

TRANSPORTE DE ÓLEOS PESADOS EM CATENÁRIAS VIA TÉCNICA CORE-FLOW - MODELAGEM E SIMULAÇÃO.

Jobsan Sueny de Sousa Santos¹, sueny_santos@yahoo.com.br

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

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

Kelen Cristina de Oliveira Crivelaro², kelencrivelaro@yahoo.com.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: *Com o aumento na demanda de energia a nível mundial a produção e o transporte de óleos pesados e ultra-viscosos em tubulações vêm tendo um papel importante no mundo. No entanto, a elevada perda de carga em consequência da alta viscosidade desses óleos tem levado a busca ou aperfeiçoamento de técnicas que minimizem estes efeitos. Nesse sentido, são apresentados os resultados do estudo numérico referente ao escoamento de óleo pesados em risers submersos, tipo catenária, empregando a técnica de core-flow, utilizando o modelo matemático considera o modelo de superfície livre para descrever o escoamento água-óleo pesado. Foi considerado um escoamento não-isotérmico e transiente, adotou-se o regime laminar para fase óleo pesado e regime turbulento para fase água, sendo aqui aplicado o modelo padrão de turbulência $k-\epsilon$. Utilizou-se ANSYS CFX 11[®] para resolução numérica do conjunto de equações diferenciais com auxílio de uma malha não estruturada com 346.075 elementos. Os resultados da velocidade, pressão, temperatura e fração volumétrica que são apresentados e discutidos. Estes resultados permitiram observar uma redução na perda de carga na catenária de 3,34 vezes com relação ao escoamento monofásico de óleo, que pode ser atribuído a presença de regiões de aderência ao longo da superfície da parede da catenária.*

Palavras-chave: Óleos pesados; Perda de carga; Não-isotérmico; Core-flow; Simulação numérica

1. INTRODUÇÃO

Os óleos pesados e ultra-pesados caracterizam-se pela alta viscosidade e altas densidades em relação ao óleo convencional, além de proporcionar resistência ao fluxo. Esses óleos surgiram em formações rochosas profundas e migraram para a região da superfície onde sofreram ação das bactérias, degradação pela intempérie e mudança de fase dos hidrocarbonetos leves. Eles são ricos em metais pesados e apresentam altos teores de carbono e enxofre, o que encarece seu refino. Embora sua produção seja competitiva, levando-se em consideração os preços atuais do petróleo, eles são vendidos a valores inferiores ao convencional em consequência dessa dificuldade de processamento pelas refinarias. Por outro lado, o acesso às fontes de óleos leves é cada vez mais difícil, fato esse que vêm motivando as empresas petrolíferas a aumentar a produção de óleos pesados e ultraviscosos.

A elevação e o transporte são grandes desafios das empresas e de pesquisadores, como uma seqüência à produção dos reservatórios petrolíferos. O transporte desses óleos em longas linhas terrestres e/ou submarinas, por exemplo, leva a uma série de desafios tecnológicos, visando à redução dos efeitos viscosos, alta confiabilidade e baixo índice de falhas. Destacam-se as técnicas de adição de calor, diluição com óleo mais leve, formação de emulsões e lubrificação das paredes da tubulação com um fluido de menor viscosidade, as quais têm por objetivo a redução da perda de carga ao longo do conduto. Nos últimos anos a técnica de lubrificação parietal ou técnica de escoamento anular ou *core annular flow* ou, simplesmente, *core-flow* tem tido uma atenção especial dos pesquisadores, em virtude de suas características de redução na perda de carga. Essa técnica permite uma importante redução nas perdas de carga no transporte de óleos pesados e ultraviscosos através de tubulações (Bai *et al.*, 1991; Prada e Bannwart, 2000; Bensakhria *et al.*, 2004; Ooms *et al.*, 2007; Andrade, 2008; Damascena, 2009). Esta técnica é baseada na injeção de um fluido de baixa viscosidade, susceptível a formar uma camada parietal entre a parede do conduto e o óleo viscoso. A deformação do fluido se faz preferencialmente na camada parietal de baixa viscosidade, proporcionando assim uma redução da perda de carga global durante o transporte (Ooms *et al.*, 1984; Bai *et al.*, 1991; Prada e Bannwart, 2000; Prada e Bannwart, 2001; Bensakhria *et al.* 2004; Andrade, 2008, Crivelaro et al., 2009).

Prada e Bannwart (2000) verificaram que, ao se transportar um óleo de viscosidade 17,6 Pa.s e densidade de 963kg/m³ à temperatura ambiente empregando a técnica do “*core-flow*”, ocorre uma redução do gradiente de pressão total entre 45 e 150 vezes em comparação com aquela obtida quando o óleo escoar sozinho na tubulação.

