problema e da solução numérica.

Tipo de Escoamento	Bifásico
Regime de Fluxo	Transiente
Método Numérico	Volumes Finitos
Condições do modelo	Ambientes (a 25° C e 1 atm)
Modelo	Não Homogêneo
Modelo de Transferência Interfacial	Modelo de mistura
Esquema de interpolação para a pressão	Trilinear
Esquema de interpolação para a velocidade	Trilinear
Esquema de Advecção	High Resolution
Rugosidade das paredes	4,5 x 10 ⁻⁵ m
Critério de convergência	Resíduo médio quadrático (RMS) normalizado igual a 10 ⁻⁵
Esquema transiente	Second Order Backward Euler
Intervalo de tempo (Δt)	0,5 s

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Escoamento Monofásico

Na Figura 3 apresenta-se uma comparação entre os perfis de velocidade no escoamento monofásico de óleo pesado, em $z = 10$ m da entrada, obtida numericamente com aquela obtida via solução analítica disponibilizada na literatura (Bird et al., 1960; Sisson e Pitts, 1972; Gomide, 1980). Verifica-se uma excelente concordância entre os resultados. Todavia, na comparação do escoamento monofásico de água, no regime turbulento, representado na Figura 4, foi constatado uma pequena discrepância, o que pode está associada as incertezas da solução analítica (Bird et al., 1960), bem como as incertezas do comprimento de entrada hidrodinâmico haja visto que o comprimento do duto é de apenas 15 m. De acordo com os trabalhos de Kay e Nedderman (1985) e Faccini et al. (2008), o escoamento estará totalmente desenvolvido quando o comprimento de entrada hidrodinâmico for $L_e = 80D$ e $\frac{L_e}{D} = 2,975Re^{1/4}$, para o regime de escoamento turbulento respectivamente. Ao se utilizar estas relações foram determinados os valores de L_e iguais a 16,5 m, para a primeira relação, e 10,3 m, para a segunda com $Re = 7,9 \cdot 10^4$, para um $D = 0,2064$ m, evidenciando que todo escoamento está praticamente na região de entrada hidrodinâmica.

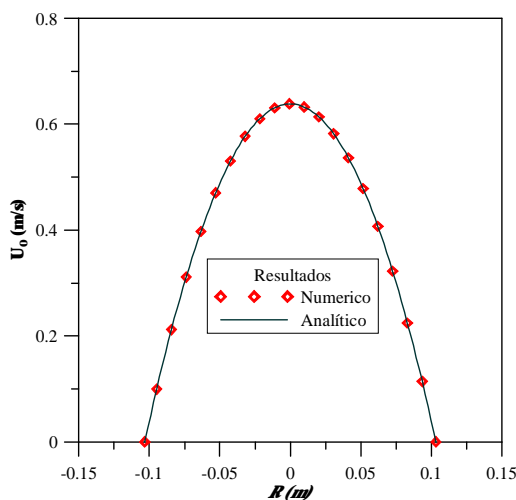


Figura 3. Comparação entre os perfis de velocidade numéricos e analíticos ($U_0 = 0,88$ e $0,4$ m/s) do óleo a 10 m da entrada do tubo (regime laminar).

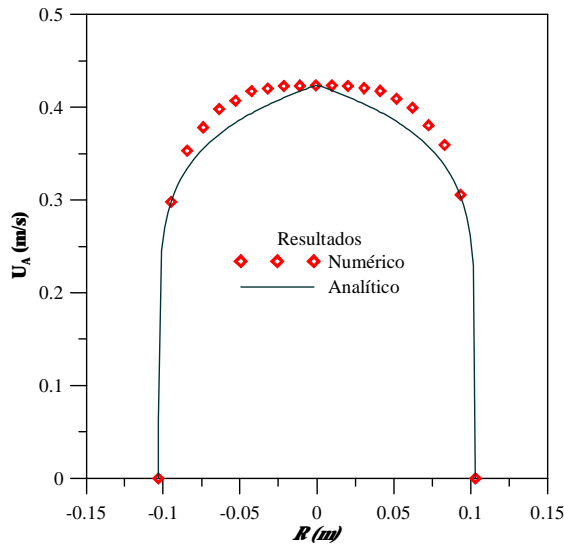


Figura 4. Comparação entre os perfis de velocidade numéricos e analíticos da água ($U_A = 0,363$ e $0,8$ m/s) a 10 m da entrada do tubo (regime turbulento).

