

MATHEUS RODRIGUES SPEDALETTI

**Modelo para determinação da espessura da camada de asfalteno
depositada em tubulação horizontal**

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo

Orientador:
Prof. Dr. Rafael dos Santos Goria

Santos
2018

MATHEUS RODRIGUES SPEDALETTI

**Modelo para determinação da espessura da camada de asfalto
depositada em tubulação horizontal**

(TFII-2018-1#03)

Monografia de Trabalho de Formatura
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharelado em Engenharia de
Petróleo

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo

Orientador:
Prof. Dr. Rafael dos Santos Goria

Santos
2018

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho aos colegas de turma de Engenharia de Petróleo ingressantes em 2013 na Escola Politécnica da USP, especialmente ao amigo Pedro Ivo Cervantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio e suporte, durante a graduação e em todos os outros momentos. Em segundo aos professores da Escola Politécnica com os quais tive o prazer de aprender durante os últimos anos. E por fim, agradeço especialmente ao professor Rafael Gioria, da Escola Politécnica da USP, e professor Francisco Vargas, da Rice University, por me acompanharem na elaboração do presente trabalho.

EPÍGRAFE

"Se você quiser
Se você se esforçar
Se você treinar
Se você entrar de cabeça
Se você se concentrar
Nada garante que você vai conseguir"

Daniel Furlan

RESUMO

O processo de deposição do asfalteno é de grande interesse para a indústria do petróleo. O mesmo frequentemente causa entupimento da tubulação, o que leva a limitações de fluxo e aumento dos custos de manutenção associados. Prever zonas de deposição é um passo fundamental para prevenir a ocorrência de entupimento e mitigar os problemas associados à acumulação de asfalteno. No presente trabalho, uma nova abordagem para modelar a deposição de asfalteno dentro de uma tubulação horizontal é apresentada. O modelo faz uso de um balanço de forças e de um perfil de velocidades do fluxo para descrever as trajetórias de partículas de asfalteno já precipitadas, para prever a taxa e perfil de deposição. Um método para determinar a espessura do depósito de asfalteno em função do tempo para fluxo em uma tubulação horizontal foi desenvolvido, e as simulações mostram uma concentração da deposição na região dos 10 metros mais próximos à entrada da tubulação.

Palavras-chave: petróleo, asfalteno, deposição, fluxo horizontal, simulação, modelo, MATLAB

ABSTRACT

The asphaltene deposition process is of great interest to the oil industry. It often causes pipe clogging, which leads to flow restrictions and associated high maintenance costs. Predicting deposition zones is a fundamental step in order to prevent the occurrence of clogging and mitigate the problems associated with asphaltene accumulation. In the present work, a novel approach for modeling asphaltene deposition inside a horizontal pipe is presented. The model makes use of a force balance and a flow velocity profile to describe the trajectories of already precipitated asphaltene particles, predict the rate of deposition and the deposit profile. A method to determine asphaltene deposit thickness as a function of time for flow inside a horizontal pipe was developed, and simulations results show a concentration of deposition in a 10 meters long region near the inlet.

Key-words: **oil, asphaltene, deposition, horizontal flow, simulation, model, MATLAB**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 OBJETIVO	4
1.2 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS	9
3.1 PERFIL DE VELOCIDADES	9
3.2 TRAJETÓRIA DAS PARTÍCULAS DE ASFALTENO	11
3.3 PERFIL DE DEPOSIÇÃO	12
3.4 APORTE DE ASFALTENO	13
3.5 ESPESSURA DA CAMADA DE ASFALTENO	14
3.6 CALIBRAÇÃO DO MODELO	15
3.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1 VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	21
4.2 ESTUDO DE CASO	26
5 CONCLUSÕES	32
6 REFERÊNCIAS	33
7 APÊNDICE	34
7.1 NOMENCLATURA	34
7.2 CÓDIGO MATLAB	35

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Todas as figuras foram produzidas pelo autor, por meio dos softwares Microsoft Excel, Microsoft PowerPoint e MATLAB, exceto quando explicitamente indicado.

1	Tubulação parcialmente obstruída por deposição de asfalteno nas paredes internas	4
2	Estrutura da dissertação	5
3	Divisão da tubulação em bandas para contagem de partículas depositadas	13
4	Análise de sensibilidade do perfil de temperatura à condutividade térmica da água a diferentes temperaturas	23
5	Análise de sensibilidade do perfil de temperatura à espessura da tubulação	24
6	Análise de sensibilidade do perfil de temperatura ao material da tubulação	25
7	Perfil de velocidades do fluxo interno determinado pela equação da lei de potência com o valor calculado do expoente n	27
8	Ilustração do modelo tridimensional para trajetória e local de deposição utilizando amostra de 10^4 partículas de asfalteno	28
9	Porcentagem média depositada para três bandas diferentes como função do número de iterações utilizando 10^4 partículas de asfalteno	28
10	Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 15 dias de deposição	29
11	Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 30 dias de deposição	29
12	Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 45 dias de deposição	30
13	Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 60 dias de deposição	30

LISTA DE TABELAS

Todas as tabelas foram produzidas pelo autor, exceto quando explicitamente indicado.

1	Valor do expoente n empiricamente determinado de acordo com o número de Reynolds	10
2	Iterações it necessárias até obter-se a precisão desejada para diferentes tamanhos de amostra de partículas	16
3	Constantes da Equação 30 para para cilindro circular em fluxo cruzado	19
4	Parâmetros de fluxo para estabelecer o perfil de temperatura	21
5	Condutividade térmica de água oceânica com salinidade 0,0035 kg/kg para diferentes temperaturas	22
6	Espessuras possíveis para a tubulação escolhida	23
7	Condutividade térmica de alguns materiais de tubulação	24
8	Propriedades escolhidas para o estudo de caso	26

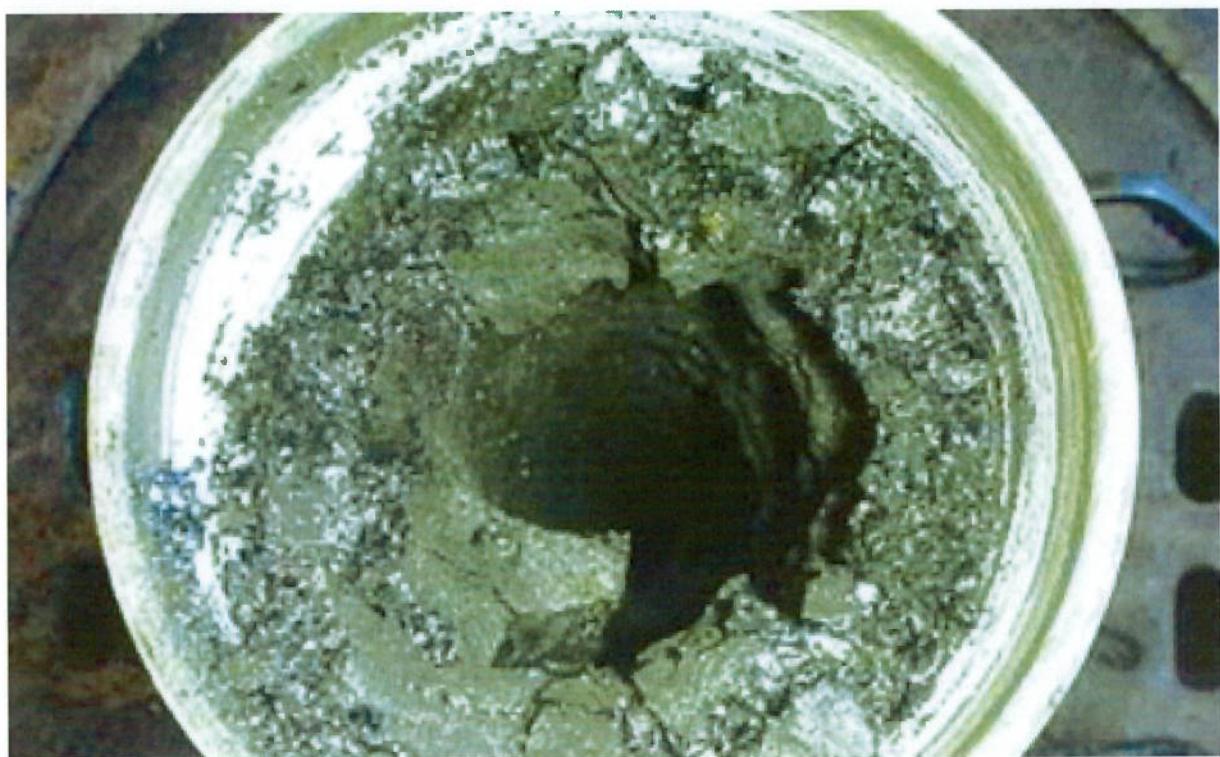
1 INTRODUÇÃO

Asfaltenos são definidos como a fração mais pesada e mais polarizável do óleo cru (VARGAS et al., 2009). São amplamente classificados como a fração do petróleo que é insolúvel em alcanos leves, tais como o n-pentano ou o n-hexano, mas solúveis em tolueno ou benzeno em condições ambientes (MITCHELL; SPEIGHT, 1972).

Precipitação e deposição de asfalteno são ambos problemas relevantes e recorrentes para a indústria do petróleo. Esses fenômenos causam um grande aumento nos custos operacionais, devido à requerida manutenção dos equipamentos de superfície e de fundo de poço (CREEK, 2005). Além disso, podem levar a uma diminuição da receita, por causa de uma redução do fluxo nas tubulações causado pelo processo de entupimento, e pelo tempo de parada para manutenção associado.

A precipitação de asfalteno também pode causar aumento da viscosidade do óleo, impactando negativamente a produtividade do poço. Em situações extremas, a deposição pode atingir uma escala em que toda a tubulação é obstruída, completamente bloqueando a produção até que a necessária limpeza e manutenção seja realizada (VARGAS et al., 2010). A Figura 1 ilustra uma situação de deposição acentuada de asfalteno em parede de tubulação.

Figura 1: Tubulação parcialmente obstruída por deposição de asfalteno nas paredes internas



Fonte: ChemEOR, disponível em <http://www.chemeor.com/production-chemicals/>, acesso em maio de 2018

Entender a ocorrência de deposição é uma etapa fundamental para mitigar os problemas causados por tal fenômeno. Um passo subsequente é a previsão das zonas de deposição por meio de um modelo de fluxo, de forma a antecipar as possíveis complicações, portanto reduzindo custos operacionais e aumentando a produtividade (KOR; KHARRAT, 2016).

Alguns modelos foram desenvolvidos recentemente para melhor compreender a deposição de asfalteno e prever o processo de deposição, tais como os propostos por Ramirez-Jaramillo et. al. (2006), Vargas et. al. (2010), Mirzayi et. al. (2013), e Kor e Kharrat (2016). Entretanto, nenhum deles abordou o problema específico da deposição de asfalteno dentro de tubulações horizontais.

1.1 OBJETIVO

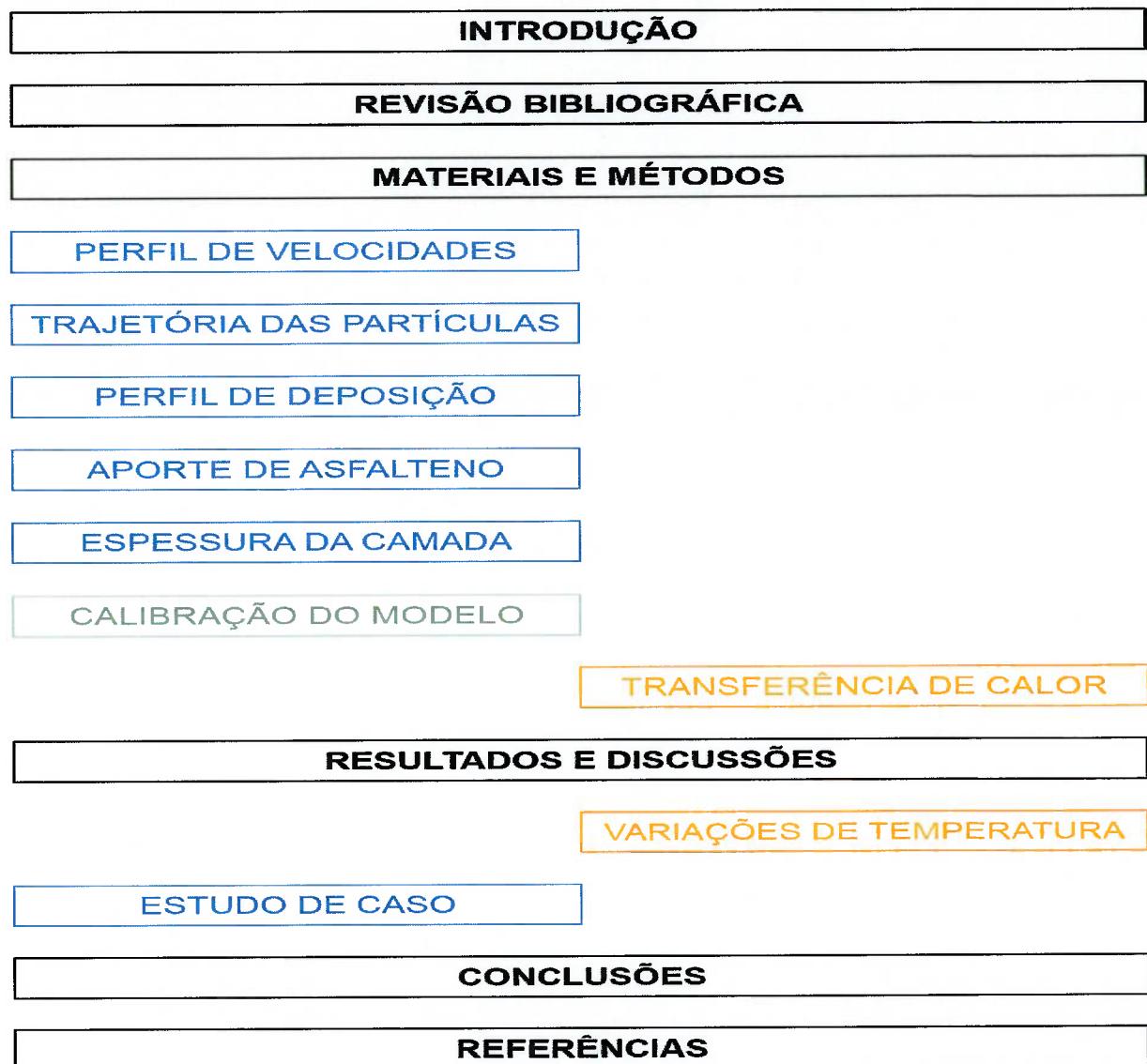
O objetivo do presente trabalho é determinar o perfil de deposição de asfalteno dentro de uma tubulação horizontal, de acordo com as características do fluxo, tais

como a geometria da tubulação e taxa de escoamento, de modo a prever as regiões de maior acumulação e entender como mitigar o entupimento.