Bensakhria *et al.* (2004) avaliaram experimentalmente o transporte de um óleo pesado com viscosidade de 4,74 Pa.s a uma temperatura constante de 19,7°C. Eles observaram uma redução na perda de carga acima de 90% comparada àquela obtida com o mesmo óleo escoando sem a lubrificação parietal, ou seja, sem aplicar a técnica do “*core-flow*”. Estes autores observaram igualmente que a diferença de densidade entre a água e o óleo tem um papel importante no comportamento do escoamento.

Andrade (2008) estudou numericamente o escoamento anular tipo “*core-flow*” em uma tubulação de 15 m de comprimento e 20 cm de diâmetro para transportar um óleo pesado de viscosidade igual a 12 Pa.s usando o ANSYS CFX[®] 10.0. O autor adotou um escoamento bidirecional, transiente, escoamento laminar para fase óleo e turbulento para a fase água tratado com o modelo *k-ε*; observou uma redução de 59 vezes na perda de carga se comparado com o escoamento de óleo sozinho na tubulação. Mostrou ainda que há uma diminuição na queda de pressão na tubulação com o aumento da velocidade de água. O autor atribuiu esse comportamento à redução do atrito em consequência da presença do filme de água, favorecendo assim a formação de um núcleo de óleo que praticamente não entra em contato com a parede da tubulação.

Vários autores relatam que a principal dificuldade na utilização da técnica “*core-flow*” é impedir a quebra do escoamento anular e o conseqüente toque do óleo na parede da tubulação, o que causaria um aumento brusco da perda de carga, levando, na maioria das vezes, ao rompimento ou explosão da tubulação (Prada e Bannwart, 1999; Trevisan, 2003). A sua estabilidade hidrodinâmica é fortemente dependente das velocidades e propriedades dos fluidos e da fração de água utilizada.

Com base nestas informações, a proposta do presente trabalho é apresentar e discutir os resultados numéricos, obtidos com auxílio do programa comercial ANSYS CFX 11[®], do escoamento não-isotérmico de óleos pesados em *risers* submersos do tipo catenária empregando a tecnologia de *Core Annular Flow*.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

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

Equação da Continuidade

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

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, \mathcal{S}_{MS} é o termo de fonte de massa e $\Gamma_{\alpha\beta}$ é o termo de difusividade mássica.

Equação da Quantidade de Movimento

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\mathcal{f}_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha) + \nabla \cdot [\mathcal{f}_\alpha (\rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha)] = & -\mathcal{f}_\alpha \nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mathcal{f}_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \mathbf{U}_\alpha + (\nabla \mathbf{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \\ & + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \mathbf{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \mathbf{U}_\alpha) + \mathcal{S}_{M\alpha} + \mathcal{M}_\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

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 interfacial por unidade de volume sobre a fase α devido a interação com a fase β . Esta força é uma soma de diversas parcelas referentes às forças de arraste interfacial, de sustentação, de massa virtual, de lubrificação na parede e de interação partícula-fluido. No caso do modelo de mistura apenas a força de arraste interfacial é considerada. Neste caso, esta grandeza é dada por:

$$\mathcal{M}_\alpha = C_{Dp} \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} \left| \mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha \right| \left(\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha \right) \quad (3)$$

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:

$$\rho_{\alpha\beta} = f_{\alpha}\rho_{\alpha} + f_{\beta}\rho_{\beta} \quad (4)$$

E a viscosidade da mistura é dada por:

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

$A_{\alpha\beta}$ corresponde a densidade de área interfacial, que ao se considerar o modelo de superfície livre, esta é definida como sendo:

$$A_{\alpha\beta} = |\Delta \mathcal{L}_{\alpha}| \quad (6)$$

No presente trabalho foi levado em consideração os seguintes pontos, em relação à hidrodinâmica do escoamento: (a) Não há transferência de massa interfacial entre as correntes de água e óleo; (b) Não há reações químicas; (c) Foi admitido o modelo de superfície livre no cálculo do arraste interfacial; (c) Foi considerado o efeito da gravidade; (d) As viscosidades da água e do óleo pesado foram admitidas como uma função da temperatura; (e) Não se considera o termo fonte de massa, $\mathcal{S}_{M\alpha}$.

