



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

Escoamento de Óleo Parafínico em Dutos: Um Estudo Numérico

Túlio Rafael Nascimento Porto, tuliorafael2010@hotmail.com¹

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br²

¹Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58429-900, Campina Grande – PB.

Resumo: A precipitação de hidrocarbonetos pesados, formando cristais estáveis de parafina, que tendem a se depositar nas paredes das linhas de produção, é um problema atual na indústria do petróleo. Isto impulsiona pesquisas em dutos e equipamentos, que buscam ampliar o entendimento sobre esse fenômeno e desenvolver atividades de manutenção preventiva, com maior eficiência. Este trabalho apresenta um estudo teórico do transporte de óleo parafínico em um duto horizontal. Para descrição do fenômeno, utilizou-se um modelo matemático, considerando a difusão molecular como mecanismo dominante na deposição da parafina, que para temperaturas superiores a temperatura de início de aparecimento dos cristais (TIAC), o petróleo é uma mistura binária e homogênea, sendo a parafina o soluto da mesma, e escoamento em regime laminar, completamente desenvolvido para a fase do óleo, em um sistema bidimensional. O problema envolve equações da mecânica dos fluidos, transferência de calor, transição e transporte de massa, sendo formulado e resolvido, numericamente, através do “software” MATLAB®, por um método iterativo de solução das equações acopladas associado ao método Runge-Kutta de quarta ordem. Resultados de espessura da camada de parafina, distribuição de temperatura, e variação da vazão volumétrica do óleo, ao longo do duto, no decorrer do tempo, são apresentados e analisados para diferentes condições de operação, descritas pelos valores iniciais dos números de Reynolds (Rec), Peclet (Pec) e coeficiente de solubilidade adimensional (S^*). Verificou-se que, um aumento no Rec, em regime laminar, não promove variação no comportamento da camada de parafina depositada. O aumento do Pec, é responsável por a camada de parafina não se concentrar em uma pequena região do duto, o que se evidencia em quedas bruscas na vazão volumétrica e na pressão do óleo, no decorrer do tempo. O parâmetro S^* mostrou estar diretamente ligado a um maior alcance da espessura do depósito, em relação ao raio do tubo, sendo o mesmo, função do gradiente de temperatura entre o óleo e o ambiente externo e de propriedades físicas do depósito formado.

Palavras-chave: Escoamento, Temperatura, Óleo Parafínico, Estudo Numérico, Difusão molecular

1. INTRODUÇÃO

O desafio de garantir o escoamento nos dutos de produção petrolífera em ambientes frios, face ao problema da precipitação de parafina, continua a impulsionar várias pesquisas que visam entender e reduzir os impactos que esse fenômeno vem trazendo na produção, em reservatórios de todo o mundo. Ao ser extraído do reservatório e adentrar a linha de produção, sob a temperatura de aproximadamente 70°C, o óleo, em que se encontram dissolvidos hidrocarbonetos pesados, passa a resfriar-se ao longo do duto, devido a diferença da temperatura do óleo em relação ao meio externo. Esse problema ocorre com maior frequência em ambientes “offshore”, onde se encontram a maior parte dos reservatórios do país e onde a temperatura do oceano, em elevadas profundidades, é cerca de 5°C. A medida que o óleo é resfriado e atinge a temperatura de início de aparecimento dos cristais (TIAC), inicia-se o processo de precipitação e posterior deposição da parafina. Os mecanismos apresentados na literatura especializada, responsáveis pelo processo de deposição, são: difusão molecular, difusão browniana, dispersão por cisalhamento e deposição por gravidade (Burger et al., 1981), onde, mesmo em meio a contradições, no que diz respeito a relevância de cada mecanismo, encontra-se uma unanimidade em considerar a difusão molecular, como mecanismo dominante do processo de deposição, em escoamentos sob regime laminar e submetido a um elevado gradiente de temperatura, entre o óleo o meio externo (Morán, 2007 e Ribeiro, 1996).

Nesse sentido, conhecendo-se a distribuição de temperatura, associada a transferência de calor e as condições hidrodinâmicas, pode-se simular numericamente como se dá a precipitação e deposição de parafina, ao longo do comprimento do duto e no decorrer do tempo. Equações acopladas destes parâmetros podem ser iterativamente solucionadas, obtendo-se como resultado a espessura do depósito de parafina formado, nas dadas condições de operação,

e os efeitos que este depósito acarretará nas mesmas, ao longo do tempo. Esta previsão é de fundamental importância para a avaliação do custo de exploração de reservatórios que trabalham com óleos parafínicos.

Assim sendo, o presente trabalho realiza um estudo numérico do transporte de óleo parafínico em um duto horizontal. O modelo aplicado toma a difusão molecular como o mecanismo dominante no transporte da parafina dissolvida, que promove a posterior deposição, na parede do duto. A formulação matemática é desenvolvida no aspecto hidrodinâmico, de transferência de calor e de massa, resultando em equações acopladas que são solucionadas iterativamente, para simular o comportamento do fenômeno. Dentro do regime de escoamento laminar, em um sistema bidimensional, os resultados da espessura da camada de parafina, taxa de vazão volumétrica e distribuição de temperatura, descrevem o processo de deposição de parafina, para um determinado período de tempo, sob condições de operação específicas. Essas condições de operações são variadas através de números adimensionais e os mesmos são avaliados quanto a sua relevância para o processo de deposição e eficiência na produção.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta pesquisa, considerou-se os modelos matemáticos propostos na literatura especializada (Bouceta e Kessal, 2011; Souza e Braga, 1996 e Ribeiro et al., 1997). As equações governantes descrevem o problema, associando as análises fluidodinâmica, térmica, de transição de fases e transporte de massa. Em um sistema bidimensional, a situação física em que o diferencial de pressão, entre a entrada e a saída do duto, é mantido constante, no decorrer do tempo, é avaliada.