1.2 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

O presente trabalho encontra-se estruturado conforme descreve a classificação mostrada na Figura 2.

Figura 2: Estrutura da dissertação



As caixas de texto representam, em ordem de aparecimento, as seções e subseções presentes na dissertação; as seções estão denotadas por caixas de texto pretas, as subseções referentes às equações cinemáticas da deposição estão em caixas azuis, em cinza estão as subseções de análise numérica do modelo, e as subseções

em laranja denotam as considerações acerca de fenômenos termodinâmicos no escoamento.

Caixas centralizadas contém aspectos relevantes ao desenvolvimento do trabalho como um todo. O alinhamento das caixas à esquerda indica sua implementação no modelo final de simulação, enquanto o alinhamento à direita denota ferramentas desenvolvidas e discutidas que não foram incluídas na execução da simulação, por motivos doravante discutidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram propostos uma série de modelos de simulação de precipitação e deposição de asfalteno, cada qual com sua abordagem própria.

Ramirez-Jaramillo et. al. (2006) propuseram um modelo multifásico multicompõente, diferenciando água, óleo, gás e asfalteno, para representar o processo de deposição de asfalteno em poços de produção. Baseando-se na suposição de que partículas de asfalteno se formam termodinamicamente a uma determinada combinação de pressão, temperatura e profundidade durante o fluxo, o modelo tratou o problema considerando a difusão molecular das partículas de precipitado e a remoção por círculo hídrico do precipitado das paredes do poço como processos concorrentes. A deposição foi analisada a partir do comportamento reológico das quatro fases, tanto para fluxo laminar quanto turbulento, considerando difusão molecular dos agregados de asfalteno na direção radial do fluxo e desprezando efeitos eletro cinéticos. Os principais resultados obtidos pelo modelo estabelecido foram que o problema de deposição de sólidos está ligado aos estágios iniciais da produção, e que a taxa de crescimento do depósito continua constante independente da vazão no poço, variando apenas a profundidade da região em que se concentrará o depósito.

Vargas et. al. (2010) fizeram uma ferramenta de simulação que considera simultaneamente os processos de precipitação, agregação e deposição do asfalteno, combinando a equação de estado do tipo *Perturbed Chain Form of the Statistical Associating Fluid Theory* (PC-SAFT) com modelos cinéticos e equações de transporte. Através do uso do software comercial VLXE, o modelo foi implementado com sucesso para os regimes estacionário e transiente, também para poços verticais de produção de petróleo. As contribuições mais relevantes do modelo foram a elucidação de aparentes paradoxos, como o fato de alguns inibidores de precipitação de asfalteno apenas piorarem esse processo, enquanto alguns precipitantes (como o propano) produzirem menor quantidade mássica de deposição. Em aberto, o estudo de Vargas et. al. deixou a modelagem de troca de calor para incluir mudanças de temperatura do escoamento na simulação, ponto que o presente trabalho almeja explorar.

Mirzayi et. al. (2013) propuseram um estudo para tubulação horizontal de petróleo, considerando como mecanismos de deposição de asfalteno a difusão e arraste browniano, força gravitacional, Efeito Soret de termoforese, empuxo dos agregados e

remoção das partículas depositadas por cisalhamento. Equacionando individualmente os efeitos de cada um desses fenômenos na precipitação, agregação e deposição das partículas de asfalteno, os autores foram capazes de compará-los em termos de intensidade para determinar quais deles eram mais relevantes na ocorrência desses eventos. Os resultados, obtidos através da variação dos parâmetros de tamanho de partícula, gradiente de temperatura e velocidade do fluido, mostraram que o Efeito Soret de termoforese e o efeito gravitacional tiveram papel mais significante na deposição dos agregados, embora o modelo estabelecido tenha sido comparado apenas com dados sobre deposição de aerossóis da literatura, por falta de melhores alternativas.

Kor e Kharrat (2016), por sua vez, propuseram um modelo de simulação para um poço vertical e corroboraram as descobertas de Ramirez-Jaramillo et. al. (2006) de que os estágios iniciais de produção são os que mais apresentam problemas de deposição de asfalteno. O modelo foi dividido em blocos de simulação, cada um responsável por avaliar um aspecto do problema: fluxo multifásico, troca de calor, modelo de precipitação e modelo de deposição. O modelo de simulação foi capaz de prever com alta acurácia a espessura acumulada de asfalteno, e o tempo previsto para entupimento do poço, quando calibrado através de regressões e aplicado a dados obtidos da literatura. Portanto, essa abordagem segmentada de descrição das etapas de análise do problema, por seu maior detalhamento do raciocínio de modelagem computacional e alta eficiência demonstrada, será a adotada pelo presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para descrever o perfil de deposição ao longo de uma tubulação horizontal, é necessário primeiro descrever o fluxo de óleo em si. Isso é feito por meio da determinação de um perfil de velocidades do fluxo, baseado em propriedades tais quais vazão volumétrica, densidade e viscosidade, medidas na saída da tubulação.

Em seguida, são determinadas as trajetórias das partículas ao longo da tubulação até que as mesmas atinjam a parede e depositem-se. O perfil de deposição é numericamente determinado, a taxa de aporte de partículas de asfalteno na entrada da tubulação é estabelecida, e então é apresentado um método para calcular a espessura da camada como função do tempo.

Finalmente, o modelo é calibrado e uma implementação com valores numéricos é realizada no estudo de caso. Em paralelo, são também modeladas as trocas de calor entre fluido, tubulação e meio exterior, e a aplicabilidade do modelo termodinâmico desenvolvido é estudada por meio de análises de sensibilidade para que sua implementação na simulação possa ser discutida.

Todas as etapas previamente descritas foram realizadas por meio de uma simulação que permite entradas de parâmetros geométricos e propriedades do óleo por parte do usuário, implementada em MATLAB. A simulação resulta no comportamento da espessura da camada depositada ao longo da tubulação de acordo com o tempo.

3.1 PERFIL DE VELOCIDADES

A velocidade média do fluxo de petróleo no interior da tubulação é determinada com base na vazão volumétrica na saída do tubo, como descrito pela Equação 1:

$$\bar{u}_x = \frac{\dot{V}}{A} \quad (1)$$

onde u_x é a velocidade média ao longo do comprimento do tubo, \dot{V} é a taxa volumétrica de óleo na saída, e A é a área da seção transversal da tubulação.

A velocidade local como função do raio da tubulação é determinada considerando que o fluxo obedece um perfil de velocidades parabólico e proporcional à certa potência, como descrito pela Equação 2:

$$u_x = U_x \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad (2)$$

onde u_x é a velocidade local na direção do comprimento da tubulação, U_x é a velocidade local máxima do fluxo, r é a coordenada radial dentro do tubo, R é o raio da tubulação, e o expoente n é o expoente empírico de ajuste da equação.

O valor de U_x é inicialmente estimado e depois iterado utilizando cem valores igualmente espaçados de r , até que a velocidade média calculada entre os cem pontos difira de \bar{u}_x não mais do que 10^{-4} . O expoente n depende do número de Reynolds, descrito pela Equação 3:

$$Re = \frac{\rho_{oil} \bar{u}_x 2R}{\mu} \quad (3)$$

onde Re é o número de Reynolds, adimensional, ρ_{oil} é a densidade do óleo, \bar{u}_x é a velocidade média do fluxo e μ é a viscosidade dinâmica do óleo.

O valor do expoente n foi estudado para uma série de condições de fluxo. Para o propósito do presente trabalho, uma correlação simples por meio de polinômio de segundo grau foi desenvolvida utilizando o método dos mínimos quadrados e os dados da literatura (ROHSENOW et al., 1985), impondo também a restrição empírica do valor de n não ser maior que dez. O expoente n é então calculado por meio da Tabela 1, base para a regressão linear que culmina na Equação 4.

Tabela 1: Valor do expoente n empiricamente determinado de acordo com o número de Reynolds

Número de Reynolds Re	Expoente n
4000	6
2.3×10^4	6.6
1.1×10^5	7.6
1.1×10^6	8.8
2×10^6	10
3.2×10^6	10

Fonte: (ROHSENOW et al., 1985)

$$n = (-5 \times 10^{-13})Re^2 + (3 \times 10^{-6})Re + 6.3859 \quad (4)$$

onde Re é o número de Reynolds.

O perfil de velocidades calculado é assumido constante para a totalidade do comprimento da tubulação, ignorando-se possíveis variações locais das propriedades do óleo.

3.2 TRAJETÓRIA DAS PARTÍCULAS DE ASFALTENO

Após determinar-se a taxa de aporte de partículas de asfalteno, a trajetória dessas partículas deve ser analisada. A meta é rastrear o posicionamento de uma partícula desde sua entrada na seção da tubulação até que a mesma atinja a parede interna do tubo e deposite ou então viaje a totalidade do comprimento da tubulação. Considerando um sistema de coordenadas cilíndricas, a posição da partícula é $p_{(r,\theta,x)}$ em $t=0$. Essa posição inicial é gerada aleatoriamente.

O comportamento da posição da partícula pode ser melhor descrito separando sua movimentação em duas direções: radial e axial. A movimentação radial consiste de um pequeno objeto depositando-se em um meio fluido, um fenômeno físico descrito pela Lei de Stokes, mostrada na Equação 5:

$$F_{gravity} = F_{drag} + F_{buoyancy} \quad (5)$$

válida na velocidade terminal. Cada termo de força F pode ser calculado conforme descrito pelas Equações 6 a 8:

$$F_{gravity} = \frac{4}{3}\pi r_{asph}^3 \rho_{asph} g \quad (6)$$

$$F_{drag} = 6\pi\mu r_{asph} u_r \quad (7)$$

$$F_{buoyancy} = \frac{4}{3}\pi r_{asph}^3 \rho_{oil} g \quad (8)$$

onde g é a aceleração gravitacional. Substituindo as Equações 6 a 8 na Equação 5, uma expressão para a velocidade da partícula na direção radial é obtida, como descrito pela Equação 9

$$u_r = \frac{2r_{asph}^2 g}{9\mu} (\rho_{asph} - \rho_{oil}) \quad (9)$$

Portanto, para um instante qualquer, a velocidade radial da partícula pode ser obtida como função da viscosidade média do óleo, densidade do óleo e densidade da partícula de asfalteno.

A coordenada axial x da partícula varia conforme a velocidade do fluxo, já que as partículas de asfalteno estão sendo carregadas pelo fluxo de óleo. Dessa forma, a velocidade axial de uma partícula em uma dada posição é calculada pela Equação 2.

A partir da posição inicial da partícula de asfalteno, aleatoriamente gerada, sua trajetória é determinável atualizando as coordenadas radial e axial escolhendo-se um

intervalo de tempo dt . As novas coordenadas $p_{(r',\theta',x')}$ em um instante $t' = t+dt$ são calculadas conforme descrito pelas Equações 10, 11 e 12:

$$x' = x + u_r dt \quad (10)$$

$$\theta' = \text{atan} \left(\frac{u_r dt}{r \cos \theta} + \tan \theta \right) \quad (11)$$

$$r' = \frac{r \cos \theta}{\cos \theta'} \quad (12)$$

O cálculo das novas coordenadas é repetido até que a partícula toque o interior da parede da tubulação em $r = R$ ou até que a partícula viaje a totalidade do comprimento da seção e atinja $x > L$, L sendo o comprimento da tubulação.