Com estas considerações as Eq. (1) e (2) reduzem-se a:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha}\rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (f_{\alpha}\rho_{\alpha}\mathbf{U}_{\alpha}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha}\rho_{\alpha}\mathbf{U}_{\alpha}) + \nabla \cdot [f_{\alpha}(\rho_{\alpha}\mathbf{U}_{\alpha} \otimes \mathbf{U}_{\alpha})] = -f_{\alpha}\nabla p_{\alpha} + \nabla \cdot \left\{ f_{\alpha}\mu_{\alpha} \left[\nabla \mathbf{U}_{\alpha} + (\nabla \mathbf{U}_{\alpha})^T \right] \right\} + \mathcal{M}_{\alpha} \quad (8)$$

Adotou-se o modelo padrão de turbulência $k-\epsilon$ para prever os efeitos da turbulência (REF).

Equação de Energia Total

A seguinte equação foi utilizada para descrever o transporte de calor fluido-fluido em risers:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha}\rho_{\alpha}h_{\alpha}) + \nabla \cdot [f_{\alpha}(\rho_{\alpha}\mathbf{U}_{\alpha}h_{\alpha} - \lambda_{\alpha}\nabla T_{\alpha})] = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^{+}h_{\beta,S} - \Gamma_{\beta\alpha}^{+}h_{\alpha,S}) + \mathcal{Q}_{\alpha} + \mathcal{S}_{\alpha} \quad (9)$$

onde, h_{α} , T_{α} , λ_{α} correspondem à entalpia estática, temperatura e condutividade térmica da fase α , respectivamente; \mathcal{S}_{α} descreve a fonte de calor externa, $\Gamma_{\alpha\beta}^{+}h_{\beta,S} - \Gamma_{\beta\alpha}^{+}h_{\alpha,S}$ representa a transferência de calor induzida pela transferência de massa interfacial, \mathcal{Q}_{α} é a transferência de calor interfacial da fase α através da interface com outra(s) fase(s) e \mathcal{S}_{α} é o termo fonte de energia.

A transferência de calor interfásica ocorre devido ao não-equilíbrio térmico através das interfaces entre as fases. O calor ou energia total por unidade de volume transferida para a fase α devido à interação com outras fases é dado por:

$$\mathcal{Q}_{\alpha} = \sum_{\beta \neq \alpha} \mathcal{Q}_{\alpha\beta} \quad (10)$$

Com,

$$\mathcal{Q}_{\alpha\beta} = -\mathcal{Q}_{\beta\alpha} \Rightarrow \sum_{\alpha} \mathcal{Q}_{\alpha} = 0 \quad (11)$$

A transferência de calor através de um contorno de fase é usualmente descrito em termos de um coeficiente de transferência de calor global $h_{\alpha\beta}$. Então, a taxa de transferência de calor, $\mathcal{Q}_{\alpha\beta}$, por unidade de tempo através de um contorno de fase de densidade de área interfacial por unidade de volume $A_{\alpha\beta}$, da fase α para a fase β , é:

$$Q_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta} (T_{\beta} - T_{\alpha}) = h_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} (T_{\beta} - T_{\alpha}) \quad (12)$$

Quando se utiliza o modelo de superfície livre, a densidade de área interfacial por unidade de volume, $A_{\alpha\beta}$, é dada pela Eq. (8). O coeficiente de transferência de calor foi determinado com base no número de Nusselt da mistura Nu Eq. (13) assim como os números de Reynolds e Prandtl da mistura, Eqs. (14) e (15), a condutividade térmica e a capacidade calorífica dos componentes, definidas pelas Eqs. (16) e (17):

$$Nu = \frac{h d}{\mu} \quad (13)$$

$$Re = \frac{|U - U'| d}{\mu} \quad (14)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (15)$$

$$k = f_1 k_1 + f_2 k_2 \quad (16)$$

$$c_p = f_1 c_{p1} + f_2 c_{p2} \quad (17)$$

onde $\rho_{\alpha\beta}$, $\mu_{\alpha\beta}$, $C_{p\alpha\beta}$, $\lambda_{\alpha\beta}$ são densidade, viscosidade, capacidade calorífica e condutividade térmica da mistura, respectivamente; $Re_{\alpha\beta}$, $Nu_{\alpha\beta}$ e $Pr_{\alpha\beta}$ são, respectivamente, os números adimensionais de Reynolds, Nusselt e Prandtl da mistura.