3.2. Escoamento Core-Flow

Com a finalidade de analisar os perfis de velocidade do óleo pesado em diferentes posições no tubo (1; 5; 10 e 14 m), para um tempo de processo igual a 100s, são representadas na Fig.5 os valores destas componentes de velocidade em função da posição radial. Pode-se constatar que os perfis de velocidades conservam praticamente as características do perfil pistonado imposto como condição de contorno sobre a seção de entrada do óleo. Este fato está relacionando a ausência do contato direto do óleo com as paredes da tubulação, em virtude da presença de uma película de água, reduzindo substancialmente as perdas de carga por atrito. Isto é evidenciado pela súbita redução da fração volumétrica de óleo nas proximidades da parede da tubulação ($R = 0,1032$ m).

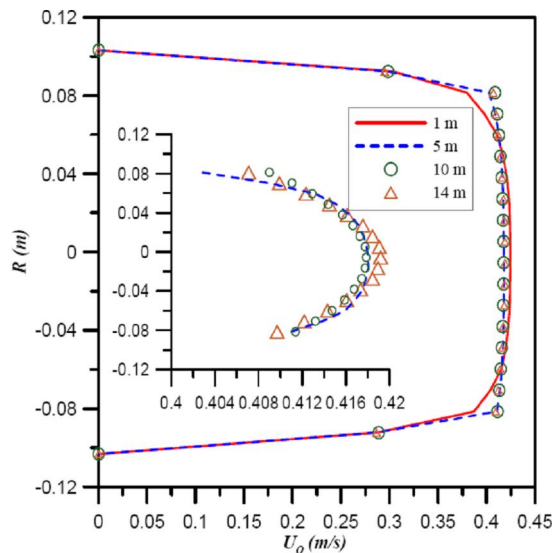


Figura 5. Velocidade do óleo na seção do duto e quatro posições axiais.

Na Figura 6 está representado o campo de pressão sobre o plano RZ, na qual se ilustra um decréscimo da pressão ao longo da tubulação, como esperado. Todavia, ao se observar o detalhe da região de alimentação da tubulação, percebe-se que os maiores gradientes estão localizados nas proximidades da seção (superior e inferior) de entrada de água, responsável pela injeção de água e, conseqüentemente, pela formação da película de água envolvendo o núcleo de óleo. A busca pela razão entre as velocidades de entrada de água e de óleo adequada, de forma que a eficiência de lubrificação da parede seja máxima (queda de pressão mínima) e, conseqüentemente, o transporte do óleo pela técnica do core-flow seja otimizado, pode ser realizada pela mudança da velocidade de água mantendo-se constante a do óleo.

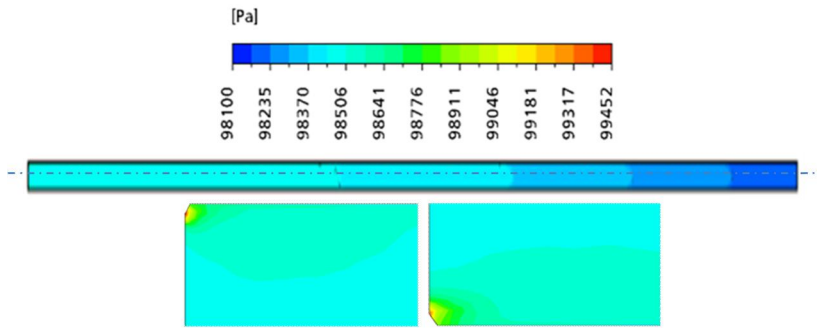


Figura 6. Campo de pressão sobre o plano rz para $U_A = 0,8$ m/s $U_O = 0,4$ m/s e $t = 150$ s.

A Figura 7 mostra igualmente uma comparação entre os escoamentos monofásicos de água e de óleo pesado com o escoamento bifásico água-óleo pesado. Verificou-se que quando o óleo esco sem a presença do filme de água, existe uma diferença de pressão entre a entrada e saída do duto de $P = 22889$ Pa, ou seja, 59 vezes maior do que a observada quando se emprega a técnica do core-flow ($P = 388$ Pa). Este aumento de pressão pode está relacionado com o atrito causado pelo contato do óleo pesado com a parede interna da tubulação, haja vista que a viscosidade do óleo pesado é muito maior do que a da água. Portanto, pode-se afirmar que a técnica “Core-Annular Flow” proporciona uma considerável redução na perda de carga, ao ponto de se afirmar que: a diferença de pressão exercida no transporte de óleo pesado usando esta técnica é comparável àquela exercida quando se escoar apenas água na tubulação ($P = 69$ Pa), chegando apenas a 5,6 vezes maior do que o escoamento monofásico de água, comportamento este também observado por Bannwart (1998), Prada e Bannwart (2000), Vara et al. (2001), Silva (2003) e Crivelaro et.al. (2009).