3.3 PERFIL DE DEPOSIÇÃO

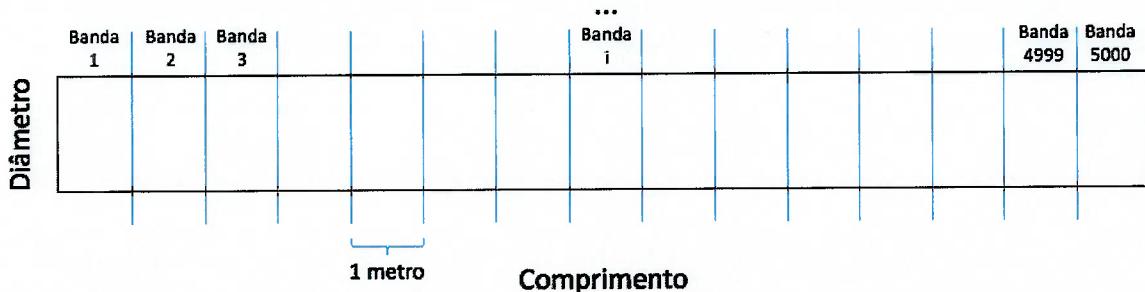
Saber prever a trajetória de cada partícula de uma determinada amostra, desde a entrada na tubulação até a saída ou até o momento de deposição, é fundamental na determinação do perfil de acúmulo de asfalteno ao longo da tubulação. Entretanto, dado o caráter aleatório da geração da posição inicial das partículas, é preciso verificar a consistência de resultados utilizando uma série de simulações e analisando variações.

Para tanto, deve-se determinar a distribuição da deposição a partir de uma amostra de partículas aleatoriamente distribuídas pela seção transversal da entrada da tubulação. A coordenada x final de cada partícula é obtida conforme descrito na seção 3.2.

O comprimento da tubulação é dividido em bandas de igual tamanho, de forma a ser possível estabelecer quantas partículas de asfalteno depositam-se em cada intervalo, contando-se o número de partículas que atingem cada banda para compará-lo entre as várias simulações.

A divisão da tubulação em bandas é ilustrada pela Figura 3.

Figura 3: Divisão da tubulação em bandas para contagem de partículas depositadas



O procedimento de contagem é repetido it vezes para um mesmo tamanho escorrido da amostra de partículas, até que a diferença entre o número médio de partículas que depositaram em cada banda considerando $it - 1$ e it repetições não seja maior do que a precisão desejada, de 10^{-4} . Esse critério de parada é descrito pela Equação 13:

$$\frac{\sum_1^{it} y_i}{it} - \frac{\sum_1^{it-1} y_i}{it-1} \leq \xi \quad \forall i \quad (13)$$

onde ξ é a precisão desejada e y_i denota a porcentagem de partículas depositada em cada banda, i sendo o índice da banda.

Esse procedimento resultará em um perfil de contagem de partículas, que representa a porcentagem das partículas de asfalto aportadas na tubulação a atingir cada banda.

3.4 APORTE DE ASFALTO

O modelo elaborado assume que as partículas de asfalto que se depositarão ao longo do interior das paredes da tubulação já precipitaram antes de atingir a seção horizontal descrita. Isso significa que as partículas sólidas de asfalto já estão presentes na mistura na entrada do fluxo.

A quantidade de partículas presentes é função da fração mássica de asfalto no óleo, combinada com a hipótese de que todas as partículas na entrada do fluxo possuem o mesmo raio, o que pode ser expresso de acordo com a Equação 14:

$$N_{asph} = \frac{3w_{asph}\rho_{oil}}{4\pi r_{asph}^3 \rho_{asph}} \quad (14)$$

onde N_{asph} é o número de partículas precipitadas de asfalto por unidade de volume de óleo, w_{asph} é a fração mássica de asfalto na mistura, r_{asph} é o raio das partículas

de asfalteno, ρ_{oil} é a densidade do óleo e ρ_{asph} a densidade do asfalteno.

Para obter a quantidade de partículas de asfalteno entrando na seção da tubulação como uma função do tempo, a taxa de aporte de partículas de asfalteno é calculada por meio da Equação 15:

$$\dot{N}_{asph} = N_{asph} \dot{V} \quad (15)$$

onde \dot{N}_{asph} é a taxa de aporte das partículas de asfalteno. Combinando as Equações 14 e 15, tem-se uma estimativa do número de partículas entrando na seção da tubulação por segundo, como função da geometria do tubo, parâmetros do fluxo e propriedades do óleo, como descrito pela Equação 16:

$$\dot{N}_{asph} = \frac{3w_{asph}\rho_{oil}\bar{u}_x A}{4r_{asph}^3 \rho_{asph}} \quad (16)$$

3.5 ESPESSURA DA CAMADA DE ASFALTENO

Não muito é conhecido acerca da maneira exata pela qual as partículas de asfalteno se depositam (CREEK, 2005), (VARGAS et al., 2010). Dessa forma, é preciso adotar algumas suposições para tornar possível descrever o processo de deposição.

As partículas de asfalteno, por seu tamanho, são assumidas como tendo um comportamento análogo ao de um fluido, o que significa que seu movimento de acomodação pode ser comparado ao de um líquido. Portanto, quando depositando-se ao longo das paredes internas da tubulação cilíndrica, as partículas devem se comportar de forma a homogeneousmente preencher o volume de uma seção.

Assim, a situação se torna análoga a determinar a altura de um fluido, do fundo de um cilindro horizontal, correspondente a certo volume. A expressão que descreve o volume de um cilindro horizontal como função de sua altura é dada pela Equação 17:

$$V(h) = L[R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R - H}{R} \right) - (R - h)\sqrt{2Rh - H^2}] \quad (17)$$

onde H é a altura a partir do fundo do cilindro.

Esse volume será ocupado pelas partículas depositadas de asfalteno. Assumindo a simplificação prévia de todas as partículas possuírem igual raio, descrita na seção 3.4, a taxa de aumento do volume ocupado por partículas de asfalteno pode ser calculada como função do aporte de partículas, como indicado pela Equação 18:

$$\dot{V}_{asph} = \frac{4}{3\eta} \pi r_{asph}^3 \times \dot{N}_{asph} \quad (18)$$

onde η é o fator de empacotamento em deposições aleatórias, entre 0.640 e 0.644 como determinado na literatura (JAEGER; NAGEL, 1992).

A altura da camada de asfalteno, entretanto, não é a mesma ao longo de toda a extensão da tubulação. Portanto, para cada uma das bandas nas quais o tubo foi dividido durante a etapa de contagem de partículas, a altura depende da porcentagem y_i da amostra a atingir a região.

Uma expressão para a altura da camada de asfalteno em uma banda i qualquer como uma função do tempo é então obtida combinando as Equações 17, 18 e o perfil de deposição obtido da Equação 13, como descrito pela Equação 19:

$$y_i \dot{V}_{asph} t = L \left[R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R - H_i}{R} \right) - (R - H_i) \sqrt{2Rh_i - H_i^2} \right] \quad (19)$$

onde t é o tempo decorrido e a equação é resolvida para H_i . Isso permitirá que a espessura da camada de asfalteno seja calculada para cada segmento da tubulação, isto é, as bandas determinadas, em um instante de tempo t .

3.6 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para garantir a acurácia dos resultados obtidos na seção 3.3, uma série de simulações deve ser realizada e os resultados comparados entre si. Essa repetição pode ser feita variando-se o tamanho da amostra inicial, o que por consequência altera o número de iterações necessárias para atingir o critério de parada.

É intuitivo que simulações com poucas partículas sejam mais rapidamente calculadas, mas provoquem grande variação entre testes, e portanto elevem o número de testes; da mesma forma, simulações utilizando grandes amostras diminuiriam essa discrepância, atingindo o critério de parada com menos iterações, mas demandando maior poder computacional e por isso levando mais tempo para serem simuladas.

Dessa forma, visando minimizar o tempo gasto no cálculo do perfil de deposição, um tamanho adequado de amostra de partículas de asfalteno deve ser escolhido para realização das simulações. Esse tamanho pode ser obtido comparativamente, realizando-se testes com diferentes amostras e comparando-se o tempo de processamento envolvido em cada caso.

A Tabela 2 ilustra a série de testes que foi executada para diferentes tamanhos de amostra de partículas, e o tempo necessário para atingir a precisão desejada estabelecida na Equação 13 registrado para cada tamanho de amostra.

Tabela 2: Iterações it necessárias até obter-se a precisão desejada para diferentes tamanhos de amostra de partículas

Número de partículas	10^1	5×10^1	10^2	5×10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
Execução 1	99863	19886	9883	3849	2000	612	169	53
Execução 2	99858	19880	9895	3872	2388	611	167	52
Execução 3	99842	19888	9912	3873	2245	568	161	52
Execução 4	99841	19888	9895	3860	2234	600	165	47
Execução 5	99853	19887	9912	3867	1957	595	182	57
Execução 6	99861	19886	9891	3869	1923	611	166	58
Execução 7	99858	19887	9899	3859	2132	611	168	60
Execução 8	99854	19891	9888	3838	1959	568	163	60
Execução 9	99862	19878	9884	3856	1976	611	172	51
Execução 10	99846	19881	9892	3873	2075	568	172	49
\bar{it}	99853.6	19884.2	9895.1	3861.6	2088.9	595.5	168.5	53.9
σ_{it}	7.7	4.8	9.7	11.0	148.1	18.8	5.6	4.3
it_{max}	99863	19891	9912	3873	2388	612	182	60
Tempo por iteração (s)	0.01	0.02	0.04	0.14	0.27	3.00	28.51	286.82
Tempo total (min)	18.31	7.62	6.28	9.04	10.75	30.61	86.48	286.82

onde it é o número de iterações, \bar{it} é o número médio de iterações e σ_{it} é o desvio padrão do número de iterações.

Essa calibração mostra que a maneira mais eficiente de determinar as porcentagens de partículas y_i em cada banda, em termos de economia de tempo, tende a ser a utilização de mais iterações com menor número de partículas. Um tamanho razoável de amostra, como indicado pelos testes realizados, é de 10^2 partículas por iteração, o que implica na realização de cerca de 9900 iterações.

3.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para melhor descrever o fluxo de óleo no interior da tubulação, seria necessário considerar os efeitos da mudança de temperatura, já que um fluido aquecido passando por dentro de um tubo a menor temperatura tende a perder calor. Essa modelagem, entretanto, é bastante complexa, e erros em sua construção acabariam se propagando por todo o modelo. Uma abordagem para contabilizar os efeitos da temperatura é descrita na sequência.

O fluxo de calor entre o óleo e a parede da tubulação é indicado na Equação 20:

$$\dot{q}2\pi Rdx = h2\pi R(T_{wall} - T)dx \quad (20)$$

onde \dot{q} é o fluxo de calor, h é o coeficiente de transferência de calor, e T é a temperatura.

O calor transmitido pelo fluido, isto é, a variação de entalpia, pode ser descrita pela Equação 21:

$$\dot{m}c_pdT = \rho_{oil}\bar{u}_x c_p \pi R^2 dT \quad (21)$$

onde \dot{m} é a taxa de fluxo de massa e c_p é a capacidade calorífica específica. Assumindo que o fluxo total de calor entre o fluido e o ambiente externo é igual a variação total de entalpia do fluido, as Equações 20 e 21 podem ser igualadas.

Para contabilizar a variação de temperatura total ao longo de toda a extensão da tubulação, a igualdade é então integrada, como mostrado pela Equação 22:

$$\int_T^{T_{outlet}} \frac{dT}{(T_{wall} - T)} = \int_x^L \frac{2h}{\rho_{oil}\bar{u}_x c_p R} dx \quad (22)$$

onde L é o comprimento da tubulação.

A partir da integração, a seguinte expressão para a temperatura ao longo do eixo x é obtida, indicada pelas Equações 23 e 24:

$$T(x) = (T_{outlet} - T_{wall})e^{\beta(L-x)} + T_{wall} \quad (23)$$

$$\beta = \frac{2h}{\rho_{oil}\bar{u}_x c_p R} \quad (24)$$

O método utilizado para determinar o coeficiente de transferência de calor h é o método da resistência térmica equivalente (INCROPERA, 2007). O inverso do coefi-

ciente é a soma dos termos condutivo e convectivo da transferência de calor, como descrito pela Equação 25:

$$\frac{1}{h} = \frac{R + \varepsilon}{Rh_{oil}} + \frac{R + \varepsilon}{k_{wall}} \ln \left(\frac{R + \varepsilon}{R} \right) + \frac{1}{h_{ext}} \quad (25)$$

onde k é a condutividade térmica e ε é a espessura da tubulação.

Para determinar o coeficiente de transferência de calor h , é preciso assim calcular primeiramente o coeficiente de transferência de calor do óleo em si. Isso é possível utilizando o número de Nusselt, um fator adimensional que expressa a razão entre troca de calor convectiva e troca de calor condutiva para um determinado processo. O cálculo é dado pela Equação 26:

$$h_{oil} = \frac{Nu k_{oil}}{2R} \quad (26)$$

onde Nu é o número de Nusselt, que pode ser determinado fazendo-se uso de uma série de expressões empíricas. Para o propósito do presente trabalho, foi escolhida a correlação de Gnielinski (INCROPERA, 2007) dada sua ampla aplicabilidade e recorrente presença na literatura. A correlação de Gnielinski é dada pela Equação 27:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (27)$$

onde f é o fator de fricção de Darcy e Pr é o número de Prandtl. A correlação é válida para fluxos internos em tubos quando $0.5 \leq Pr \leq 2000$ e $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$.