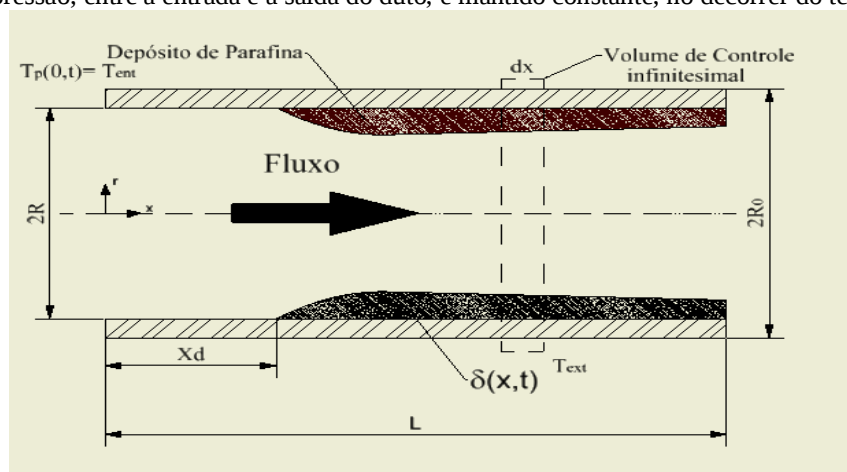


Figura 1- Seção longitudinal do tubo indicando a zona de parafina precipitada.

A Figura 1 ilustra o depósito de parafina, formado ao longo da seção longitudinal do duto, que possui espessura δ (m) variável com a posição axial x (m) e com o tempo t (s). Inicialmente, o duto encontra-se isento de parafina ($\delta(x,0) = 0$). Ao passo que o óleo entra na linha de produção de raio interno R , externo R_0 e comprimento L , à temperatura de entrada $T_p(0,t)=T_{ent}(K)$, e atinge a TIAC, em um comprimento crítico x_d (m), a precipitação de parafina ocorre, fazendo com que o duto se divida em duas regiões:

$$0 \leq x < x_d$$

Região quente (Não há formação de depósito)

$$x_d \leq x \leq L$$

Região fria (Há formação de depósito)

2.1 Hipóteses e Considerações

Na formulação matemática, as seguintes considerações são feitas:

- ❖ O duto é simétrico na direção axial;
- ❖ No volume de controle, a camada depositada independe da coordenada axial i.e. $(R-\delta)$ é constante em dx ;
- ❖ Efeito gravitacional desprezível;
- ❖ Fluido Newtoniano;
- ❖ As forças de inércia são desprezadas quando comparadas com as forças viscosas (teoria da lubrificação);
- ❖ A viscosidade do óleo, calor específico, condutividade térmica e densidade são constantes;
- ❖ O escoamento é hidrodinamicamente desenvolvido (as variações geométricas são suaves ao longo do tempo);
- ❖ A condução de calor e difusão de massa são predominantemente radiais;
- ❖ A geração de energia é desprezível;
- ❖ O calor latente liberado na formação das partículas sólidas é desprezado;
- ❖ Na região fria, o fluido na interface sólido-líquido está sempre saturado;
- ❖ A deposição de parafina é governada pelo mecanismo de difusão molecular;

- ❖ O coeficiente de difusão molecular da parafina é constante;
- ❖ Existe geração de partículas sólidas, devido ao gradiente de concentração;
- ❖ A solubilidade da parafina depende da temperatura;
- ❖ O depósito de parafina sólida tem porosidade constante;

2.2 Análise Hidrodinâmica

Sendo ρ (kg/m³) a densidade e μ (kg/m.s), a viscosidade do fluido, v_r , v_α e u (m/s) as componentes radial (r), angular (α) e axial (x), respectivamente, da velocidade ($\vec{V}$) do óleo, P a pressão local e g a aceleração da gravidade, pode-se escrever as equações da continuidade e de Navier-Stokes, em coordenadas cilíndricas, para o volume de controle de comprimento dx , selecionado na Fig. 1 como segue:

- ❖ Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \alpha} (\rho v_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) \right] = 0 \quad (1)$$

- ❖ Equação de Navier-Stokes na coordenada axial:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v_\alpha}{r} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \quad (2)$$

Assim, com as devidas considerações, aplicando a teoria da lubrificação e uma análise da ordem de grandeza, sabendo que $P = P(x)$ (N/m²) e $u = u(r)$ na região completamente desenvolvida hidrodinamicamente, tem-se o perfil de velocidade para o duto liso, como segue:

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left[1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Integrando o perfil de velocidade em relação a área da seção transversal do duto, obtém-se a vazão volumétrica (Q) como:

$$Q = \frac{-\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (4)$$

O fator de atrito f (fator de atrito de Darcy) para escoamento laminar é dado por:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

onde Re , é o número de Reynolds local, para o escoamento com velocidade média V (m/s), em um duto que apresenta deposição de parafina, dado por:

$$Re = \frac{2\rho V(R - \delta)}{\mu} \quad (6)$$

Desta forma, a integral da Eq. (4), após a substituição das Eq. (5) e (6), descreve a vazão volumétrica Q (m³/s) ao longo do duto, como segue:

$$Q = \sqrt{\frac{4\pi^2 \Delta P}{\rho \int_0^L \frac{f}{(R - \delta)^5} dx}} \quad (7)$$

Para uma análise adimensional do problema, os seguintes parâmetros adimensionais são estabelecidos:

$$L^* = \frac{L}{R} \quad x^* = \frac{x}{R} \quad \delta^* = \frac{\delta}{R} \quad (8a - c)$$

Sendo L^* o comprimento, x^* a posição axial e δ^* a espessura da camada de parafina adimensionais do problema.