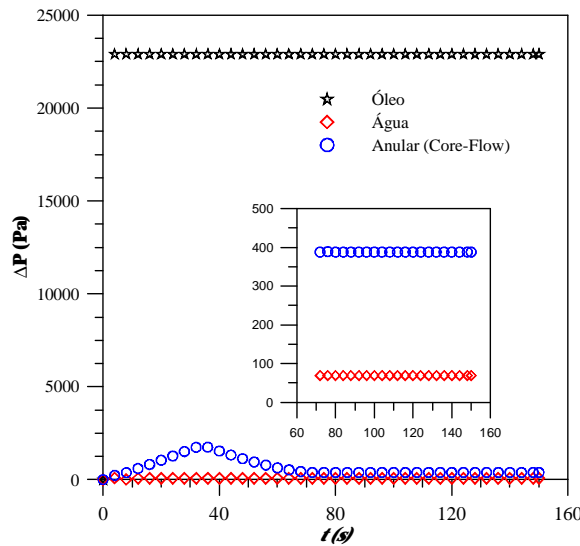


Figura 7. Comparação da queda de pressão entre os fluxos monofásicos da água, do óleo e o escoamento anular (core-flow) de água e óleo.

Na Figura 8 estão representados os valores da fração volumétrica do óleo em função da posição radial para diferentes posições na tubulação (1; 5; 10 e 14 m). Com exceção da posição axial igual a 1 m, mostra-se: (a) a fração volumétrica de óleo se mantém constante e igual a 0,97 sobre a seção formada pelo núcleo de óleo com raio de 8,33 cm; (b) uma película de água com 0,29 cm de espessura e fração volumétrica de óleo menor ou igual a 0,1; (c) uma camada de mistura entre o núcleo de óleo e a película de água com 1,7 cm e fração volumétrica de óleo entre 0,1 e 0,97 (Figura 9).

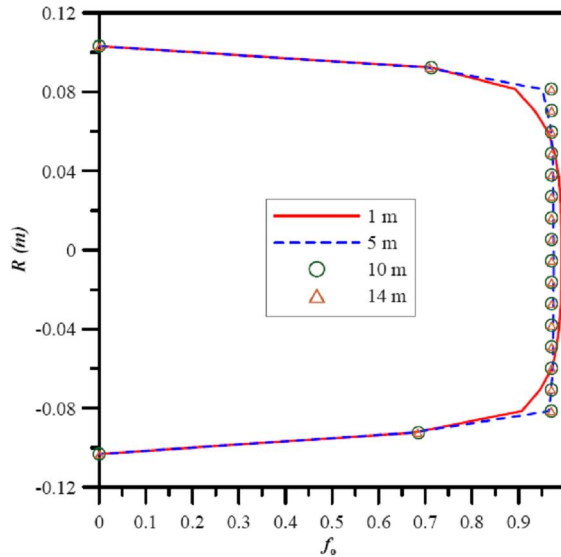


Figura 8: Fração volumétrica do óleo na seção do duto em quatro posições axiais.

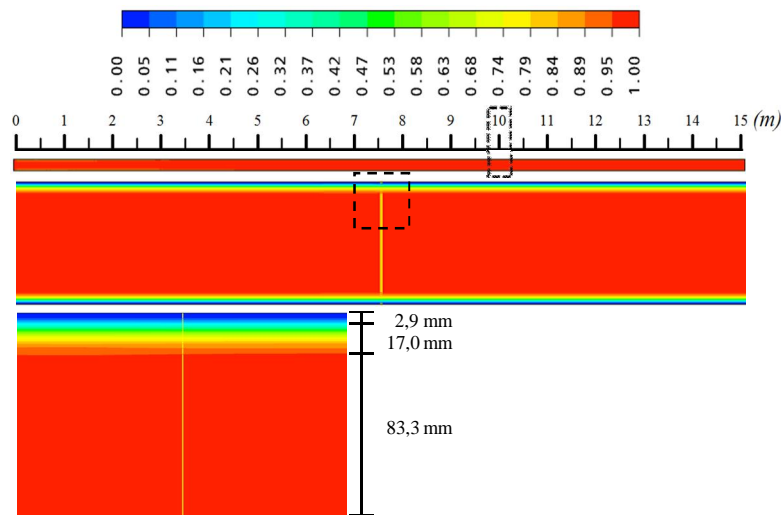


Figura 9: Representação das diferentes camadas de fluidos: película de água, camada de mistura e núcleo de óleo.