O número de Prandtl pode ser diretamente calculado na saída da tubulação, e extrapolado como homogêneo ao longo de toda a extensão do fluxo, pela Equação 28:

$$Pr = \frac{c_p \mu_{outlet}}{k} \quad (28)$$

enquanto o fator de fricção de Darcy para determinado fluxo pode ser obtido do diagrama de Moody ou pela correlação de Colebrook (INCROPERA, 2007) mostrada na Equação 29:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{7.4R} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (29)$$

onde ϵ é a rugosidade relativa da tubulação.

Também é necessário estabelecer um valor para h_{ext} . No caso em que o meio externo seja a água oceânica, em uma situação de tubulação submarina, pode-se aplicar a Equação 30 para obter esse valor (INCROPERA, 2007):

$$h_{ext} = \frac{k_{ext} C Re^m Pr^{(1/3)}}{2R} \quad (30)$$

Os valores das constantes C e m são obtidos empiricamente e escritos na literatura de acordo com o número de Reynolds característico do fluxo, como indicado pela Tabela 3.

Tabela 3: Constantes da Equação 30 para para cilindro circular em fluxo cruzado

Número de Reynolds	C	m
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40000	0.193	0.618
40000-400000	0.027	0.805

Fonte: (INCROPERA, 2007)

O fluxo de calor entre o óleo e o ambiente externo faz com que a temperatura seja diferente para diferentes posições dentro da tubulação. Essa variação provoca mudanças nas propriedades do óleo que sejam dependentes da temperatura, tais quais densidade e viscosidade. Para contabilizar essas variações, modelos simplificados podem ser usados para descrever essas propriedades.

Quanto à densidade do óleo, a equação de Rackett para obter a densidade de uma substância em determinada temperatura é amplamente utilizada. Essa relação é mostrada na Equação 31:

$$\frac{1}{\rho_{oil}(T)} = \left(\frac{M \bar{R} T_c}{P_c} \right) Z_c^{1+(1-T/T_c)^{2/7}} \quad (31)$$

onde M é a massa molar do óleo, \bar{R} é a constante universal dos gases, T_c é a temperatura crítica, P_c a pressão crítica e Z_c o fator de compressibilidade da mistura.

Para obter a viscosidade como função da temperatura, a equação de Arhenius é aplicada. Isso significa fazer uso da Equação 32:

$$\mu(T) = \mu_{outlet} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (32)$$

onde E_a é a energia de ativação da mistura.

Aplicando as Equações 31 e 32, as propriedades do óleo dependentes da temperatura podem ser obtidas para cada posição ao longo do comprimento da tubulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

Conforme descrito na seção 3.7, as trocas de calor entre o fluido e a tubulação durante o escoamento promoveriam variação de temperatura, o que culminaria em alterações de algumas das propriedades do óleo, tais como viscosidade e densidade.

Para melhor entender a magnitude dessas variações de temperatura, uma análise de sensibilidade foi conduzida considerando um conjunto de parâmetros do fluxo como entrada para o modelo, o que possibilitou realizar o cálculo numérico do perfil de temperatura ao longo do escoamento em uma situação de tubulação submarina. Tais parâmetros estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de fluxo para estabelecer o perfil de temperatura

Parâmetro	Valor	Unidade
L	5000	m
R	0.1	m
\dot{V}	0.4416	m^3/s
ρ_{oil}	875.3	kg/m^3
c_p	2000	$J/kg.K$
k_{oil}	0.125	$W/m.K$
μ_{outlet}	0.002	$Pa.s$
T_{outlet}	350	K
T_{wall}	280	K

onde a densidade corresponde a um óleo de 30 graus API, a vazão de produção equivale a 10000 barris por dia, T_{outlet} é a temperatura de saída medida no fim da tubulação e T_{wall} a temperatura da parede do tubo, considerada em equilíbrio com a temperatura da água no leito oceânico. As propriedades do óleo ρ_{oil} , c_p , k_{oil} e μ_{outlet} foram escolhidas com base em dados comuns da literatura (INCROPERA, 2007).

Para estabelecer o perfil de temperatura, é preciso também das propriedades físicas dos materiais envolvidos na troca de calor. Essa não é tarefa fácil, dado por exemplo que há ampla gama de materiais que podem ser empregados em tubulações,

diferentes situações de correnteza e maré oceânica, dentre outras variações de cenário.

Considerando que as propriedades de materiais mais relevantes na modelagem da troca de calor são, segundo as Equações 24, 25 e 26, k_{wall} , k_{ext} e ε , uma análise de sensibilidade das variações de temperatura em situação descrita pela Tabela 4 foi realizada acerca do impacto de variações nas referidas especificações físicas. Para a temperatura da água no leito marinho, por exemplo, algumas das condutividades térmicas verificáveis estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Condutividade térmica de água oceânica com salinidade 0,0035 kg/kg para diferentes temperaturas

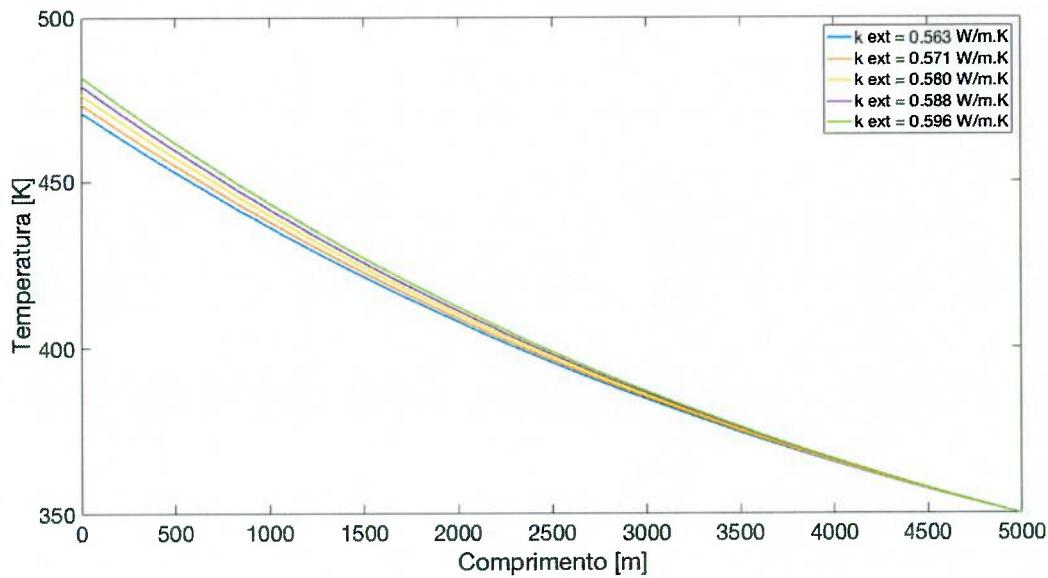
Temperatura da água K	$k_{ext} [W/m.K]$
273	0.563
278	0.571
283	0.580
288	0.588
293	0.596

Fonte: (COX et al., 1970)

O cálculo de h_{ext} é então possível pela Equação 30. Deve-se estabelecer um valor de Re , o que depende da velocidade da correnteza v , parâmetro que apresenta altas variações em função das características do relevo do leito, sua profundidade, época do ano, temperatura da água, dentre outros fatores (VAN DEN ABEELE; VANDE VOORDE, 2011). Para efeito de comparação, um valor comum de $v = 1 m/s$ será adotado, o que resulta em um valor de Re em torno de 260. Portanto, de acordo com a Tabela 3, os valores adequados de C e m seriam respectivamente 0.683 e 0.466.

Dessa forma, fixando a condutividade térmica da tubulação em $k_{wall} = 41.0 W/m.K$, a espessura do material em $\varepsilon = 8.2 mm$, os diferentes perfis de temperatura obtidos para as diferentes condutividades térmicas da água são mostrados na Figura 4.

Figura 4: Análise de sensibilidade do perfil de temperatura à condutividade térmica da água a diferentes temperaturas



Quanto à condutividade térmica da água, o modelo de troca de calor apresenta variação nas temperaturas registradas, que chegam a diferir cerca de 15 K na entrada da tubulação. Analogamente, é possível realizar a análise de sensibilidade em função da espessura do tubo. Alguns valores comuns de espessura encontrados em catálogo para um diâmetro próximo ao escolhido inicialmente estão listados na Tabela 6.

Tabela 6: Espessuras possíveis para a tubulação escolhida

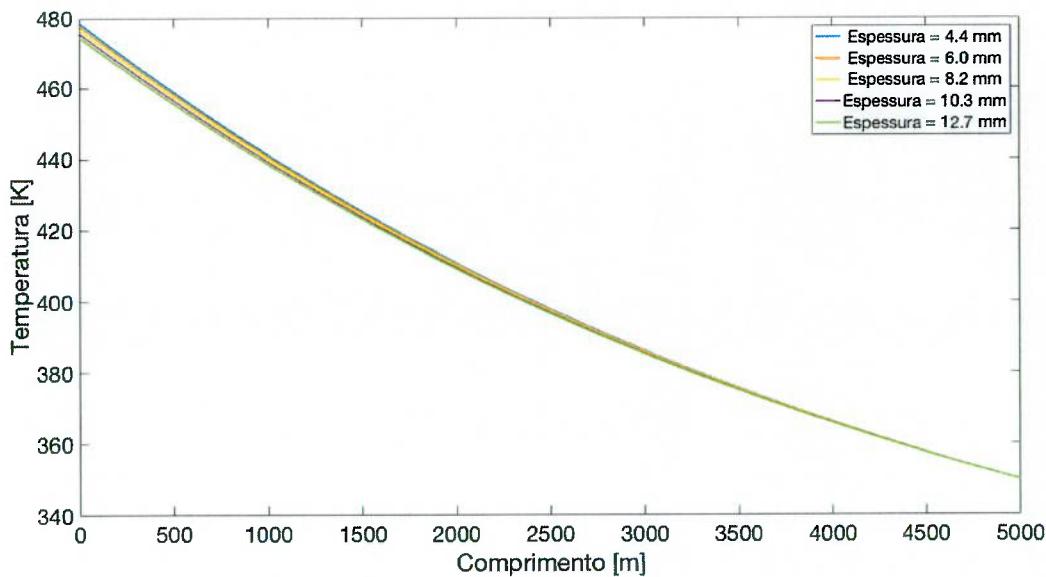
Diâmetro externo m	Espessura da tubulação mm
0.219	4.4
0.219	6.0
0.219	8.2
0.219	10.3
0.219	12.7

Fonte: Catálogo de tubulações Tenaris, 2004, disponível em http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/CF_Tubos_Cond.pdf, acesso em junho de 2018

Fixando valores de $k_{ext} = 0.580 \text{ W/m.K}$ e $k_{wall} = 41.0 \text{ W/m.K}$, é possível obter um

conjunto de perfis de temperatura que dependem da espessura da tubulação, como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Análise de sensibilidade do perfil de temperatura à espessura da tubulação



Os resultados indicam variação baixa, de cerca de 5 K entre as temperaturas de entrada calculadas, considerando a maior e menor espessura. Por fim, a mesma análise de sensibilidade pode ser executada considerando as possíveis condutividades dos materiais empregáveis na tubulação. Tais condutividades estão listadas na Tabela 7.

Tabela 7: Condutividade térmica de alguns materiais de tubulação

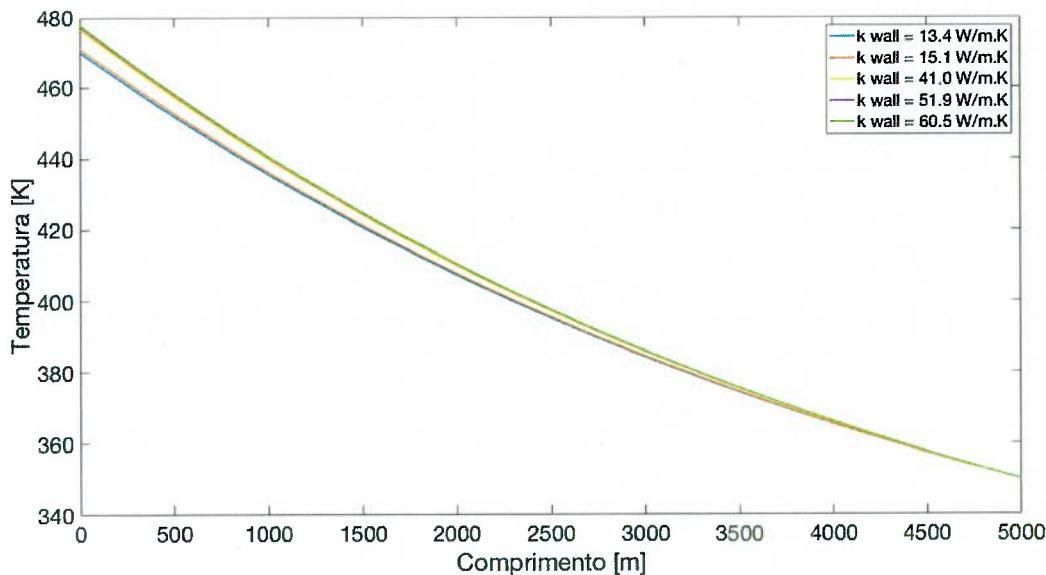
Material	Condutividade térmica k_{wall} [W/m.K]
Aço inoxidável AISI 316	13.4
Aço inoxidável AISI 302	15.1
Aço carbono-manganês-silício	41.0
Aço carbono-silício	51.9
Aço carbono não-ligado	60.5

Fonte: (INCROPERA, 2007)

Quanto ao material da tubulação, analisando apenas possíveis composições de tubulação de aço descritas na Tabela 7, e fixando $k_{ext} = 0.580$ W/m.K e $\varepsilon = 8.2$ mm,

diferentes perfis de temperatura são obtidos para os diferentes materiais do tubo, como indicado na Figura 6.