2.1. Condições Iniciais e de Contorno

Foi considerado que a catenária estava inicialmente cheia com água. As condições de contorno aplicadas sobre as fronteiras, são como segue:

- a) Na seção anular referente à entrada de água foi adotado um valor prescrito e não nulo para a componente de velocidade axial e a fração volumétrica de água na direção z e nulo para as outras componentes nas direções x , y e z , ou seja:

$$R_2 < r < R_1 \Rightarrow \begin{cases} u_{z,w} = u_w = 1,90 \text{ m/s} \\ f_w = 1 \\ u_{z,o} = u_{x,o} = u_{x,w} = u_{y,o} = u_{y,w} = f_o = 0 \\ T = T_w = 298 \text{ K} \end{cases}$$

onde $u_{i,w}$ e $u_{i,o}$ correspondem, respectivamente, às componentes de velocidade da água e do óleo pesado na seção de entrada anular, e i é a direção da componente de velocidade (x, y, z).

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

$$0 < r < R_1 \Rightarrow \begin{cases} u_{z,o} = u_o = 0,20; 0,35; 0,50; 0,90; 1,20 \text{ m/s} \\ f_o = 1 \\ u_{z,w} = u_{x,o} = u_{x,w} = u_{y,o} = u_{y,w} = f_o = 0 \\ T = T_o = 423 \text{ K} \end{cases}$$

- c) Nas fronteiras referentes à parede da catenária foi considerada a condição de não deslizamento, ou seja:

$$\begin{aligned} r = R_2 & \Rightarrow & u_{x,w} = u_{y,w} = u_{z,w} = 0 \\ 0 \leq z \leq L = 0 & \Rightarrow & u_{x,o} = u_{y,o} = u_{z,o} = 0 \end{aligned}$$

$$T = T_p = 283 \text{ K}$$

- d) Na seção de saída ($z = L$) foi prescrito uma pressão estática constante $p_{est} = 98100 \text{ Pa}$, sendo L o comprimento da catenária.

As propriedades dos fluidos utilizados na simulação do transporte de óleos pesados empregando a técnica de *core-flow* estão apresentadas na Tab. (1).

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

	Água	Óleo Pesado
Massa específica (kg/m^3)	997	989
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	$\mu_w = \frac{2,185}{(40,12 - 0,0051547 \cdot T) \cdot T - 1000}$	$\mu_o = 51,87 \cdot e^{\left[-2,3935 \left(\frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}\right)\right]}$
Capacidade térmica (J/kg.K)	4181,7	1800
Condutividade térmica (W/m.K)	0,6069	0,147
Tensão superficial (N/m)	0,062	

T_{min} e T_{max} correspondem aos valores da temperatura mínima (273 K) e máxima (573 K) válidas para correlação da viscosidade do óleo pesado. Estas propriedades foram obtidas de Babadagli e Al-Bemami (2007) e Perry (1963).

2.2. Geração da Malha

No presente trabalho foi gerada no CFX 5.5 (modulo CFX Build), uma malha tridimensional não-estruturada com 346.075 elementos (177.390 tetraédricos, 168.564 prismáticos e 121 piramidais) representando o domínio de estudo, o qual foi criado por meio de um conjunto de pontos, curvas, superfícies e sólidos descrevendo a sua forma (catenária) e suas dimensões (diâmetro e comprimento).

Os elementos tetraédricos foram utilizados nas proximidades da parede da catenária, conforme pode ser observado na Fig. 1, tendo em vista que é nesta região onde há normalmente os maiores gradientes de velocidade e de temperatura. Na Fig. 1 está representada a malha sobre o plano YZ, além dos detalhes nas seções de entrada, de saída e região central da catenária.

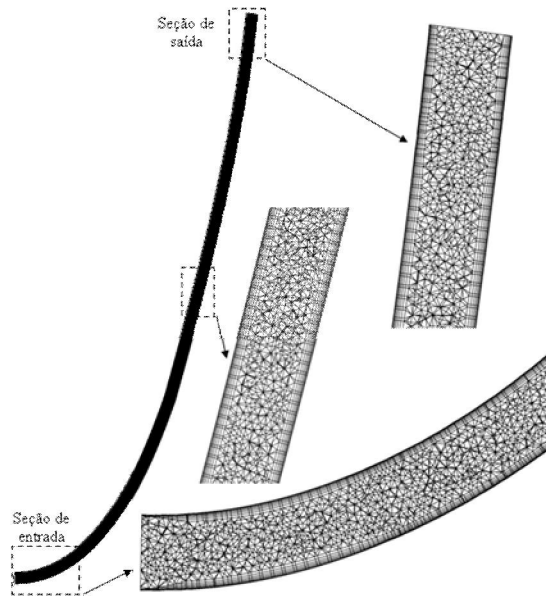


Figura 1. Representação da malha da catenária sobre o plano YZ e detalhes das regiões de entrada, de saída e centro da catenária.