O desenvolvimento da vazão volumétrica e do diferencial de pressão em um escoamento onde não se observa formação de parafina, define as seguintes equações características:

$$Q_c = \frac{2\pi R^2 \sqrt{\frac{\Delta P_c}{\rho}}}{\sqrt{\frac{64L^*}{Re_c}}} \quad Re_c = \frac{2\rho Q_c}{\mu\pi R} \quad \Delta P_c = \frac{\rho Q_c^2}{4\pi^2 R^4} \frac{Re_c}{64L^*} \quad (9a - c)$$

Sendo Q_c a vazão volumétrica, Re_c o número de Reynolds e ΔP_c o diferencial de pressão característicos, os quais descrevem a situação inicial, onde não se observa a deposição de parafina. Desta forma, usando as equações adimensionais e características, a vazão volumétrica e o número de Reynolds local, nas suas formas adimensionais, podem ser determinados como segue:

$$Q^* = \frac{Q}{Q_c} = \frac{1}{\sqrt{\int_0^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^*}} \sqrt{\frac{64L^*}{Re_c}} \quad (10)$$

e

$$Re = \frac{Q^*}{1-\delta^*} Re_c \quad (11)$$

2.3 Análise Térmica

Tomando as várias formas de transferência de calor que ocorrem na direção radial do duto, a saber, a convecção entre o óleo e a superfície interna do tubo, a condução ao longo da espessura do depósito parafínico, bem como através da parede do tubo e a convecção com o ambiente externo, define-se o coeficiente global de transferência de calor U (W/m².K) como:

$$U = \left[\left(\frac{R}{R_0} \right) \frac{1}{h_{ext}} + \frac{R}{k_t} \ln \left(\frac{R_0}{R} \right) + \frac{R}{k_d} \ln \left(\frac{R}{R-\delta} \right) + \left(\frac{R}{R-\delta} \right) \frac{1}{h_{int}} \right] \quad (12)$$

onde h_{ext} e h_{int} (W/K.m²) são, respectivamente, os coeficientes externo e interno transferência de calor por convecção, k_t e k_d (W/K.m) são, respectivamente, a condutividade térmica da parede do tubo e a condutividade térmica do depósito de parafina.

Tratando-se o problema de forma adimensional (U^*) pode-se escrever a Eq. (12) como segue:

$$U^* \equiv \frac{UR}{k_{int}} = \left[\frac{2k_{int}/k_{ext}}{Nu_{ext}} + \frac{k_{int}}{k_t} \ln \left(\frac{R_0}{R} \right) + \frac{k_{int}}{k_d} \ln \left(\frac{1}{1-\delta^*} \right) + \frac{2}{Nu_{int}} \right] \quad (13)$$

onde o Nu_{ext} e Nu_{int} são os números de Nusselt para transferência de calor, definidos respectivamente como:

$$Nu_{ext} = \frac{2R_0 h_{ext}}{k_{ext}} \quad (14)$$

$$Nu_{int} = \frac{2R h_{int}}{k_{int}} (1-\delta^*) \quad (15)$$

onde k_{ext} e k_{int} são respectivamente, a condutividade térmica dos fluidos escoando externamente e internamente ao duto.

Desta forma, sendo c_p (J/kg.K) o calor específico à pressão constante do óleo e $\dot{m}$ (kg/s) o fluxo mássico no volume de controle de área superficial A (m²), pode-se escrever o balanço de energia como:

$$\dot{m} c_p T_{m,x} - \dot{m} c_p \left(T_{m,x} + \frac{dT_m}{dx} \right) = UA(T_{m,x} - T_{ext}) \quad (16)$$

onde $T_{m,x}$ e T_{ext} (K) são as temperaturas médias do petróleo na posição x e do ambiente externo, respectivamente.

Desenvolvendo a Eq. (16) tem-se como resultado:

$$\rho Q c_p \frac{dT_m}{dx} = 2\pi R U (T_{ext} - T_{m,x}) \quad (17)$$

Considere a temperatura adimensional e o número de Peclet característico, definidos como segue:

$$\theta \equiv \frac{T_{m,x} - T_{ext}}{T_{ent} - T_{ext}} \quad Pe_c \equiv \frac{2\rho c_p Q_c}{\pi R k_{int}} \quad (18a - b)$$

Integrando a Eq. (17) por separação de variáveis e inserindo as Eq. (18a-b) e (10) na mesma, obtém-se a equação que descreve a distribuição de temperatura adimensional ao longo do comprimento do duto, dada por:

$$\theta = \exp \left[-\frac{4}{Q^* Pe_c} \int_0^{x^*} U^* dx^* \right] \quad (19)$$

Para calcular a posição axial onde se inicia a formação do depósito de parafina integra-se a Eq. (19) no intervalo $0 \leq x^* \leq x_d^*$ considerando que:

$$\delta^*(x^*, 0) = 0 \quad (20)$$

$$\theta = \theta_c = \frac{T_{iac} - T_{ext}}{T_{ent} - T_{ext}} \quad (21)$$

O resultado da integração será:

$$x_d^* = \frac{\ln \left(\frac{T_{ent} - T_{ext}}{T_{iac} - T_{ext}} \right) Pe_c Q^*}{4(U^*|_{\delta^*=0})} \quad (22)$$

onde $T_{iac} = TIAC$ para um determinado óleo escoando na tubulação.