Figura 6: Análise de sensibilidade do perfil de temperatura ao material da tubulação



Observa-se portanto uma variação na temperatura de entrada calculada de cerca de 10 K.

Tendo em vista esse conjunto de análises, capaz de promover uma variação de até 20 K nas temperaturas de entradas calculadas, é possível afirmar que o modelo de troca de calor, embora robusto, é muito suscetível a alterações nos parâmetros dos cálculos. Vale ressaltar que propriedades como a viscosidade e densidade da água oceânica, sua salinidade, velocidade da correnteza, dentre outras, não foram objetos de avaliação, mantidas assim constantes dentre as três comparações realizadas.

A espessura da tubulação, analogamente, pode chegar a até 31 milímetros em casos de diâmetros maiores de tubo, e os materiais usados na confecção de tubulações de escoamento de petróleo não só não se limitam aos cinco supracitados, mas englobam diversas outras matérias-primas e até por vezes combinações das mesmas, de forma que é muito difícil assumir as propriedades corretas dos materiais sem medi-las com precisão.

Adiciona-se a isso o fato do impacto do perfil de temperatura nas propriedades do óleo também ser complexo; envolve determinar a energia de ativação da mistura, seu fator de compressibilidade, massa molar precisa, pressão e temperaturas críticas.

Tudo isso foge ao escopo do presente trabalho, que se propõe não a modelar perfeitamente uma situação específica, mas em estudar o panorama geral da deposição de asfaltenos em tubulação horizontal de petróleo de acordo com as características básicas do fluxo.

Portanto, para não comprometer a modelagem da deposição cinemática do problema, o estudo de caso descrito na seção 4.2 desconsiderará os efeitos das trocas de calor, e assim também das variações de temperatura na mistura na determinação de um perfil de deposição de asfalteno, entendendo que haverá limitações dada tamanha simplificação, mas ao mesmo tempo prezando pela generalização do método e sua aplicação como conceito.

4.2 ESTUDO DE CASO

Para ilustrar o modelo de deposição desenvolvido, um estudo de caso hipotético foi então realizado desconsiderando-se os efeitos de troca de calor, e portanto de variação de temperatura do fluido ao longo do escoamento, como justificado na seção 4.1. Considerando-se a vazão de produção como uma medida na saída da tubulação, os parâmetros do caso hipotético são os descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Propriedades escolhidas para o estudo de caso

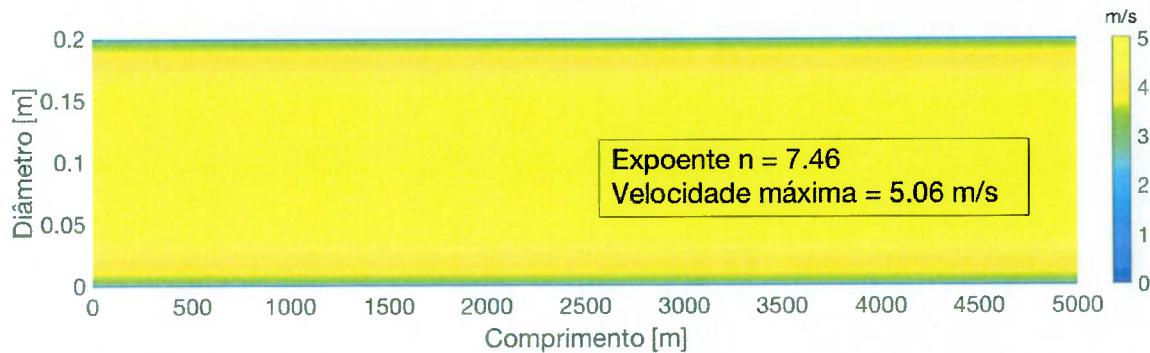
Parâmetro	Valor	Unidade
L	5000	m
R	0.1	m
\dot{V}	0.4416	m^3/s
μ	0.002	$Pa.s$
ρ_{oil}	875.3	kg/m^3
ρ_{asph}	1200	kg/m^3
r_{asph}	2×10^{-5}	m
w_{asph}	2 %	
dt	1	s

onde a densidade corresponde a um óleo de 30 graus API e a vazão volumétrica de produção equivale a 10000 barris por dia. A precisão utilizada para o cálculo do número

de partículas a atingir cada banda foi de $\xi = 10^{-4}$.

Primeiramente, o fluxo de óleo foi determinado utilizando-se a Equação 2, e o perfil de velocidades foi estabelecido. O resultado é mostrado para uma seção transversal ao longo do comprimento da tubulação na Figura 7.

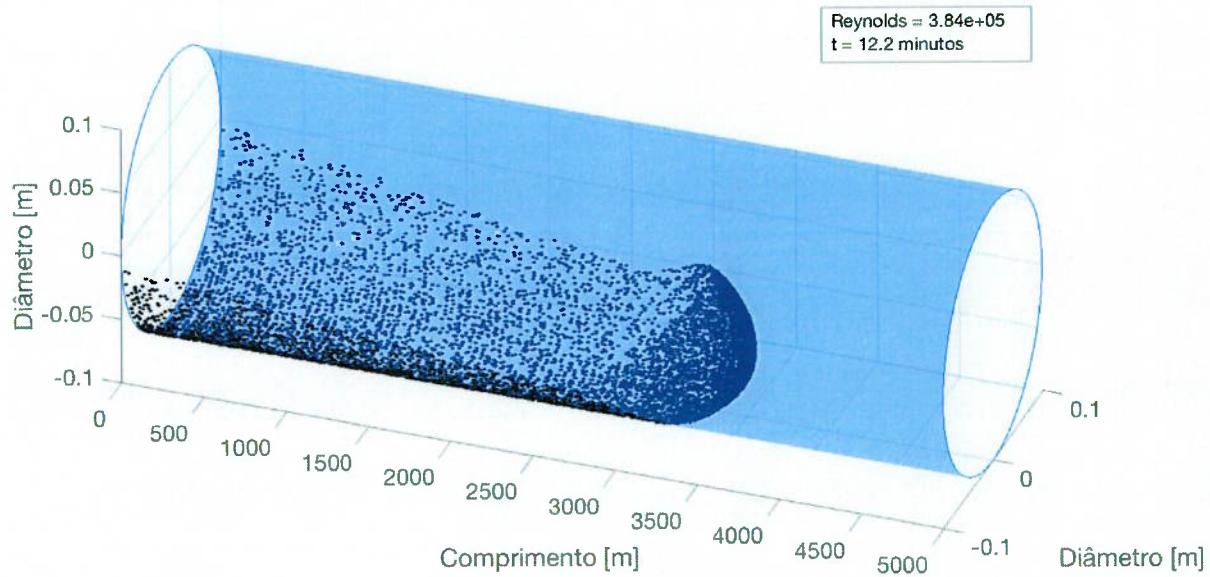
Figura 7: Perfil de velocidades do fluxo interno determinado pela equação da lei de potência com o valor calculado do expoente n



Na sequência, foram calculadas as trajetórias das partículas. Como discutido na seção 3.6, o tamanho de amostra mais próximo do ideal para realização da simulação é de 10^2 partículas, implicando em cerca de 9900 iterações para eficientemente obter o perfil de deposição do asfalteno. Esse foi, portanto, o tamanho de amostra utilizado na resolução do estudo de caso.

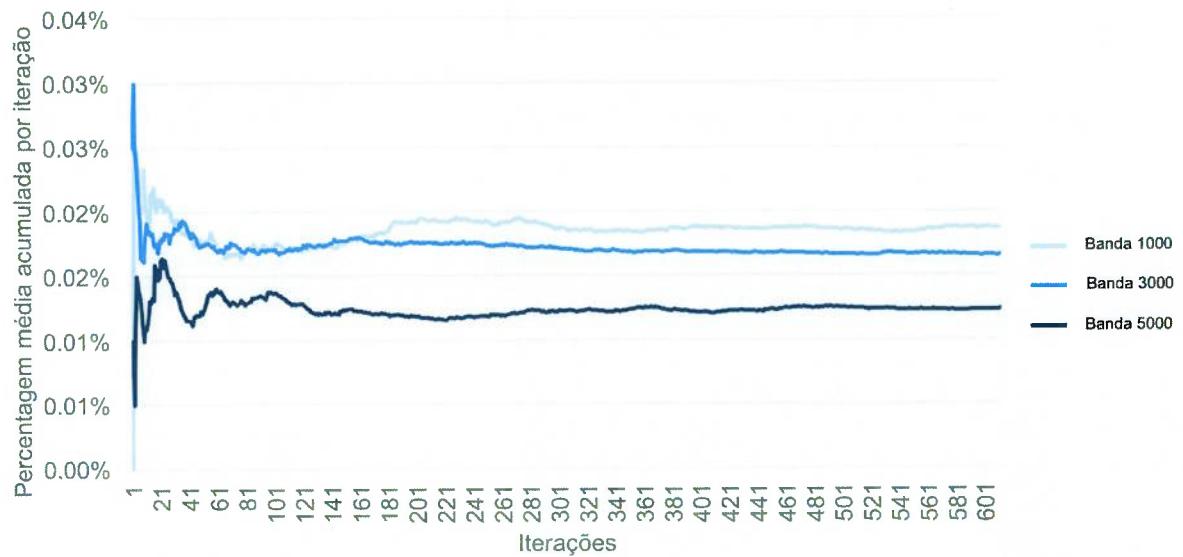
De qualquer forma, optou-se por ilustrar algumas etapas usando amostras de 10^4 partículas apenas para obter melhor representação gráfica. Assim, uma captura de tela do modelo de simulação 3D da trajetória de uma amostra de 10^4 partículas aleatoriamente distribuídas é mostrado na Figura 8. Ela ilustra os cálculos descritos pelas Equações 5 a 12, possibilitando visão concreta do problema discutido.

Figura 8: Ilustração do modelo tridimensional para trajetória e local de deposição utilizando amostra de 10^4 partículas de asfalteno



Antes de obter o desejado perfil de deposição do asfalteno, é preciso calcular a porcentagem de partículas y_i depositadas em cada uma das bandas. O processo descrito pela Equação 13 consiste em executar um número suficiente de iterações até que a precisão desejada de $\xi = 10^{-4}$ seja atingida, e está ilustrado na Figura 9 com o uso de 10^4 partículas.

Figura 9: Porcentagem média depositada para três bandas diferentes como função do número de iterações utilizando 10^4 partículas de asfalteno



Depois de estabelecer as porcentagens de partículas depositadas em cada banda, pode-se determinar o perfil de deposição em si, que mostra a camada de asfalteno acumulada durante um período de tempo. Para melhor ilustrar o comportamento da camada de deposição de asfalteno, uma série de espessuras distintas para diferentes instantes de tempo é mostrada nas Figuras 10 a 13.