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.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 está representado o campo da fração volumétrica do óleo pesado para a temperatura de entrada do óleo pesado e ultraviscoso, 423 K. A Figura 2 mostra, de uma maneira geral, a presença de uma corrente de água nas proximidades da parede da catenária. Contudo, à medida que se distancia da seção de entrada da catenária, observa-se um rompimento da película de água pelo óleo e, em consequência, o toque e aderência do óleo na parede da catenária. Este fenômeno se agrava com o aumento da temperatura, tendo em vista uma redução da viscosidade do óleo com o aumento da temperatura. Este fato é consequência de um desequilíbrio entre as forças atuantes tanto no núcleo de óleo como na película de água formada entre a parede da catenária e o núcleo de óleo pesado; a diferença de densidade entre as fases faz com que o óleo tenda a ascender para a parte superior da catenária. No entanto, as forças de lubrificação tendem a repelir o núcleo de óleo para o centro da catenária. Uma competição entre estes dois efeitos dá uma variação na posição do núcleo de óleo no interior da tubulação. Resultados semelhantes foram obtidos por Huang (1994), Ooms e Poesio (2003), Bensakria *et al.* (2004), Ooms *et al.* (2007) e Vanaparthi e Meiburg (2008), todavia para tubos horizontais.

Nota-se, ainda, na Fig. 2 movimentos ondulatórios do núcleo de óleo pesado, principalmente nas regiões distantes da seção de entrada. Este fenômeno está relacionado com a forma com que as correntes de água e óleo pesado percorrem a catenária sofrendo a ação das forças de gravidade, arraste e centrífugas, que estão atuando simultaneamente.

O resultado apresentado na Fig. 2 mostra claramente que o escoamento anular é formado na catenária até uma distância de aproximadamente 1,078 m da seção de entrada. A partir deste ponto, observa-se nitidamente a desestabilização do comportamento anular, fato este que é intensificado com o aumento da temperatura. Este tipo de comportamento pode levar a um aumento na diferença de pressão entre a seção de entrada e a seção de saída da catenária. Isto pode ser explicado pela aderência de óleo à parede em pontos específicos da catenária, proporcionando, assim, um obstáculo que conduz, além de um aumento na perda de carga, a um desvio da corrente de água e, por conseguinte, uma mudança do comportamento do núcleo de óleo.

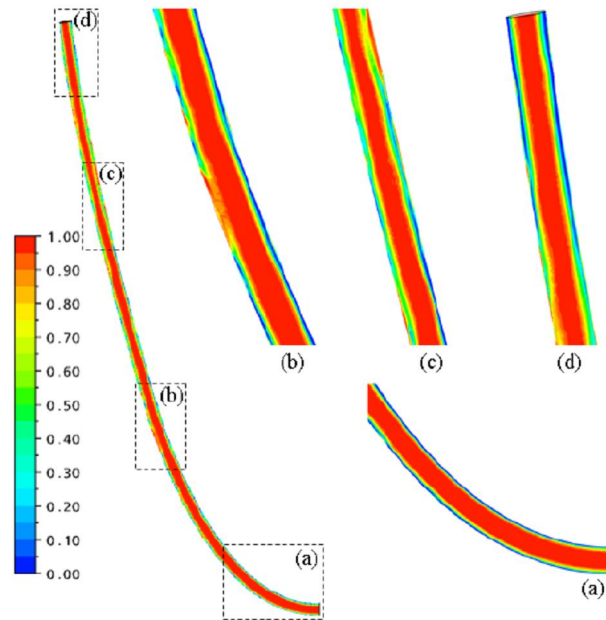


Figura 2 – Campo de fração volumétrica de óleo pesado sobre o plano jz em $t = 60$ s para uma temperatura de entrada do óleo pesado (T_0) igual a 423 K.

Com a finalidade de evidenciar o comportamento do escoamento anular, ilustra-se na Fig. 3 os campos vetoriais de velocidade superficial da água sobre o plano jz referentes às situações encontradas nas Fig. 2b e 2c. O resultados da Fig. 3 mostra claramente que nas regiões onde ocorre a aderência do óleo pesado à parede da catenária há uma redução brusca da velocidade da corrente de água, conduzindo a valores praticamente nulos, conforme pode ser observado na Fig. 3c, a qual correspondem a uma ampliação da área assinalada nas Fig. 3a, 3b. Este ponto de adesão influencia de forma substancial o comportamento do núcleo de óleo, como pode ser observado nas Fig. 2.