2.4 Análise de Transição e Transporte de Massa

Seja dm_p (kg) a massa de parafina imobilizada sobre a superfície, dA , durante o intervalo de tempo dt , $\emptyset$, a porosidade do depósito de parafina, definida como a razão entre o volume de óleo e o volume total do depósito, considerando que existe uma uniformidade espacial no mesmo, pode-se escrever o fluxo de partículas de parafina como segue :

$$j_i \equiv \frac{dm_p}{dt dA} \quad (23)$$

onde,

$$dm_p = \rho_p (1 - \emptyset) dA \frac{\partial \delta}{\partial t} dt \quad (24)$$

Inserindo a Eq. (24) na Eq. (23), tem-se:

$$j_i = \rho_p (1 - \emptyset) \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (25)$$

Como estabelecido, o mecanismo de difusão molecular é dominante no transporte de parafina e, segundo a lei de Fick, o fluxo de massa na interface sólido-líquido é dado por:

$$j_i = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq x < x_d^* \\ -D \left. \frac{d\rho_w}{dT} \right|_S \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_S & , \quad x_d^* \leq x \leq L \end{cases} \quad (26)$$

onde D (m^2/s) é a difusividade molecular das parafinas, ρ_w (kg/m^3) é a concentração mássica das parafinas dissolvidas, $\left. \frac{d\rho_w}{dT} \right|_S$ (kg/m^3K), é o coeficiente de solubilidade avaliado na temperatura local da interface (T_s) entre o óleo e

o depósito, o qual, será denominado por S , e $\frac{\partial T}{\partial r}|_S$ (K/m) é o gradiente de temperatura local da interface. Assim, igualando as Eq. (25) e (26), obtém-se:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq x < x_d \\ -\frac{DS \frac{\partial T}{\partial r}|_S}{\rho_p(1-\phi)} & , \quad x_d \leq x \leq L \end{cases} \quad (27)$$

Por outro lado, pode-se definir o gradiente de temperatura total na interface sólido-líquido como sendo:

$$\frac{\partial T}{\partial r}|_s = -\frac{U^*}{1-\delta^*} \frac{T_{ent} - T_{ext}}{R} \theta \quad (28)$$

Além disso, sejam t^* e S^* o tempo e a solubilidade adimensionais, respectivamente dados por:

$$t^* \equiv \frac{Dt}{R^2} \quad (29)$$

$$S^* \equiv \frac{S(T_{ent} - T_{ext})}{\rho_p(1-\phi)} \quad (30)$$

Assim, inserindo as Eq. (28), (29) e (30) na Eq. (27) e usando Eq. (8c), tem-se a taxa adimensional da espessura da camada de parafina, depositada ao longo do tubo, como segue:

$$\frac{\partial \delta^*}{\partial t^*} = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq x^* \leq x_d^* \\ \frac{S^* U^*}{1-\delta^*} \theta & , \quad x_d^* \leq x^* \leq L^* \end{cases} \quad (31)$$

3 SOLUÇÃO NUMÉRICA

A Equação (31) descreve a taxa, no tempo adimensional, da espessura da camada de parafina, sendo esta, uma função implícita da espessura (δ^*), do coeficiente global de transferência de calor (U^*), da temperatura (θ) e da solubilidade (S^*) adimensionais, correspondentes ao óleo em questão. Desenvolveu-se um código computacional, que soluciona os termos, dos quais esta equação depende, a partir da condição inicial $\delta^*(x^*, 0) = 0$. Ao solucionar-se o problema em seu aspecto espacial, com o tempo fixo, chegar-se-á a uma equação diferencial ordinária, de primeira ordem, com valor inicial, para cada subdivisão, no comprimento do tubo. Esta equação é solucionada pelo método numérico Runge-Kutta de quarta ordem, obtendo-se para cada passo de tempo adimensional, a distribuição da espessura da camada de parafina.

A malha numérica é constituída de 1000 pontos nodais, distribuídos uniformemente ao longo do comprimento do tubo. Feito uma série de testes observou-se que esta quantidade é suficiente para descrever o problema com precisão. Para tanto, utiliza-se no programa, um laço (for), onde as variáveis no comprimento do duto são resolvidas, obtendo-se valores, compostos em uma matriz de 1001 linhas e 1000 colunas, sendo as colunas correspondentes ao valor da variável em cada ponto ao longo da direção axial e as linhas são estes valores no decorrer do tempo.

O passo de tempo adimensional é atribuído a cada iteração, um $\Delta t^* = 0,01$, onde as equações são novamente solucionadas, a partir do gradiente na espessura de parafina do passo anterior. Para se aplicar esta condição ao programa, atribui-se outro laço (for), externo aquele feito para discretização geométrica do problema. Desta forma, para cada tempo fixo, resolve-se o problema em marcha, para todo o comprimento do duto.