Figura 10: Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 15 dias de deposição

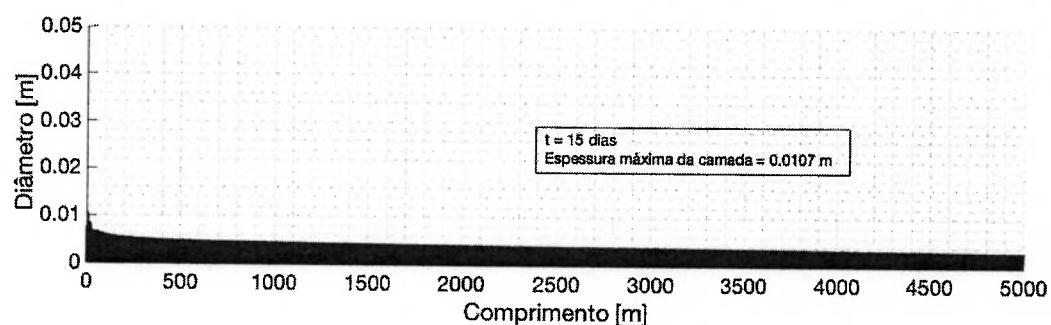


Figura 11: Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 30 dias de deposição

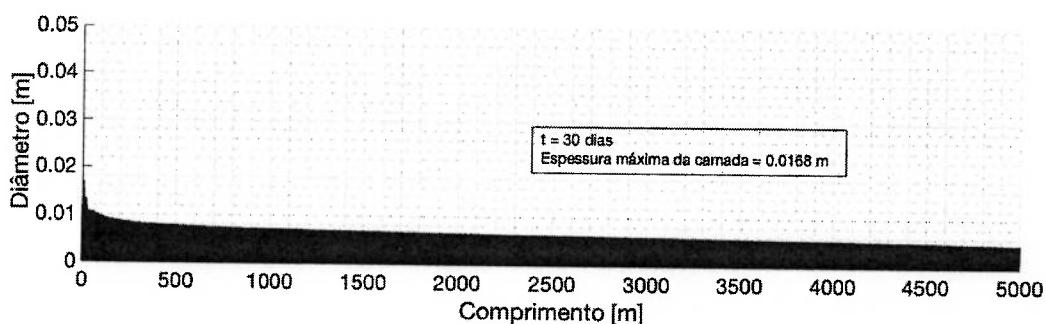


Figura 12: Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 45 dias de deposição

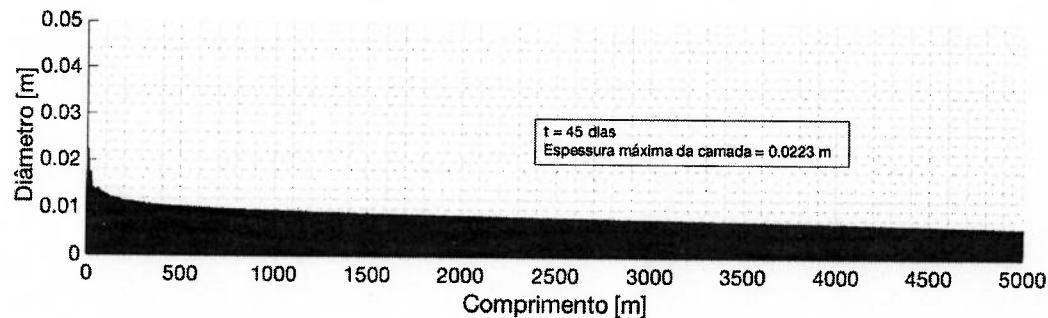
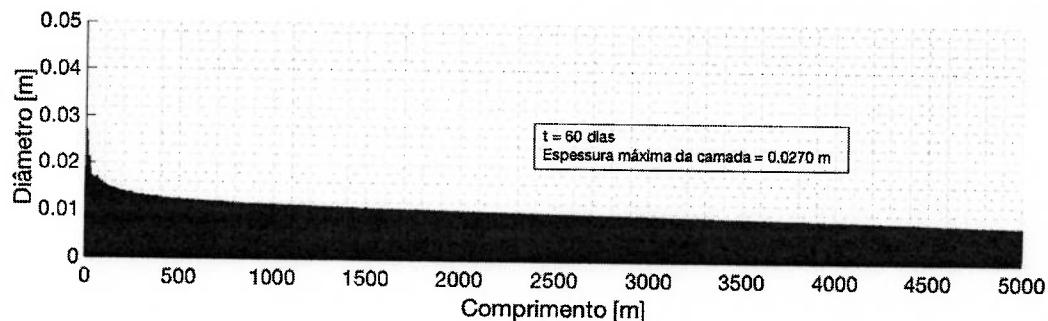


Figura 13: Espessura da camada de asfalteno no interior da tubulação após 60 dias de deposição



Analizando-se os resultados obtidos na simulação do estudo de caso hipotético, é importante ressaltar alguns pontos.

Primeiramente, no que consta do estabelecimento do perfil de velocidades dentro da tubulação, os resultados são condizentes com o comportamento conhecido dos fluidos em situação de escoamento interno em um cilindro, para o qual a velocidade axial junto à parede da tubulação é zero e a velocidade máxima ocorre no centro do fluxo, como descrito pela Equação 2.

Outro ponto de destaque é justamente referente ao propósito da simulação: a determinação de zonas de concentração de deposição. Nota-se que a espessura da camada de asfalteno é maior a cerca de 10 metros do início da tubulação, em comparação ao restante do comprimento. Essa localização ocorre pela combinação da geometria do tubo e da velocidade do fluxo.

Ressalta-se aqui que, pelo indicado nas análises de sensibilidade da seção 4.1, o comportamento geral esperado seria de maior temperatura justamente próximo à entrada da tubulação. Esse fator tenderia a diminuir a viscosidade e densidade do óleo nessa região, o que, de acordo com a Equação 9, aumentaria a velocidade na direção radial, tendendo assim a acelerar o movimento de deposição e possivelmente aumentar a concentração de sedimentos em zona ainda mais curta.

Ainda assim, o comprimento da seção na qual a espessura da camada de asfalteno depositada é a maior pode ser objeto de investigação mais extensa. Sendo uma combinação das condições de fluxo e parâmetros geométricos da tubulação, testar múltiplos cenários poderia levar a descobertas interessantes acerca de qual parâmetro da tubulação mais determina a seção majoritariamente afetada pela deposição de asfalteno.

5 CONCLUSÕES

Um método inovador para descrever e modelar a deposição de asfalteno dentro de tubulação horizontal foi desenvolvido. Esse método foi aplicado para um estudo de caso, e o resultado da simulação mostra uma concentração do processo de deposição próximo à zona de entrada do fluxo.

Uma aplicação interessante para o modelo é a possibilidade de determinar o raio mínimo de uma partícula de asfalteno que faria com que a mesma fosse pequena o suficiente para ser carregada pelo fluxo, saindo da tubulação e não depositando, dada uma geometria e propriedades da mistura. Essa informação seria de grande valor quando combinada ao uso de dispersantes de asfalteno, produtos químicos que previnem a agregação das partículas sólidas; sabendo o tamanho mínimo de partícula buscado para evitar deposição torna possível a seleção adequada do dispersante (KRAIWATTANAWONG et al., 2009).

O modelo ainda apresenta algumas limitações, tais quais a desconsideração de variações de temperatura ocorrendo no fluxo interno e também a não contabilização da variação do diâmetro efetivo da tubulação após o início da deposição, o que causaria variações na velocidade do fluxo e em qualquer outro parâmetro dependente. O modelo também não considera os desvios de trajetória das partículas devido à turbulência do fluxo, que conhecidamente ocorrem.

Desenvolvimentos futuros envolveriam implementar a troca de calor entre a tubulação e o ambiente externo, de forma a determinar viscosidade e densidade locais, propriedades essas que alterariam a velocidade de deposição das partículas e, portanto, poderiam influenciar no perfil de deposição.

Outra adição seria promover uma atualização contínua dos parâmetros de fluxo uma vez iniciada a deposição, incluindo as variações no raio efetivo da tubulação, que diminuiria conforme aumentasse a espessura da camada de asfalteno e assim alteraria o perfil de deposição.

6 REFERÊNCIAS

COX, Roland A.; MCCARTNEY, Michael J.; CULKIN, Frank. The specific gravity-salinity-temperature relationship in natural sea water. **Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**, vol. 17, n.º 4, 1970.

CREEK, Jefferson L. Freedom of action in the state of asphaltenes: Escape from conventional wisdom. **Energy and Fuels**, vol. 19, n.º 4, pp. 1212–1224, 2005.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. University of Michigan: John Wiley, 2007. (Fundamentals of Heat and Mass Transfer, v. 1).

JAEGER, Heinrich M.; NAGEL, Sidney R. Physics of the Granular State. **Science**, vol. 255, n.º 5051, pp. 1523–1531, 1992.

KOR, Peyman; KHARRAT, Riyaz. Prediction of the asphaltene deposition profile along a wellbore during natural production from a reservoir. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, Taylor & Francis, vol. 38, n.º 19, pp. 2837–2844, 2016.

KRAIWATTANAWONG, Kriangkrai; FOGLER, H. Scott; GHARFEH, Samir G.; SINGH, Probjot; THOMASON, William H.; CHAVADE, Sumaeth. Effect of Asphaltene Dispersants on Aggregate Size Distribution and Growth Effect of Asphaltene Dispersants on Aggregate Size Distribution and Growth. **Energy & Fuels**, vol. 22, n.º 12, pp. 1575–1582, 2009.

MITCHELL, David L.; SPEIGHT, James G. The Solubility of Aspahltenes in hydrocarbon solvents. **Energy & fuels**, vol. 52, n.º 2, pp. 149–152, 1972.

ROHSENOW, Warren M; HARTNETT, James P; GANIĆ, Ejup N. **Handbook of heat transfer applications**. University of Michigan: McGraw-Hill, 1985. vol. 73, pp. 9–10.

VAN DEN ABEELE, Filip; VANDE VOORDE, J. Stability of Offshore pipelines in Close Proximity to the Seabed. Em: **PROCEEDINGS of the 6th Pipeline Technology Conference**. Hannover, Germany: IENE, 2011.

VARGAS, Francisco M.; CREEK, Jefferson L.; CHAPMAN, Walter G. On the development of an asphaltene deposition simulator. **Energy and Fuels**, vol. 24, n.º 4, pp. 2294–2299, 2010.

VARGAS, Francisco M.; GONZALEZ, Doris L.; HIRASAKI, George J.; CHAPMAN, Walter G. Modeling asphaltene phase behavior in crude oil systems using the perturbed chain form of the statistical associating fluid theory (PC-SAFT) equation of state. **Energy and Fuels**, vol. 23, n.º 3, pp. 1140–1146, 2009.

7 APÊNDICE

7.1 NOMENCLATURA

A = seção transversal da tubulação, m^2

C = constante empírica de troca de calor

c_p = calor específico, $J/kg.K$

dt = intervalo de tempo, s

E_a = energia de ativação, J/mol

ξ = precisão do critério de parada

ε = espessura da tubulação, m

ϵ = rugosidade relativa da tubulação

F = força, N

f = fator de fricção de Darcy

g = aceleração gravitacional, m/s^2

H = espessura da camada de asfalteno, m

h = coeficiente de transferência de calor, $W/m^2.K$

it = número de iterações

\bar{it} = número médio de iterações

k = condutividade térmica, $W/m.K$

L = comprimento da tubulação, m

\dot{m} = taxa de fluxo de massa, kg/s

M = massa molar, kg/mol

m = constante empírica de troca de calor

μ = viscosidade dinâmica, $Pa.s$

n = expoente da lei de potência

N = número de partículas

\dot{N} = taxa de aporte de partículas, s^{-1}

Nu = número de Nusselt

η = fator de empacotamento aleatório

Pr = número de Prandtl

P_c = pressão crítica, Pa

\dot{q} = fluxo de calor, W/m^2

r = coordenada radial, m

r_{asph} = raio da partícula de asfalteno, m

R = raio interno da tubulação, m

\bar{R} = constante universal dos gases, $J/mol.K$

Re = número de Reynolds

ρ = densidade, kg/m^3

σ = desvio padrão

T = temperatura, K

T_c = temperatura crítica, K

t = tempo, s

θ = coordenada radial, rad

u_r = velocidade radial local, m/s

u_x = velocidade axial local, m/s

\bar{u}_x = velocidade axial média, m/s

U_x = velocidade axial máxima, m/s

\dot{V} = taxa volumétrica, m^3/s

w = fração mássica

x = coordenada axial, m

y_i = porcentagem de partículas da banda

Z_c = fator de compressibilidade

7.2 CÓDIGO MATLAB

A seguir, está o código escrito em MATLAB para determinação da posição das partículas dentro da tubulação ao longo do tempo, que tem como saída o modelo de simulação apresentado na Figura 8, já configurado com os parâmetros utilizados no estudo de caso descrito na seção 4.2.

