

MODELAGEM DA DEPOSIÇÃO DE PARAFINA

Aluno: Diego Antonio Gonçalves
Orientador: Angela Ourivio Nieckele

Introdução

Tendo em vista que há uma grande demanda de petróleo no mundo, as companhias exploradoras vêm expandindo suas ações *offshore*. Visto que é nas profundezas dos grandes oceanos que se encontram a maior parte das reservas petrolíferas, para explorar o petróleo em águas profundas é necessário o uso de grandes equipamentos que são expostos a ambientes muito frios (da ordem de 5°C) e a pressões altíssimas.

Uma das conseqüências destas baixas temperaturas e altas pressões nesse ambiente é o oferecimento de um cenário que favoreça a precipitação e à deposição de parafinas em poços, superfícies de linhas de produção, transporte e equipamentos de processo. Este é o fenômeno em questão neste estudo.

A deposição da parafina começa a ocorrer após o fluido ter alcançado uma temperatura denominada de TIAC (Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais), que é dependente de cada tipo de petróleo bruto.

Para ser capaz de prever a deposição da parafina é necessário identificar os mecanismos de deposição de parafina (Burguer e outros., 1981, Brown e outros., 1993, Creek e outros., 1999 e Svendsen, 1993). Este é um problema complexo que envolve diversas disciplinas tais como a termodinâmica, a transferência de calor, transferência de massa, o crescimento de cristal e a dinâmica do líquido. Uma previsão exata das distribuições temporal e espacial da parafina depositada ao longo do encanamento seria uma informação de valor inestimável que ajudaria nos estágios do projeto de campo, assim como em programar tais intervenções no encanamento, a fim de assegurar o fluxo do óleo nas taxas desejadas.

Uma revisão crítica detalhada da literatura foi preparada como parte de um projeto de pesquisa na deposição de parafina (Azevedo e Teixeira, 2003). Um dos trabalhos chaves analisados nesta revisão era aquele de Burguer et al (1981) onde os mecanismos possíveis responsáveis pela deposição de parafina foram identificados. Estes mecanismos são difusão molecular, difusão Browniana, dispersão por cisalhamento, e atuação da força da gravidade. A difusão Molecular tem sido aceita como o mecanismo dominante da deposição, e incluída na vasta maioria dos modelos apresentados na literatura aberta (por exemplo, Ribeiro et al, 1997, Fusi, 2003). Uma observação dos modelos de deposição de parafina disponíveis na literatura mostra que todos empregam constantes de ajuste para se adequar às informações de campo ou aos dados do laboratório. Esta prática, totalmente justificada para a obtenção de boas previsões para linhas particulares, complica a tarefa de avaliar a importância relativa de cada mecanismo da deposição. Assim sendo, no artigo de revisão mencionado acima, Azevedo e Teixeira (2003) concluíram que não havia nenhuma evidência experimental para confirmar que a difusão molecular é o mecanismo de deposição dominante. Recentemente Leiroz et. al (2005) apresentaram uma comparação entre os dados experimentais de Leiroz (2004) e as previsões de um modelo unidimensional para a deposição de parafina, considerando somente o mecanismo de difusão molecular. As experiências foram conduzidas sob condições controladas e permitiram, aparentemente pela primeira vez, a determinação das distribuições espacial e temporal da parafina depositada. A comparação dos resultados apresentou uma discrepância grande entre experiências feitas no laboratório e previsões

numéricas para o regime transiente. As experiências e as simulações foram conduzidas para condições laminar do fluxo.

Este processo de cristalização e deposição modifica as condições de escoamento do fluido, pois este assume características de fluido não-newtoniano. Sabendo que a viscosidade do óleo também se vê elevada, levando a grandes perdas de carga no escoamento e reduzindo a capacidade efetiva da linha. Esse fato prejudica o andamento do processo de exploração aumentando o consumo de energia necessário para movimentar o óleo. A deposição nas paredes internas dos dutos por onde escoo o óleo, reduz sua capacidade de escoamento, através da diminuição da área efetiva da seção transversal de escoamento ou numa etapa mais grave até bloqueando-a totalmente, como ilustrado na figura 1.