Para a solução de um caso genérico, em que os valores adimensionais permitem simular o fenômeno, sem a obtenção de valores das propriedades do óleo, variáveis que precisariam ser medidas experimentalmente, adotou-se os dados de entrada reportados na literatura (Bouceta e Kessal, 2011 e Ribeiro et al., 1997).

- ❖ O escoamento se encontra termicamente desenvolvido para todo o tempo e, portanto, o $Nu_{int} = 3.66$ (Incropera et al., 2015).
- ❖ As condutividades térmicas do fluido e do depósito de parafina são aproximadamente as mesmas, i.e. $\left(\frac{k_{int}}{k_d} = 1\right)$.
- ❖ A relação entre o comprimento e o raio do tubo: $\frac{L}{R} = 1000$
- ❖ A temperatura adimensional crítica: $\theta_c = 0.9$.
- ❖ O Nu_{ext} , bem como a k_t são tomados como muito elevados, quando comparados aos valores em que os mesmos estão relacionados, na equação do coeficiente global de transferência de calor.

Desta forma, a Eq. (13) resume-se a seguinte forma:

$$U^* = \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \delta^*} \right) + \frac{2}{Nu_{int}} \right] \quad (32)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Distribuição da Espessura de Parafina

Nos presentes casos, o processo de precipitação de parafina é simulado, mantendo-se o gradiente de pressão, entre a entrada e a saída do tubo, constante e a vazão volumétrica variável. A Equação (22) nos mostra que x_d^* , comprimento do tubo em que se apresenta a deposição dos primeiros cristais de parafina, depende da vazão volumétrica. Desta forma, pode-se observar os pontos de início de precipitação cada vez mais próximos da entrada, ao longo do tempo. Isto se dá devido a formação do depósito de parafina promover uma relativa redução na vazão volumétrica, o que implica em uma maior duração no tempo de contato entre o fluido e a parede fria do tubo, antecipando assim, o comprimento necessário para que óleo atinja a TIAC (Fig 2).

O número de Peclet inicial (Pe_c), é a multiplicação do número de Reynolds pelo número de Prandtl, que por sua vez, representa a razão entre a difusividade de momento e a difusividade térmica, no escoamento em questão. Desta forma, comparando as Fig. 2 e 3, verifica-se que, para altos valores de Pe_c , a difusividade de momento prevalece e tem-se uma maior distribuição de parafina ao longo do comprimento do duto, enquanto que para baixos valores do mesmo, onde a difusividade térmica prevalece, observa-se um estreitamento da região onde se encontra as maiores espessuras na camada de parafina. Também pode-se verificar que quanto menor o Pe_c , a garganta é deslocada para mais próximo da entrada do tubo e a espessura do depósito cresce de forma mais abrupta.

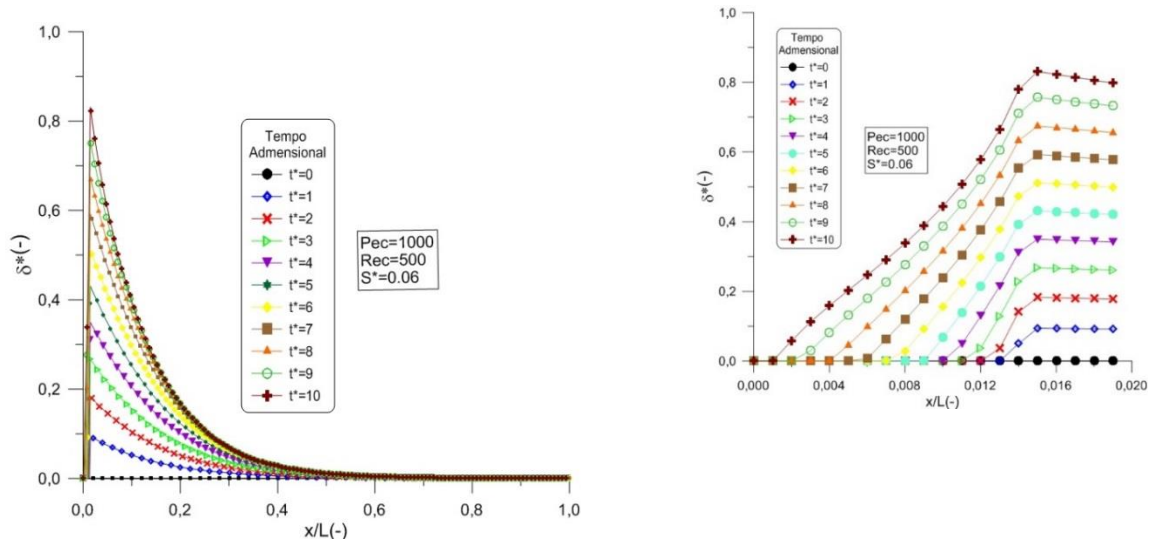


Figura 2 - Distribuição da espessura de parafina ao longo do duto ($Pe_c=1000$, $Re_c=500$ e $S^*=0.06$)