Para acesso a funções adicionais e material complementar, entrar em contato com o autor.

```
clc  
clear variables  
close all
```

```
%% User inputs
```

```
L = 5000; %input('Enter pipe lenght [m]: ');  
d = 0.2; %input('Enter pipe inner diameter [m]: ');  
bpd = 10000; %input('Enter outlet flow rate [BPD]: ');  
mu0 = 0.002; %input('Enter outlet oil viscosity [cP]: ')/1000;  
API = 30; %input('Enter outlet oil API [API]: ');  
r_asph = 2*10^-5; %input('Enter asphaltene particle radius  
[micrometer]: ')/10^6;
```

```
%% Parameters declaration
```

```
% Iteration parameters  
dt = 10; % time step  
t = 0; % time counter  
extraplotting = 0; % binary switch for the extra plot  
plotting3d = 1; % binary switch for the 3D plot  
n_asph = 10^4;
```

```
% Flow parameters
```

```
rho0 = (141.5/(131.5+API))*0.998*1000; % kg/m^3  
rho_asph = 1200; % kg/m^3  
g = 9.8; % m/s^2  
u0 = bpd*1.38009805*10e-6/(pi*d^2/4); % m/s  
Re = rho0*u0*d/mu0; % adimensional  
r = d/2; % m
```

```
%% Velocity profile
```

```
u = zeros(100,1);
u_max = -u0;
y = linspace(0,d,100)';
% Interpolation from table
n = Re^2*-5*10^-13+Re*3*10^-6+6.3859;
if Re > 3*10^6
    n = 10;
end
```

```
% Make average velocity equal to BPD
while abs(mean(u(:,1))-u0)>0.00001
u_max=u_max+abs(mean(u(:,1))-u0);
    for i=1:100
        u(i,1) = u_max*(1-(abs(y(i,1)-r))/r)^(1/n);
    end
end
```

```
%% Plotting velocity profile
```

```
if extraplotting == 1
figure('Name', 'Perfil de velocidades', 'NumberTitle', 'off');
surf(linspace(0,L,100), linspace(0,d,100), repmat(u,1,100),...
    'EdgeColor', 'None', 'facecolor', 'interp');
view(2);
cbar = colorbar;
title(cbar, 'm/s', 'FontSize', 20)
%title(sprintf('Velocity profile along pipeline'),...
    'FontSize', 25);
annotation('textbox',[.5 .25 .3 .3], 'String', ...
```

```
sprintf(' Exponente n = %.2f \n
Velocidade máxima = %.2f m/s',n,u_max),...
'FitBoxToText','on','FontSize',30);
xlabel('Comprimento [m]','FontSize',25);
ylabel('Diâmetro [m]','FontSize',25);
set(gca,'FontSize',25)
pbaspect([4 1 1])
set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
pause(20)
end

%% Stokes particle position

% Initial position of the asphaltene particles – polar coords
p_t = [zeros(n_asph,1) (r-2*r_asph)*sqrt(rand(n_asph,1)+
r_asph) (2*pi)*rand(n_asph,1)]; 

% Plotting
if plotting3d == 1
    figure('Name','Asphaltene 3D particle position',
    'NumberTitle','off');
    set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
    textbox = line(1,1);
    [x,y,z] = cylinder(r,80);
    z(2, :) = L;
    grid on
    surf(z,y,x, 'FaceColor','b','FaceAlpha',0.2,
    'LineWidth',thk,'EdgeColor','b','HandleVisibility','off',
    'MeshStyle','row');
    view(20,30)
end
```

```
while (sum(p_t(:,1)>(L+dt*u_max))+sum(p_t(:,2)
>=(r-r_asph))) < length(p_t)

% Plotting
if plotting3d == 1
cla
hold on

scatter3(p_t(:,1),bsxfun(@times,p_t(:,2),cos(p_t(:,3))),...
bsxfun(@times,p_t(:,2),sin(p_t(:,3))),r_asph*10^6,
'Filled','k');
pbaspect([3 1 1])
axis([0 L -r r -r r]);
%title ('Asphaltene particle position along pipeline',
'FontSize',25);
xlabel('Comprimento [m]', 'FontSize',25);
ylabel('Diâmetro [m]', 'FontSize',25);
zlabel('Diâmetro [m]', 'FontSize',25);
set(gca,'FontSize',25)

hold off
textbox.delete
textbox = annotation('textbox',[.7 .6 .3 .3], 'String',...
sprintf(' Reynolds = %.2d \n t = %.1f minutos ',...
Re,t*dt/60), 'FitBoxToText', 'on', 'FontSize',20);
rotate3d on
drawnow
end

% Calculation
for i = 1:size(p_t,1)
if p_t(i,1) <= L+u_max*dt && p_t(i,2)< r-r_asph
```

```
% x coordinate
p_t(i,1) = p_t(i,1)+power_law(p_t(i,2),u_max,r,n)*dt;

% theta coordinate
theta = p_t(i,3);
if p_t(i,3) < 3*pi/2 && p_t(i,3) > pi/2
    p_t(i,3) = atan(-v_stokes*dt/
        (p_t(i,2)*cos(p_t(i,3)))+tan(p_t(i,3)))+pi;
else
    p_t(i,3) = atan(-v_stokes*dt/
        (p_t(i,2)*cos(p_t(i,3)))+tan(p_t(i,3)));
end

% r coordinate
p_t(i,2) = abs(p_t(i,2)*(cos(theta)/cos(p_t(i,3)))); 
if p_t(i,2) > r
    p_t(i,2) = r-r_asph;
end

end
end
t=t+1;
```



Modelo para determinação da espessura da camada de asfalteno depositada em tubulação horizontal

Matheus Rodrigues Spedaletti

Orientador: Prof. Rafael dos Santos Gioria

Artigo Sumário referente à disciplina PMI1096 – Trabalho de Formatura para Engenharia de Petróleo II
Este artigo foi preparada como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP.

Resumo

O processo de deposição do asfalteno é de grande interesse para a indústria do petróleo. O mesmo frequentemente causa entupimento da tubulação, o que leva a limitações de fluxo e aumento dos custos de manutenção associados. Prever zonas de deposição é um passo fundamental para prevenir a ocorrência de entupimento e mitigar os problemas associados à acumulação de asfalteno. No presente trabalho, uma nova abordagem para modelar a deposição de asfalteno dentro de uma tubulação horizontal é apresentada. O modelo faz uso de um balanço de forças e de um perfil de velocidades do fluxo para descrever as trajetórias de partículas de asfalteno já precipitadas, para prever a taxa e perfil de deposição. Um método para determinar a espessura do depósito de asfalteno em função do tempo para fluxo em uma tubulação horizontal foi desenvolvido, e as simulações mostram uma concentração da deposição na região dos 10 metros mais próximos à entrada da tubulação.

Abstract

The asphaltene deposition process is of great interest to the oil industry. It often causes pipe clogging, which leads to flow restrictions and associated high maintenance costs. Predicting deposition zones is a fundamental step in order to prevent the occurrence of clogging and mitigate the problems associated with asphaltene accumulation. In the present work, a novel approach for modeling asphaltene deposition inside a horizontal pipeline is presented. The model makes use of a force balance and a flow velocity profile to describe the trajectories of already precipitated asphaltene particles, predict the rate of deposition and the deposit profile. A method to determine asphaltene deposit thickness as a function of time for flow inside a horizontal pipe was developed, and simulations results show a concentration of deposition in a 10 meters long region near the inlet.

1. Introdução

Asfaltenos são definidos como a fração mais pesada e mais polarizável do óleo cru (VARGAS et al., 2009). São amplamente classificados como a fração do petróleo que é insolúvel em alcanos leves, mas solúveis em tolueno ou benzeno em condições ambientais (MITCHELL; SPEIGHT, 1972).

Precipitação e deposição de asfalteno são ambos problemas relevantes e recorrentes para a indústria do petróleo. Esses fenômenos causam um grande aumento nos custos operacionais, devido à requerida manutenção dos equipamentos de superfície e de fundo de poço (CREEK, 2005). Além disso, podem levar a uma diminuição da receita, por causa de uma redução do fluxo nas tubulações causado pelo processo de entupimento, e pelo tempo de parada para manutenção associado.

A precipitação de asfalteno também pode causar aumento da viscosidade do óleo, impactando negativamente a produtividade do poço. Em situações extremas, a deposição pode atingir uma escala em que toda a tubulação é obstruída, completamente bloqueando a produção até que a necessária limpeza e manutenção seja realizada (VARGAS; CREEK; CHAPMAN, 2010).

Entender a ocorrência de deposição é uma etapa fundamental na previsão das zonas de deposição por meio de um modelo de fluxo, de forma a antecipar as possíveis complicações, portanto reduzindo custos operacionais e aumentando a produtividade (KOR; KHARRAT, 2016).

Alguns modelos foram desenvolvidos recentemente para elucidar a deposição de asfalteno e prever o processo de deposição. Entretanto, nenhum abordou o problema específico da deposição de asfalteno dentro de tubulações horizontais. O objetivo do presente trabalho é determinar o perfil de deposição de asfalteno dentro de uma tubulação horizontal, de acordo com as características do fluxo, tais como a geometria taxa de escoamento, prevendo as regiões de maior acumulação para mitigar o entupimento.

2. Revisão bibliográfica

Ramirez-Jaramillo et. al. (2006) propuseram um modelo multifásico multicomponente, diferenciando água, óleo, gás e asfalteno, para representar o processo de deposição de asfalteno em poços de produção. Os principais resultados obtidos pelo modelo estabelecido foram que o problema de deposição de sólidos está ligado aos estágios iniciais da produção, e que a taxa de crescimento do depósito continua constante independente da taxa de vazão no poço, variando apenas a profundidade da região em que se concentrará o depósito.

Vargas et. al. (2010) fizeram uma ferramenta de simulação que considera simultaneamente os processos de precipitação, agregação e deposição do asfalteno, combinando a equação de estado do tipo Perturbed Chain Form of the Statistical Associating Fluid Theory (PC-SAFT) com modelos cinéticos e equações de transporte. As contribuições mais relevantes do modelo foram a elucidação de aparentes paradoxos, como o fato de alguns inibidores de precipitação de asfalteno apenas piorarem esse processo, enquanto alguns precipitantes (como o propano) produzirem menor quantidade mássica de deposição.

Mirzayi et. al. (2013) propuseram um estudo para tubulação horizontal de petróleo, considerando como mecanismos de deposição de asfalteno a difusão e arraste browniano, força gravitacional, Efeito Soret de termoforese, empuxo dos agregados e remoção das partículas depositadas por cisalhamento. Os resultados, obtidos através da variação dos parâmetros de tamanho de partícula, gradiente de temperatura e velocidade do fluido, mostraram que a termoforese e o efeito gravitacional tiveram papel mais significante na deposição dos agregados.

Kor e Kharrat (2016) propuseram um modelo de simulação para um poço vertical e corroboraram as descobertas de que os estágios iniciais de produção são os que mais apresentam problemas de deposição de asfalteno (RAMIREZ-JARAMILLO; LIRA-GALEANA; MANERO, 2006). O modelo de simulação foi dividido em blocos de cálculo, cada um responsável por avaliar um aspecto do problema: fluxo multifásico, troca de calor, modelo de precipitação e modelo de deposição. O modelo de simulação foi capaz de prever com alta acurácia a espessura acumulada de asfalteno, e o tempo até o entupimento do poço, quando calibrado e aplicado a dados da literatura.

3. Materiais e métodos

Para descrever o perfil de deposição ao longo de uma tubulação horizontal, é necessário primeiro determinar de um perfil de velocidades do fluxo, baseado em propriedades tais quais taxa volumétrica, densidade e viscosidade. Em seguida, são determinadas as trajetórias das partículas ao longo da tubulação até que as mesmas atinjam a parede e depositem-se. O perfil de deposição é numericamente determinado, a taxa de aporte de partículas de asfalteno na entrada da tubulação é estabelecida, e então é apresentado um método para calcular a espessura da camada como função do tempo.

Todas as etapas previamente descritas foram realizadas por meio de uma simulação que permite entradas de parâmetros geométricos e propriedades do óleo pelo usuário, implementada em MATLAB.

3.1. Perfil de velocidades

A velocidade média do fluxo de petróleo no interior da tubulação é determinada com base na taxa volumétrica de fluxo na saída do tubo, como descrito pela equação 1

$$\bar{u}_x = \frac{V}{A} \quad (1)$$

A velocidade local como função do raio da tubulação é determinada considerando que o fluxo obedece um perfil de velocidades parabólico proporcional à certa potência, como mostra a equação 2

$$u_x = U_x \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad (2)$$

O valor de U_x é inicialmente estimado e depois iterado utilizando cem valores igualmente espaçados de r até que a velocidade média calculada entre os cem pontos difira de \bar{u}_x não mais do que 10^{-4} .

O expoente n depende do número de Reynolds, descrito pela equação 3

$$Re = \frac{\rho_{oil} \bar{u}_x^2 R}{\mu} \quad (3)$$

O valor do expoente n foi estudado para uma série de condições de fluxo. Uma correlação simples por meio de polinômio de segundo grau foi desenvolvida utilizando o método dos mínimos quadrados e os dados da literatura (ROHSENOW; HARTNETT; GANIĆ, 1985), impondo também a restrição empírica do valor de n não ser maior que dez. O expoente n é então calculado por meio equação 4

$$n = (-5 \times 10^{-13}) Re^2 + (3 \times 10^{-6}) Re + 6.3859 \quad (4)$$

O perfil de velocidades calculado é assumido constante para a totalidade do comprimento da tubulação, ignorando-se possíveis variações locais das propriedades do óleo.

3.2. Trajetória das partículas de asfalteno

É necessário então rastrear o posicionamento de uma partícula desde sua entrada na seção da tubulação até que a mesma atinja a parede interna do tubo e deposite, ou viaje a totalidade do comprimento da tubulação. Considerando um sistema de coordenadas cilíndricas, a posição da partícula é $P_{(r, \theta, x)}$ em $t=0$. Essa posição inicial é gerada aleatoriamente.