4 CONCLUSÕES

Com os resultados numéricos da simulação de transporte de óleo pesado e ultraviscoso pode-se concluir que:

Existe a presença de uma corrente de água nas proximidades da parede da tubulação formando uma película de água que envolve o núcleo de óleo escoando na região central da tubulação, caracterizando, assim, o escoamento anular ou “core-flow”;

Quarenta segundos após a água ser injetada no tubo, o padrão de escoamento converge rapidamente para o “Core-Annular Flow” e se mantém estável durante todo restante do tempo mantendo uma variação de pressão relativamente baixa de 388 Pa, entre a entrada e saída do duto;

Foi constatada uma camada de mistura intermediária entre o filme de água e o núcleo de óleo com uma espessura de 1,7 cm onde a fração volumétrica de óleo varia entre 0,1 e 0,97;

A fração volumétrica de óleo se manteve constante e igual 0,97 sobre a seção formada pelo núcleo de óleo com um diâmetro de 16,66 cm, para uma velocidade de óleo $U_O = 0,4$ m/s e a velocidade de água $U_A = 0,8$ m/s;

Foi possível observar que a técnica de lubrificação parietal para o transporte de óleos pesados e ultraviscosos, proporcionou uma redução de aproximadamente 59 vezes na perda de carga durante o escoamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq, a ANP/UFPG-PRH-25, a FINEP, a PETROBRÁS, a JBR Engenharia Ltda e o CT-PETRO, pelo apoio financeiro concedido e aos pesquisadores referenciados que com suas pesquisas, ajudaram no melhoramento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ANSYS, CFX-Theory Manual, 2005.
- Bai, R., 1995, "Traveling Waves in a High Viscosity Ratio and Axisymmetric Core Annular Flow". Ph.D. thesis, Faculty of Graduate School of the University of Minnesota, Minnesota-USA.
- Bai, R., Chen, K., Joseph, D. D., 1991, Lubricated Pipelining: Stability of Core Annular-Flow. Part 5. Experiments Comparison of Theory, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 240, pp. 97-142.
- Bannwart, A. C., 1998 Pressure Drop in Horizontal Core-annular flow. Third International Conference on Multiphase Flow (ICMF), Lyon, France, June 8-12.
- Bannwart, A. C., 2001, Modeling Aspects of Oil-Water Core-annular flows, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol., 32, Nº 2-4, pp. 127- 143.
- Bensakhria, A.; Peysson, Y.; Antonini, G., 2004, Experimental Study of the Pipeline Lubrication for Heavy Oil Transport. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, vol. 59, Nº. 5, pp. 523-533.
- Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, 1960, E. N. *Transport Phenomena*. New York, Wiley International Edition.
- Faccini, J.L.H.; Cesar, S.B.G.; Coutinho, J.A.; Freitas, S.C.; Addor, P.N., Dimensionamento de Uma Seção de Testes de Simulação de Escoamentos Bifásicos Água-Ar, http://www.instec.cu/e-books/LIBROS/Rq/enfir/R02/R02_096.PDF, Acesso em 15/10/2008.
- Gomide, R., 1980, "Operações Unitárias: Separações Mecânicas", Edição do autor, São Paulo, Brasil, 199p.
- Joseph, D. D., Bai, R., Chen, K. P., Renardy, Y. Y., 1997, Core-Annular Flows. *Annual Reviews Fluid Mechanical*, vol. 29, pp.65-90.
- Kay, J.M.; Nedderman, R.M, 1985, *Fluid Mechanics and Transfer Processes*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ko, T.; Choi, H. G.; Bai, R.; Joseph, D.D., 2002, Finite Element Method Simulation of Turbulent Wavy Core-annular flows Using a $k-\omega$ Turbulence Model Method. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 28, Nº 7, pp. 1205-1222.
- Lima, M. G. S., 2008, "Estudo Teórico/Experimental de um Reator UASB Tratando Águas Residuárias Doméstica", Tese Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande.
- Marinho, J. L. G., 2008, "Estudo do Escoamento Multifásico Tipo Bolha de Taylor em Conexões Curvadas", Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.
- Oliemans, R.V.A.; Ooms, G.; Wu, H.L.; Duijvestijn, A., 1987, The Core-annular Oil/Water Flow Turbulent-Lubricating-Film Model and Measurements in a 5 cm Pipe Loop. *International Journal Multiphase Flow*, vol. 13, Nº 1, pp. 23-31.
- Olsen, D. K. and Ramzel, E. B., 1992, "Heavy oil refining and transportation: Effect on the Feasibility of Increasing Domestic Heavy Oil Production. *Fuel*, vol. 71, No. 12, pp.1391-140.
- Ooms, G.; Poesio, P., 2003, Stationary Core-annular flow Through a Horizontal Pipe. *Physical Review*, vol. 68.
- Ooms, G.; Segal, A.; Van Der Wees, A. J.; Meerhoff, R.; Oliemans, R. V. A., 1984, A Theoretical Model For Core-Annular Flow Of a Very Viscous Oil Core and a Water Annulus Through a Horizontal Pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 10, Nº 1, pp. 41-60.
- Prada, J., W., V.; Bannwart, A., C., 2000, Modeling of Vertical Core Annular Flows and Application to Heavy Oil Production. Energy for the New Millennium February 14-17, New Orleans, LA. Proceedings of ETCE/OMAE.
- Preziosi, L.; Chen, K.; Joseph, D., D., 1989, Lubricated Pipelining: Stability of Core-Annular Flow. *Journal Fluid Mechanical*, vol., 201, pp. 323-356.
- Rodriguez, O. M. H.; Bannwart, A.C., 2006, Analytical Model for Interfacial Waves in Vertical Core-flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 54, Nº 3-4, pp. 173-182.
- Silva, R.C.R., 2003, "Alteração da Molhabilidade de Superfícies Internas de Tubulações Utilizadas no Transporte de Óleos Pesados Via Core-flow". Dissertação de Mestrado Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- Sisson, L. E., Pitts, D. R., 1979, "Fenômenos de Transporte, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 765 p.
- Vara, R.M.O., 2001, "Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Água/Óleo Pesado em um Tubo Horizontal", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