Figura 1: Linha parcialmente bloqueada por deposição de parafina.

Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste em analisar se a solidificação é um mecanismo dominante no processo de deposição de parafina, através da determinação numérica do campo de velocidade, pressão e temperatura.

Modelamento Matemático

Para determinar o campo de velocidade, pressão e temperatura, considerou-se escoamento laminar, fluido newtoniano, propriedades constantes, bi-dimensional.

A resolução numérica no caso que é objeto deste estudo envolve as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, que são:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad ; \quad \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\mathbf{r} u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

onde \mathbf{r} é a densidade, u_i é o componente do vetor da velocidade, t_{ij} é a tensão cisalhante, \mathbf{m} é a viscosidade absoluta e $\mathbf{Pr} = \mathbf{m}(c_p/k)$ é número de Prandtl, sendo onde c_p o calor específico a pressão constante e k é a condutividade térmica. H é a soma da entalpia sensível h e do calor latente DH , e T é a temperatura.

$$H = h + DH \quad (4)$$

sendo

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (5)$$

o subscrito *ref* indica um valor de referência.

O calor latente pode ser obtido em função do calor latente do material I e da fração de líquido \mathbf{b} como

$$DH = \mathbf{b} I \quad (6)$$

onde

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= 0 \quad \text{se } T < T_{\text{solidus}} \\ \mathbf{b} &= 1 \quad \text{se } T > T_{\text{liquidus}} \\ \mathbf{b} &= \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \quad \text{se } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \end{aligned} \quad (7)$$

Método Numérico

A solução do problema foi obtida utilizando-se o software comercial FLUENT, 2005, o qual é baseado no método de volumes finitos.

A geometria e malha foram criados utilizando o software comercial GAMBIT. Utilizou-se uma malha de 2393 nós.

Primeiramente foram criados os materiais (acrílico, cobre e parafina) com suas respectivas propriedades, em seguida utilizou-se o esquema *power-law* (Patankar, 1980) para determinar o campo de velocidade e equação de energia.

Foi selecionado o modelo de Solidificação, para em primeira instância verificar se com a diminuição da temperatura o óleo solidificava.

O acoplamento entre as equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi resolvido com o algoritmo SIMPLE (Patankar, 1980). As equações discretizadas de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia foram resolvidas de forma segregada, com a técnica de Multigrid (Hutchinson e Raithby, G.D., 1986).

Análise

Utilizou-se a mesma geometria que a do aparato experimental de Leiroz (2004), ilustrado na Figura 2, o qual consiste basicamente em um canal de seção reta retangular com base $B = 3 \text{ mm}$ e altura $H = 10 \text{ mm}$. O canal tem comprimento $L = 300 \text{ mm}$ e possui uma seção inicial de acrílico de 40 mm, para garantir escoamento desenvolvido ao longo da seção de teste.

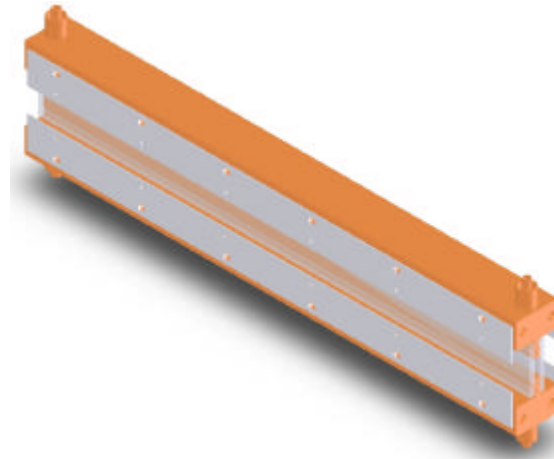


Figura 2 – canal

O esquema das figuras 3 e 4 ilustram o domínio de cálculo utilizado para simular o escoamento ao longo do canal em suas vistas frontal e lateral respectivamente. Pode-se observar que após a seção inicial de acrílico, a seção de teste possui as paredes inferior e superior de cobre. As paredes laterais são de vidro, para permitir uma melhor visualização do experimento. Água a baixa temperatura é injetada ao longo de dutos adjacentes ao cobre para resfriar a parede de cobre.