A movimentação radial da partícula consiste de um pequeno objeto depositando-se em um meio fluido, um fenômeno físico descrito pela Lei de Stokes, mostrada na equação 5 já com os termos do equilíbrio de forças expressos em parâmetros físicos do escoamento

$$\frac{4}{3} \pi r_{asph}^3 \rho_{asph} g = 6 \pi \mu r_{asph} u_r + \frac{4}{3} \pi r_{asph}^3 \rho_{oil} g \quad (5)$$

Simplificando, a expressão para a velocidade da partícula na direção radial é obtida pela equação 6

$$u_r = \frac{2r_{asph}^2 g}{9\mu} (\rho_{asph} - \rho_{oil}) \quad (6)$$

A coordenada axial x da partícula depende da velocidade do fluxo, já que as partículas de asfalteno estão sendo carregadas pelo óleo. Assim, a velocidade axial de uma partícula em uma dada posição é calculada pela equação 2. A partir da posição inicial da partícula de asfalteno, sua trajetória é determinável atualizando as coordenadas radial e axial em um intervalo de tempo dt . As novas coordenadas $P_{(r', \theta', x')}$ em um instante $t' = t + dt$ são calculadas, em ordem, pelas equações 7, 8 e 9

$$x' = x + u_r dt \quad (7)$$

$$\theta' = \text{atan} \left(\frac{u_r dt}{r \cos \theta} \right) + \tan \theta \quad (8)$$

$$r' = \frac{r \cos \theta}{\cos \theta'} \quad (9)$$

O cálculo das novas coordenadas é repetido até que a partícula toque o interior da parede da tubulação em $r = R$ ou até que a partícula viaje a totalidade do comprimento da seção e atinja $x > L$.

3.3. Perfil de deposição

Dado o caráter aleatório da geração da posição inicial das partículas, é preciso verificar a consistência de resultados utilizando uma série de simulações e analisando variações. O comprimento da tubulação é dividido em bandas de igual tamanho, de forma a ser possível estabelecer quantas partículas de asfalteno depositam-se em cada intervalo, contando-se o número de partículas que atingem cada banda para compará-lo entre diversas simulações.

O procedimento de contagem é repetido it vezes para um mesmo tamanho escolhido da amostra, até que a diferença entre o número médio de partículas que depositaram em cada banda considerando $it-1$ e it repetições esteja dentro da precisão desejada. O critério de parada é descrito pela equação 10

$$\frac{\sum_{it}^{it} y_i - \sum_{it-1}^{it-1} y_i}{it} \leq \xi \forall i \quad (10)$$

Esse procedimento resultará em um perfil de contagem de partículas, que representa a porcentagem das partículas de asfalto aportadas na tubulação a atingir cada banda i .

3.4. Aporte de asfalto

Assumindo que as partículas sólidas de asfalto já estão presentes na mistura na entrada do fluxo, a quantidade de partículas presentes é função da fração mássica de asfalto no óleo, combinada com a hipótese de que todas as partículas na entrada do fluxo possuem o mesmo raio, o que pode ser expresso de acordo com a equação 11

$$N_{asph} = \frac{3w_{asph}\rho_{oil}}{4\pi r_{asph}^3 \rho_{asph}} \quad (11)$$

Para obter a quantidade de partículas de asfalto entrando na seção da tubulação como uma função do tempo, a taxa de aporte de partículas de asfalto é calculada por meio da equação 12

$$\dot{N}_{asph} = N_{asph} V \quad (12)$$

Combinando as equações 11 e 12, tem-se uma estimativa do número de partículas entrando na seção da tubulação por segundo, como descrito pela equação 13.

$$\dot{N}_{asph} = \frac{3w_{asph}\rho_{oil}\bar{u}_x A}{4r_{asph}^3 \rho_{asph}} \quad (13)$$

3.5. Espessura da camada de asfalto

Não muito é conhecido acerca da maneira exata pela qual as partículas de asfalto se depositam (CREEK, 2005), (VARGAS; CREEK; CHAPMAN, 2010), o que implica a necessidade de suposições.

As partículas de asfalto, por seu tamanho, são assumidas como tendo um comportamento análogo ao de um fluido, o que significa que seu movimento de acomodação pode ser comparado ao de um líquido; devem se comportar de forma a homogeneamente preencher o volume de uma seção.

Assim, a situação se torna análoga a determinar a altura de um fluido, do fundo de um cilindro horizontal, correspondente a certo volume. A expressão que descreve o volume de um cilindro horizontal como função de sua altura é dada pela equação 14

$$V(h) = L[R^2 \cos^{-1}(\frac{R-H}{R}) - (R-h)\sqrt{2Rh - H^2}] \quad (14)$$

Esse volume será ocupado pelas partículas depositadas de asfalto. Assumindo a simplificação prévia de todas as partículas possuírem igual raio, descrita na seção 3.4, a taxa de aumento do volume ocupado por partículas de asfalto pode ser calculada como função do aporte de partículas, como indicado pela equação 15

$$\dot{V}_{asph} = \frac{4}{3\eta} \pi r_{asph}^3 \times \dot{N}_{asph} \quad (15)$$

com η entre 0.640 e 0.644 como determinado na literatura (JAEGER; NAGEL, 1992).

A altura da camada de asfalto não é a mesma ao longo de toda a extensão da tubulação, variando entre as bandas nas quais o tubo foi dividido durante a etapa de contagem de partículas de acordo com a porcentagem y_i da amostra a atingir a região. Uma expressão para a altura da camada de asfalto em uma banda i qualquer como uma função do tempo é então obtida combinando as equações 17, 18 e o perfil de deposição obtido da equação 13, como descrito pela equação 16

$$y_i V_{asph} t = L[R^2 \cos^{-1}(\frac{R-H_i}{R}) - (R-H_i)\sqrt{2Rh_i - H_i^2}] \quad (16)$$

4. Resultados e discussões

Para ilustrar o modelo de deposição desenvolvido, um estudo de caso hipotético foi então realizado, considerando-se a taxa de produção, viscosidade e densidade como medidas na saída da tubulação. Os parâmetros do caso hipotético são os descritos na tabela 1

Parâmetro	Valor	Unidade
L	5000	m
R	0.1	m
\dot{V}	0.4416	m^3/s
μ	0.002	$Pa.s$
ρ_{oil}	875.3	kg/m^3
ρ_{asph}	1200	kg/m^3
r_{asph}	2×10^{-5}	m
W_{asph}	2 %	
dt	1	s

Tabela 1 – Propriedades escolhidas para o estudo de caso

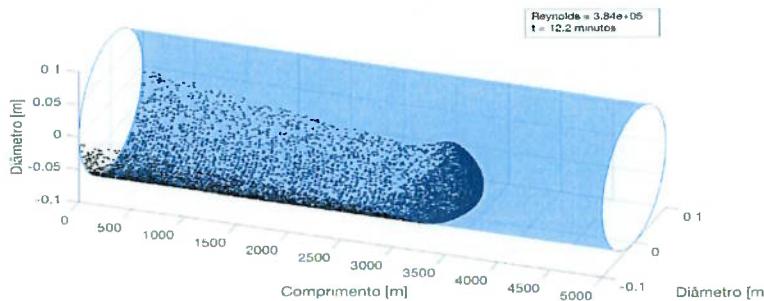
onde a densidade corresponde a 30 graus API e o volume de produção equivale a 10000 barris por dia.

Primeiramente, o fluxo de óleo foi determinado utilizando-se a equação 2, e o perfil de velocidades foi estabelecido. O resultado é mostrado para uma seção transversal da tubulação na figura 1



Figura 1 - Perfil de velocidades do fluxo interno determinado pela equação da lei de potência

Na sequência, foram calculadas as trajetórias das partículas. Uma captura de tela do modelo de simulação 3D da trajetória de uma amostra de 10^4 partículas aleatoriamente distribuídas é mostrado na figura 2, ilustrando os cálculos descritos pelas equações 5 a 9

Figura 2 - Ilustração do modelo tridimensional de trajetória e local de deposição utilizando amostra de 10^4 partículas

Antes de obter o desejado perfil de deposição do asfalto, é preciso calcular a porcentagem de partículas y_i depositadas em cada uma das bandas, processo descrito pela equação 10 na seção 3.3. Depois, pode-se determinar o perfil de deposição em si, que mostra a camada de asfalto acumulada durante um período de tempo. Para melhor ilustrar o comportamento da camada de deposição de asfalto, um perfil da espessura após 60 dias do início da deposição é mostrada na figura 3

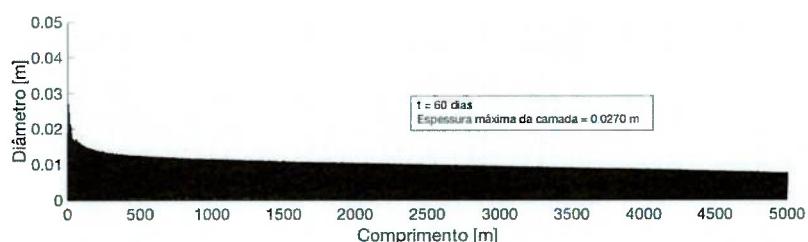


Figura 3 - Espessura da camada de asfalto no interior da tubulação após 60 dias de deposição

No que consta do estabelecimento do perfil de velocidades dentro da tubulação, os resultados são condizentes com o comportamento conhecido dos fluidos em situação de escoamento interno em um cilindro, para o qual a velocidade axial junto à parede da tubulação é zero e a velocidade máxima ocorre no centro do fluxo, como descrito pela equação 2.

Outro ponto de destaque é justamente referente ao propósito da simulação: a determinação de zonas de concentração de deposição. Nota-se que a espessura da camada de asfalteno é maior a cerca de 10 metros do início da tubulação, em comparação ao restante do comprimento.

Ainda assim, o comprimento da seção na qual a espessura da camada de asfalteno depositada é a maior pode ser objeto de investigação mais extensa. Sendo uma combinação das condições de fluxo e parâmetros geométricos da tubulação, testar múltiplos cenários esclareceria quais características da tubulação mais determinam a seção majoritariamente afetada pela deposição de asfalteno.

5. Conclusões

Um método inovador para descrever e modelar a deposição de asfalteno dentro de tubulação horizontal foi desenvolvido. Esse método foi aplicado para um estudo de caso, e o resultado da simulação mostra uma concentração do processo de deposição próximo à zona de entrada do fluxo.

Uma aplicação interessante para o modelo é a possibilidade de determinar o raio mínimo de uma partícula de asfalteno que faria com que a mesma fosse pequena o suficiente para ser carregada pelo fluxo, saindo da tubulação e não depositando, dada uma geometria e propriedades da mistura. Essa informação seria de grande valor quando combinada ao uso de dispersantes de asfalteno, produtos químicos que previnem a agregação das partículas sólidas; sabendo o tamanho mínimo de partícula buscado para evitar deposição torna possível a seleção adequada do dispersante.

O modelo ainda apresenta algumas limitações, tais quais a desconsideração de variações de temperatura ocorrendo no fluxo interno e também a não contabilização da variação do diâmetro efetivo da tubulação após o início da deposição, o que causaria variações na velocidade do fluxo e em qualquer outro parâmetro dependente. O modelo também não considera os desvios de trajetória das partículas devido à turbulência do fluxo, que conhecidamente ocorrem.

Desenvolvimentos futuros envolveriam implementar a troca de calor entre a tubulação e o ambiente externo, de forma a determinar viscosidade e densidade locais, propriedades essas que alterariam a velocidade de deposição das partículas. Outra adição seria promover uma atualização contínua dos parâmetros de fluxo uma vez iniciada a deposição, incluindo as variações no raio efetivo da tubulação, que diminuiria conforme aumentasse a camada de asfalteno, alterando o perfil de deposição.

6. Referências

CREEK, J. L. Freedom of action in the state of asphaltenes: Escape from conventional wisdom. *Energy and Fuels*, v. 19, n. 4, p. 1212–1224, 2005.

JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R. Physics of the Granular State. *Science*, v. 255, n. 5051, p. 1523–1531, 1992.

KOR, P.; KHARRAT, R. Prediction of the asphaltene deposition profile along a wellbore during natural production from a reservoir. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 38, n. 19, p. 2837–2844, 2016.

KRAIWATTANAWONG, K. et al. Effect of Asphaltene Dispersants on Aggregate Size Distribution and Growth Effect of Asphaltene Dispersants on Aggregate Size Distribution and Growth. v. 22, n. 12, p. 1575–1582, 2009.

MIRZAYI, B.; MOUSAVI-DEHGHANI, S. A.; BEHRUZ, M. Modeling of asphaltene deposition in pipelines. *Journal of Petroleum Science and Technology*, v. 3, n. 2, p. 15–23, 2013.

MITCHELL, D. L.; SPEIGHT, J. G. The Solubility of Asphaltenes in hydrocarbon solvents. *Energy & fuels*, v. 52, n. 2, p. 149–152, 1972.

RAMIREZ-JARAMILLO, E.; LIRA-GALEANA, C.; MANERO, O. Modeling asphaltene deposition in production pipelines. *Energy and Fuels*, v. 20, n. 3, p. 1184–1196, 2006.

ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; GANIĆ, E. N. *Handbook of heat transfer applications*. [s.l: s.n.]. v. 73

VARGAS, F. M. et al. Modeling asphaltene phase behavior in crude oil systems using the perturbed chain form of the statistical associating fluid theory (PC-SAFT) equation of state. *Energy and Fuels*, v. 23, n. 3, p. 1140–1146, 2009.

VARGAS, F. M.; CREEK, J. L.; CHAPMAN, W. G. On the development of an asphaltene deposition simulator. *Energy and Fuels*, v. 24, n. 4, p. 2294–2299, 2010.