REDUCTION OF FRICTION IN TWO-PHASE FLOW WATER-OIL IN HORIZONTAL PIPE

Tony Herbert Freire de Andrade¹, tonyherbert2000@yahoo.com.br

Yuri Teles Damacena², yuriengmec@gmail.com

Kelen Cristina de Oliveira Crivelaro², kelencrivelaro@yahoo.com.br

Severino Rodrigues de Farias Neto¹, fariasn@deq.ufcg.edu.br

Antonio Gilson Barbosa de Lima², gilson@dem.ufcg.edu.br

¹Federal University of Campina Grande, Center of Science and Technology, Chemical Engineering Department, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande-PB, Brazil, CEP 58429-900.

²Federal University of Campina Grande, Center of Science and Technology, Mechanical Engineering Department, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande-PB, Brazil, CEP 58429-900.

Abstract *In the world, some areas met exceptional characteristics of nature that allowed the emergence of oil. The reserves in the world, approximately 70% is represented by heavy oil and ultraviscous. The interests by this oil have increased in recent years due to the large amount of reserves available, however, the most reserves are under a water depth of more than 1000 m, which requires sophisticated and expensive technologies for their exploitation and transportation. This fact can lead to decreased productivity of the heavy oil reservoirs, compared with the production of light oils (Brent). The transport of heavy oils and ultraviscous is a major technological challenges for the petroleum industry, which is related to the high pressure drop due to friction and effects of this type of viscous oil. Due to the importance, the purpose this study is to investigate numerically the bidirectional flow of heavy oil in a horizontal pipe with 20 cm diameter and 15 m in length by core-flow technique. We use the mixture model for two-phase flow (water-heavy oil and ultraviscous). It was also considered a non-steady, isotherma flow, buoyancy, laminar to water phase and turbulent to oil phase. The conservation equations of mass, momentum and turbulence model ($k-\epsilon$) were solved by commercial program ANSYS CFX[®]. Results of the velocity, pressure and volume fraction distribution for a viscosity ratio between the phases are presented and analyzed. The pressure drop between upstream and downstream of the pipe, when employing core-flow technique, has decreased by approximately 59 times in comparison the single-flow of heavy oil.*

Keywords: *Core-flow, pressure drop, two-phase flow, numerical simulation, heavy oil.*