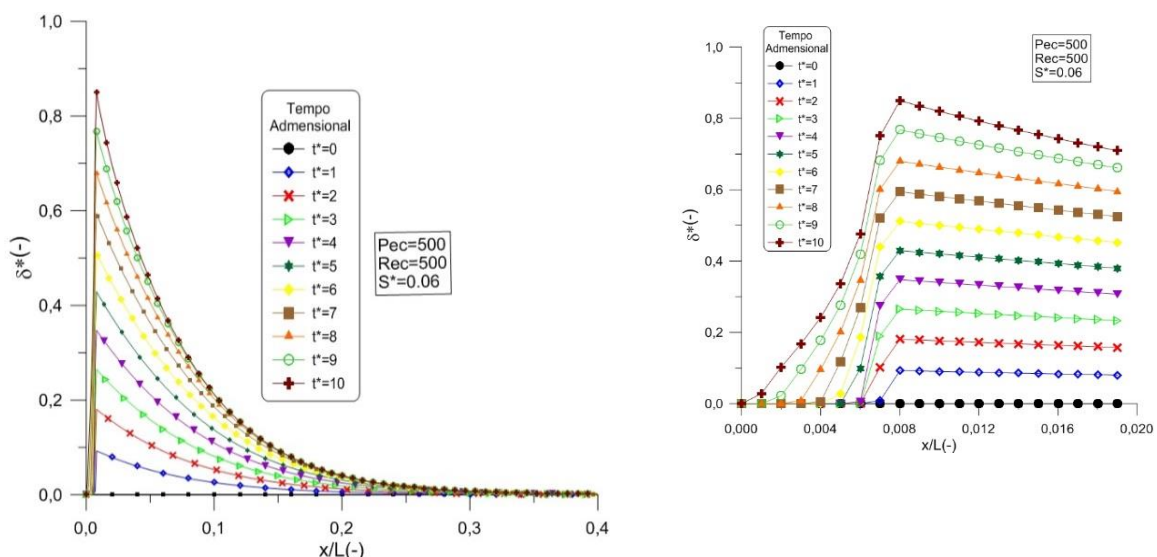


Figura 3 - Distribuição da espessura de parafina ao longo do duto ($Pe_c=500$, $Re_c=500$ e $S^*=0.06$)

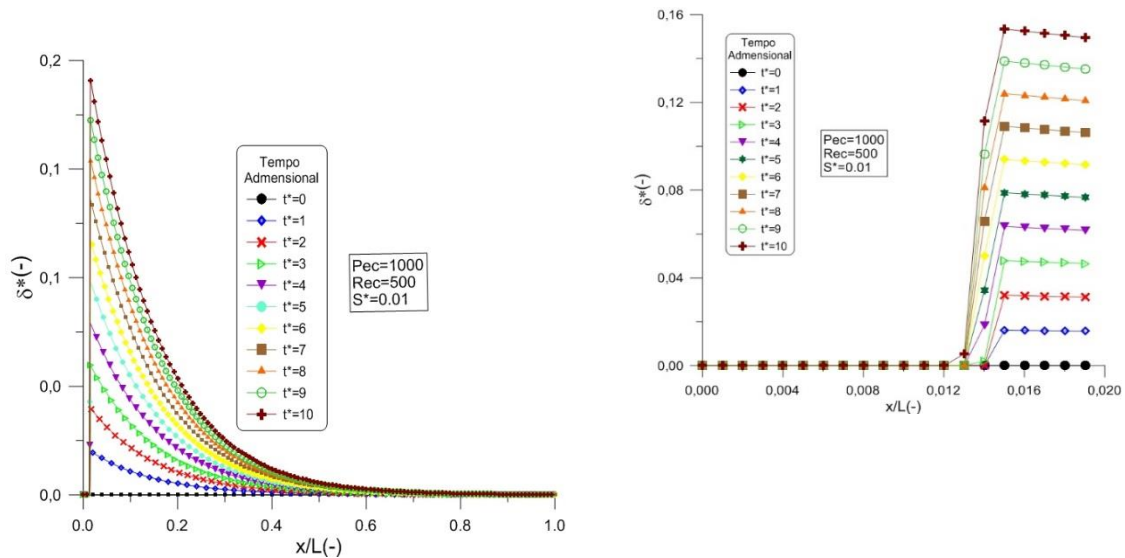


Figura 4 - Distribuição da espessura de parafina ao longo do duto ($Pe_c=500$, $Re_c=500$ e $S^*=0.01$)

A solubilidade adimensional da parafina (S^*) é definida, como mostrado na Eq. (30), pela razão entre concentração de parafina dissolvida na interface sólido-líquido, a variação entre as temperaturas da entrada do fluido e do ambiente externo ao duto, a densidade da parafina precipitada e a porosidade relativa ao depósito formado. Ao variar-se tal fator, observa-se que o nível de parafina depositada é diretamente proporcional ao mesmo, de tal modo que, aumentando-se o parâmetro S^* em aproximadamente 6 vezes, verifica-se, comparando as Fig. (2) e (3), um aumento de aproximadamente 4 vezes na espessura do depósito de parafina, relativa ao raio do duto.