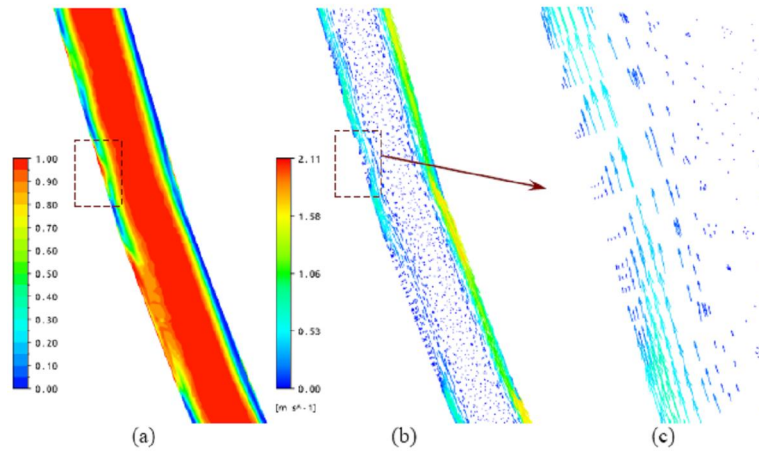


Figura 3 –(a) Campo de fração volumétrica referente à Figura 2.b; (b) campo vetorial de velocidade superficial da água; (c) detalhe do campo vetorial em destaque, sobre o plano yz em um trecho da catenária.

Prada (1999) relata que uma acumulação contínua de óleo em determinados lugares das linhas de escoamento leva a um aumento progressivo da perda de carga, e a persistência desta situação levaria a um bloqueio total da seção da tubulação. Ainda segundo esse autor, esse fenômeno foi observado no oleoduto experimental de San Tomé com 20,32 cm de diâmetro e 1 km de extensão na Bacia do Orinoco, Venezuela, ao transportar um óleo pesado com densidade de 993 kg/m^3 (11 °API) e viscosidade de 115 Pa.s. Os resultados desse experimento mostraram a tendência do óleo aderir às paredes da tubulação em diferentes regiões e de forma não-homogênea ao longo da tubulação.

De acordo com Prada (1999) existem posições críticas que estão mais sujeitas às incrustações de óleo, a exemplo de regiões imediatamente após as estações de bombeio, onde a ondulação começa a se desenvolver e a pressão hidrostática é maior; nas proximidades de acidentes da linha de escoamento, como curvas, joelhos, conexões, entre outros, onde a estrutura do núcleo de óleo é perturbada proporcionando variações locais e instantâneas da fração volumétrica de óleo.

Na Figura 4 estão representados os resultados da queda de pressão na catenária em função da razão entre as velocidades do óleo e da água (u_o/u_w) mantendo-se a velocidade da água constante. Os resultados desta figura ilustram que a diferença de pressão aumenta com o acréscimo da velocidade de óleo pesado na seção de entrada. Uma explicação para este fato pode estar relacionada com o aumento da quantidade de óleo na corrente de água, o que altera de forma significativa a sua viscosidade e, conseqüentemente, a sua resistência ao escoamento.

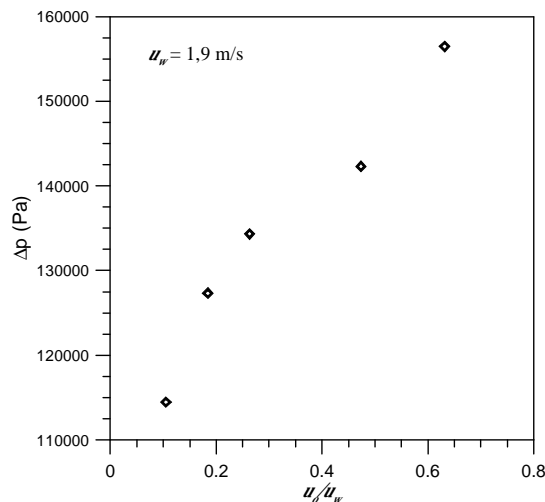


Figura 4- Queda de pressão na catenária em função do aumento da velocidade do óleo, u_o , em $t=60\text{s}$.

A Figura 4 ilustra a comparação da queda de pressão absoluta em função do tempo ao longo da catenária para os escoamentos monofásicos de água e de óleo e o escoamento bifásico água-óleo pesado, este último com o óleo sendo injetado na catenária a uma velocidade de 1,2 m/s e a água a 1,9 m/s. Os resultados ilustram um aumento da diferença de pressão com o tempo quando se tem o escoamento anular (*core-flow*) não chegando a uma estabilização do escoamento. Com o intuito de comparar os resultados obtidos foi determinada a mediana da diferença de pressão para cada um dos casos ilustrados nesta figura e pôde-se constatar que:

a) Quando o óleo escoar sozinho, a diferença de pressão (ΔP) foi igual a 558.855 Pa, ou seja, 3,57 vezes maior do que a observada quando se emprega a técnica de *core-flow* (156.542 Pa);

b) A diferença de pressão (ΔP) do escoamento anular é 1,57 vezes maior do que a observada quando a água escoar sozinha (88.656 Pa).