4.2 Distribuição de Temperatura

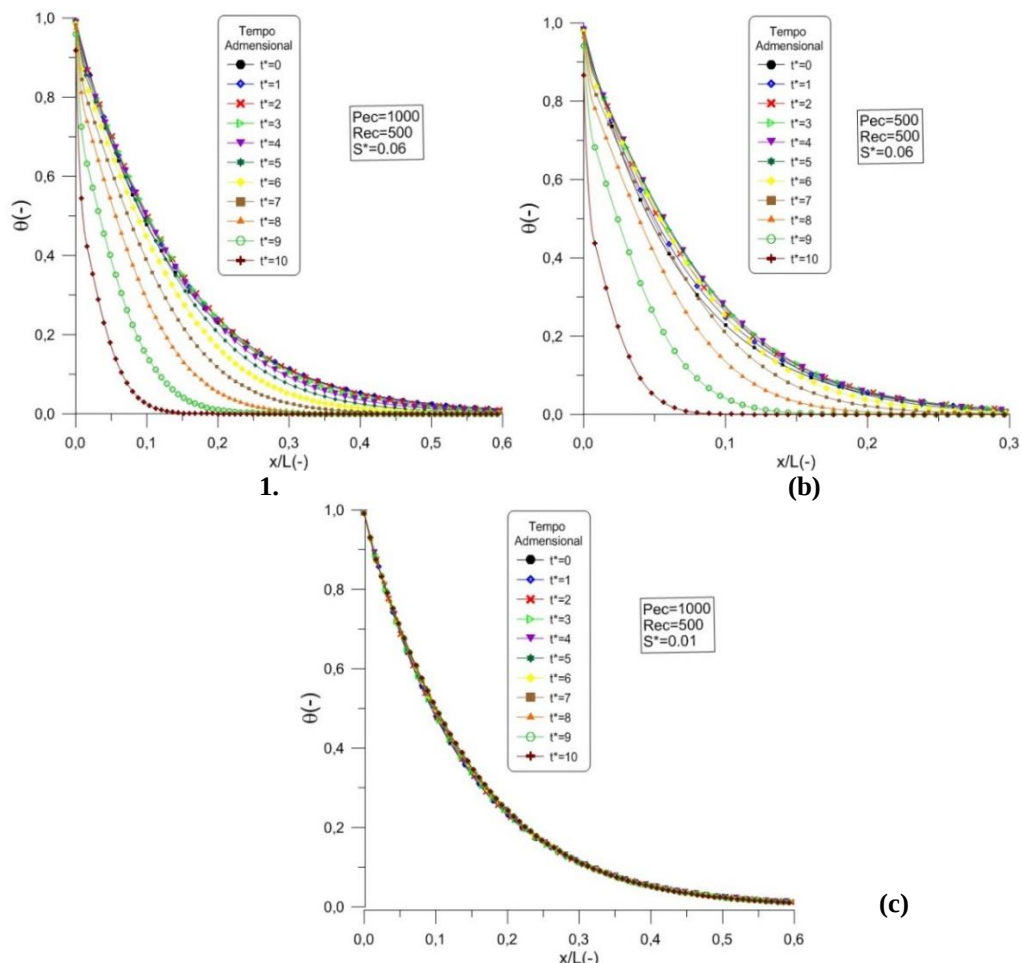


Figura 5 – Distribuição temperatura ao longo do duto: (a) $Pe_c=1000$, $Re_c=500$ e $S^*=0,06$; (b) $Pe_c=500$, $Re_c=500$ e $S^*=0,06$ e (c) $Pe_c=1000$; $Re_c=500$ e $S^*=0,01$)

Nos resultados ilustrados na Fig. 5, observa-se que o equilíbrio térmico é alcançado para comprimentos cada vez menores no decorrer do tempo. Isto se dá, devido ao efeito redutivo na vazão volumétrica, já mencionado. A medida que a vazão volumétrica adimensional decresce, o fluido passa a estar mais tempo em contato com a parede do tubo, fazendo com que efeito acoplado da transferência de calor por difusão e convecção, promova o alcance do equilíbrio térmico, de forma antecipada, no decorrer do tempo. Este efeito é cada vez menos observado, ao se reduzir o S^* (Fig. 5c) devido, nestes casos, a variação na vazão volumétrica, proporcionada pela obstrução do duto com parafina, ser menos significativa. Já para o número de Peclet, observa-se que uma diminuição no mesmo, promove um estreitamento da região necessária ao alcance do equilíbrio térmico. Verifica-se, comparando as Figuras 6a e 6b, que uma queda em 50% do seu valor, equivale também, a metade do comprimento medido, desde a entrada do tubo, onde se observa uma diferença considerável entre a temperatura do fluido e do ambiente externo, e o ponto onde o equilíbrio térmico é atingido. Isto se deve, ao fato de que, baixos números de Peclet, implicam em um transporte de energia térmica, por difusão, mais efetivo, o que nestes casos, promove uma troca térmica mais intensa na entrada do tubo.

4.3 Taxa de Variação da Vazão Volumétrica

A Figura 6 apresenta a vazão volumétrica adimensional em função do tempo, para diferentes condições de operação. Verifica-se que, para baixos valores de Pe_c , a vazão volumétrica se mantém elevada durante um maior período de tempo, mas reduz-se rapidamente, logo em seguida, devido ao perfil de distribuição do depósito de parafina que essa condição de operação promove. Já para um S^* baixo, observa-se uma pequena variação na vazão volumétrica, devido a este parâmetro ser diretamente proporcional ao nível de obstrução do duto. Uma variação do número de Reynolds inicial (Re_c) não afeta o comportamento da vazão volumétrica adimensional e, portanto, não tem influência direta no processo de deposição de parafina.