Os resultados referentes ao escoamento monofásico de óleo da Figura 4 ilustram um decréscimo na variação de pressão nos primeiros 20s, proporcionando uma diferença (entre os valores de 2s e 20s) de aproximadamente 164.113,5 Pa. Este fato é explicado pela condição de contorno imposta, qual seja, a temperatura do óleo na seção de entrada como sendo igual a 423 K, o que proporciona uma redução na perda de carga devido a uma redução da viscosidade do óleo pesado e ultraviscoso.

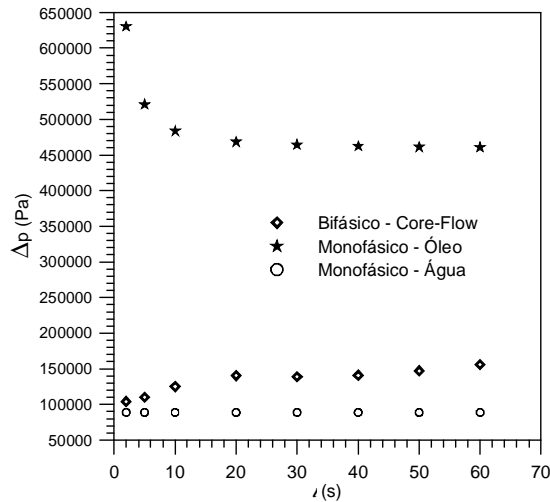


Figura 4. Comparação da queda de pressão entre os escoamentos monofásicos da água e do óleo e o escoamento anular (*core-flow*) água-óleo.

Definindo-se o fator de redução para o escoamento monofásico de óleo pesado, φ_{op} , como a relação entre a diferença de pressão do escoamento monofásico de óleo pesado, ΔP_{op} , e a do escoamento anular (*core-flow*), ΔP_{cf} , tem-se:

$$\varphi_{op} = \frac{P_{op}}{P_{cf}} \quad (18)$$

O fator de redução para o escoamento monofásico de água, φ_w , corresponde à relação entre a diferença de pressão do escoamento monofásico de água, ΔP_w , e a do escoamento anular (*core-flow*), ΔP_{cf} , dado por:

$$\varphi_w = \frac{P_w}{P_{cf}} \quad (19)$$

O baixo valor da queda de pressão obtido a partir da razão de ΔP do escoamento monofásico de óleo com o escoamento anular (*core-flow*) na catenária, que neste trabalho foi $\varphi_{op} = 3,44$, pode estar relacionado aos seguintes fatores:

- o valor da temperatura do óleo na seção de entrada favorece à redução da viscosidade do óleo o que conduz à redução na perda de carga durante o escoamento monofásico de óleo pesado;
- a presença de regiões de incrustações de óleo pesado sobre a superfície da parede da catenária, causando um aumento progressivo na queda de pressão do escoamento bifásico, decorrente de variações locais e instantâneas do *holdup*;
- rugosidade da parede da catenária, que no presente trabalho não foi levada em consideração, ou seja, foi admitida uma parede lisa. De acordo com Silva (2003), o fato de se utilizar uma superfície rugosa faz com que se aumente a área superficial, facilitando assim a permanência da água sobre a superfície, o que pode contribuir para uma hidratação mais eficiente, proporcionando a formação de um filme de água entre o óleo e a parede da tubulação. Contudo, recomendam-se estudos neste sentido para um melhor entendimento dos efeitos desta variável sobre o termo hidrodinâmico do escoamento.
- Molhabilidade, que é usualmente definida como sendo a tendência do fluido se espalhar ou aderir sobre a superfície sólida na presença de outro fluido. No caso do escoamento anular, a molhabilidade pode ser

determinada pela espessura do filme de água, ou seja, se a película de água tem um comportamento estável, a superfície sólida continua molhada com água, mas se a película é instável poderá ocorrer o seu rompimento possibilitando o contato do óleo com a superfície.

4. CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a. Foi observada a presença de um filme de água entre a parede da catenária e o núcleo de óleo pesado e ultraviscoso escoando na região central da catenária, caracterizando o escoamento anular ou *core-flow*.
- b. Foi constatada a presença de regiões de incrustações ou pontos de aderência de óleo pesado ao longo da superfície da catenária.
- c. A utilização da técnica de *core-flow* proporcionou uma redução na perda de carga de 3,44 vezes se comparado com o escoamento monofásico de óleo pesado e ultraviscoso. Esse baixo valor, se comparado com os disponibilizados na literatura, pode estar relacionado com as regiões de aderência de óleo na parede da catenária; uma instabilidade do escoamento anular decorrente das velocidades relativas utilizadas e, por não ter sido considerado o efeito da rugosidade da parede da catenária, o que afeta a condição de molhabilidade;
- d. A perda de carga no escoamento anular apresentou um comportamento crescente e praticamente linear, com o aumento da velocidade de injeção de óleo na seção de entrada da catenária.

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

- Andrade, T. H. F., 2008, Estudo Numérico do Transporte de Óleos Pesados em Tubos Lubrificado por Água, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande, PB- Brasil.
- ANSYS, CFX-Theory Manual, 2005.
- 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.
- 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.
- Crivellaro, K. C. O., Damacena, Y. T., Andrade, T. H. F., Lima, A. G. B., Farias Neto, S. R., 2009, “Numerical Simulation of Heavy Oil Flows in Pipes Using the Core-Annular Flow Technique”, Computational Methods in Multiphase Flow V, pp. 193-203.
- Damacena, Y.T., 2009, Redução do Atrito Durante o Transporte de Óleos Pesados em Dutos, Monografia em Engenharia Mecânica da Unidade pela Universidade Federal de Campina Grande, 111 p.
- Huang, A.; Christodoulou, C.; Joseph, D.D., 1994, Friction Factor and Holdup Studies for Lubricated Pipelining- II. Laminar and k-e Models for Eccentric Core-Flow, International Journal of Multiphase Flow, vol. 20, nº 3, pp. 481-491.
- Joseph, D. D., Bannwart, A. C., Liu, Y. J., 1996, Stability of Annular Flow and Slugging, International Journal of Multiphase Flow, vol. 22, pp.1247-1254.
- 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.
- Ooms, G.; Vuik, C.; Poesio, P., 2007, Core-annular flow Through a Horizontal Pipe: Hydrodynamic Counterbalancing of Buoyancy Force on Core. Physics of Fluids, vol. 19, nº 092103.
- Ooms, G., 1972, The Hydrodynamic Stability of Core-Annular Flow of Two Ideal Liquids, Applied Sciences Researche, vol. 26.
- Prada, J. W. V., 1999, Estudo experimental do Escoamento Anular Óleo-Água (“Core-Flow”) na Elevação de Óleos Ultraviscosos, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, 192 p.
- 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.
- Prada, J. W. V.; Bannwart, A. C., 1999, Pressure Drop in Vertical Core Annular Flow, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, São Paulo.
- Prada, J. W., & Bannwart, A. C. Pressure drop in vertical core annular flow. Journal. French Society of Mechanical Science, vol. 23, nº 4, (2001).

- Trevisan, F.E., 2003, Padrões de Fluxo e Perda de Carga em Escoamento Trifásico Horizontal de Óleo Pesado, Água e Ar, Dissertação de Mestrado de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo, Campinas, SP - Brasil.
- Vanaparthi, S.H.; Meiburg, E., 2008, Variable Density and Viscosity, Miscible Displacements in Capillary Tubes. European Journal of Mechanics B/Fluids. vol. 27, pp. 268-289.

REDUCTION OF FRICTION IN TWO-PHASE FLOW IN WATER-OIL HORIZONTAL PIPE (TRABALHO DO TONY)

Jobsan Sueny de Sousa Santos¹,

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

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

Kelen Cristina de Oliveira Crívelaro², kelencrivelaro@yahoo.com.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, Brzsil, 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. However, the interests by this oil have increased in recent years due to the large amount of reserves available. Furthermore of your viscosity, the most reserves are under a water depth of more than 1000 m, which requires sophisticated and expensive technologies for their exploitation and transport. This fact can lead to decreased productivity of the reservoir of heavy oil, 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 the effects of this type of viscous oil. 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 technical core-flow. We adopted the model mixture for two-phase flow water-heavy oil and ultraviscous. It was also considered a steady flow, isothermal, without buoyancy, laminar to phase water and turbulent to phase oil. The conservation equations of mass, momentum and turbulence model $k-\epsilon$ were solved by commercial program ANSYS CFX[®] that uses the finite volume method. The results of the velocity, pressure and volume fraction for a viscosity ratio between the phases of water and heavy oil are presented and analyzed. The difference in pressure upstream and downstream of the pipe, when employing the technique core-flow, has decreased by approximately 59% compared to the single-flow with heavy oil and ultraviscous.*

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