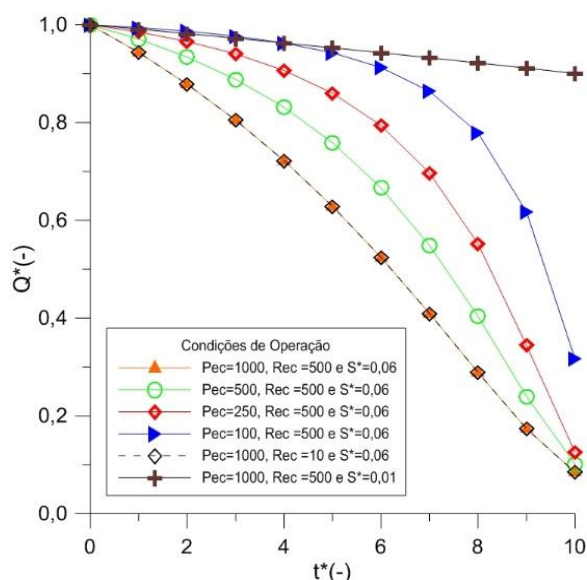


Figura 6- Taxa de variação da vazão volumétrica para diferentes condições de operação

Apesar de não ter sido apresentado o resultado de validação, vale ressaltar que toda a formulação foi validada com os resultados de campo obtidos por Ribeiro et al. (1997) e com os resultados analíticos de Fox et al. (2014), desenvolvidos para um escoamento monofásico, sem precipitação de parafina. Reduzindo-se, no simulador numérico, o parâmetro S^* para o valor de 10^{-4} , pôde-se observar uma convergência dos resultados numéricos e analíticos, em elevada precisão.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que o número de Peclet inicial apresentou influência relevante ao processo de crescimento do depósito de parafina. A região onde se encontra elevada espessura de depósito é restrita a uma pequena fração do comprimento do tubo quando este parâmetro é reduzido e se distribui ao longo do comprimento ao passo que o mesmo é aumentado. O coeficiente de solubilidade mostrou ser um parâmetro fundamental do problema. Observou-se que a medida do alcance da espessura do depósito de parafina é diretamente proporcional a este parâmetro. Quanto maior o S^* , maior a espessura da camada de parafina depositada no duto e uma maior redução na vazão volumétrica, no decorrer do tempo é observada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES, FINEP, PETROBRAS e ANP/ PRH-42/ UFCG pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Bouceta, R. e Kessal, M., 2011, "Effect of the Latent Heat on Wax Deposit in Pipelines", Defect and Diffusion Forum, Vol.312-315, pp 154-159.
- Burger, E.D., Perkins T.K. e Striegler J.H., 1981, "Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline", Journal of Petroleum Technology, Vol 33, No 6, pp.1075-1086.
- Fox, R. W., Philip. J. P. e Alan, T. M., 2014, "Introdução a Mecânica dos Fluidos", 8. ed., Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 342 p.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P., Theodore, L. B. e Adrienne, S. L., 2015, "Fundamentos de Transferência de Calor e Massa"; 7. ed., Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 341 p.
- Morán, L. R. M., 2007, "Simulação Numérica de Deposição de Parafina em Dutos de Petróleo. Avaliação dos Mecanismos de Difusão Molecular e Difusão Browniana", Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- Ribeiro, F. S., Souza, M. P. R. e Braga, S. L., 1996, "Obstruction of Pipelines Due to Paraffin Deposition During the Flow of Crude Oils"; Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No 18, pp. 4319-4328.
- Souza, M. P. R. e Braga, S. L., 1996, "Obstruction of Pipelines During the Flow of Waxy Crude Oils", Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, No 4, pp. 722-728.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

Flow of Waxy Oils in Pipelines: A Numerical Study

Túlio Rafael Nascimento Porto, tuliorafael2010@hotmail.com¹

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br²

¹Federal University of Campina Grande, Center of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58429-900, Campina Grande – PB.

Abstract: The precipitation of heavy hydrocarbons, in a form of steady crystals of wax, that tend to deposit in a wall of production lines, is an actual problem of petroleum industry. It continues promoting researches, on pipelines and equipments that searching extend the knowledge about this phenomenon and developing preventive maintenance activities, with more efficiency. This work presents a theoretical study of wax oil transport in horizontal tube. For describe the phenomenon, was used a mathematical model, considering the molecular diffusion as a dominate mechanism in wax deposition process, for temperatures below the temperature of initial appearance of crystals (TIAC), the petroleum as a binary and homogenous mixture whose wax is a solute, in a laminar flow, fully developed for the oil phase, in a bidirectional system. The problem involves equations of fluid mechanic, heat transfer, transition and mass transport, formulated and solved numerically which the aid of software MATLAB®, by an iterative solution method, associate to the Runge-Kutta of fourth order method. Results of wax layer thickness, distribution of temperature and volumetric flow rate, along the tube, in during the process, are presents and analyzed for different initial values of Reynolds Number (Re_c), Peclet (Pe_c) parameter and dimensionless coefficient of solubility (S^*). It was observed, that increase on Re_c , in laminar flow, don't promotes variation in a comportment of layer of wax deposited. The increase on Pe_c is responsible to the layer of wax do not accumulate in a short part of the tube, which cause abrupt drops in volumetric flow rate and pressure, in over time. The S^* parameter, reveal to be directly associate to a biggest thickness of deposit, in relation to the radius of the tube, which is a function of temperature gradient, between the oil and the external environment, and physical property of waxy deposit.

Key Words: Flow, Temperature, Wax oil, Numerical study, Molecular diffusion.