Na figura 4 podemos notar um *zoom* numa seção do escoamento de mostra a espessura da camada de parafina depositada (δ) sendo uma função da posição do ponto a analisado e do tempo decorrido de escoamento.

Devido à simetria, somente $\frac{1}{4}$ do canal foi analisado.

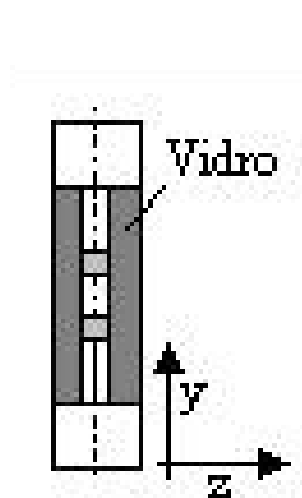


Figura 3 - vista frontal

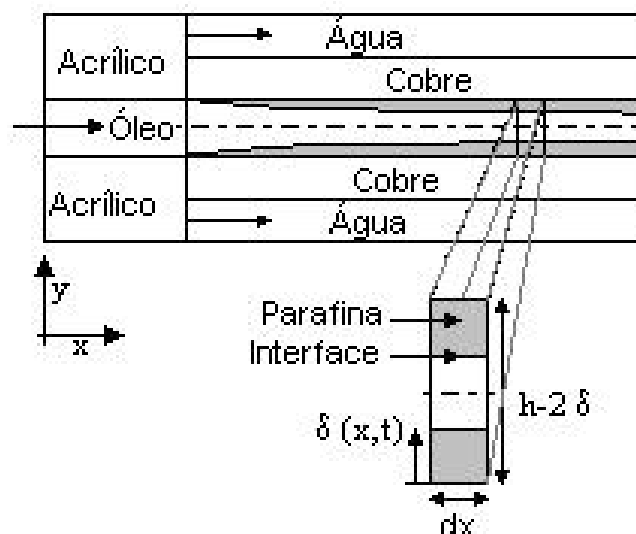


Figura 4 - vista lateral

Para a modelagem de perdas de calor nas paredes de acrílico, considerou-se perda de calor para o ambiente a $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, com coeficiente de transferência de calor igual a $h=10\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$. Como condição de contorno nas paredes do cobre, especificou-se a temperatura da água, como sendo igual a 15°C .

As propriedades dos materiais foram especificadas de acordo com os dados levantados no experimento de Leiroz (2004) e estão listados abaixo:

Vidro

Densidade = $2707\text{ kg}/\text{m}^3$
Calor específico = $0,8\text{ J}/(\text{kg K})$
Condutividade térmica = $0,76\text{ W}/(\text{m K})$

Cobre

Densidade = $8926\text{ kg}/\text{m}^3$
Calor específico = $383\text{ J}/(\text{kg K})$
Condutividade térmica = $401\text{ W}/(\text{m K})$

Acrílico

Densidade = $1190\text{ kg}/\text{m}^3$
Calor específico = $1465\text{ J}/(\text{kg K})$
Condutividade térmica = $0,21\text{ W}/(\text{m.K})$

Óleo

Densidade = $844\text{ kg}/\text{m}^3$
Calor específico = $2017\text{ J}/\text{kg.k}$
Condutividade térmica = $0,23\text{ W}/\text{m.K}$
Viscosidade = $0.0102\text{ J}/(\text{kg.K})$
Calor latente = $264440\text{ J}/\text{kg}$
Temperature de solidus = $309,15\text{ K}$
Temperatura de liquidus = $309,15\text{ K}$
Coeficiente de expansão térmica = $0,00333\text{ 1}/\text{K}$

Inicialmente todo o aparato encontra-se a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, com o óleo entrando no domínio a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, com vazão de $3,18\text{ kg}/\text{s}$. A Figura 5 ilustra a distribuição de pressão ao longo da linha de centro. Observa-se que na entrada do canal de teste ($x = 0$), o escoamento encontra-se hidrodinamicamente desenvolvido, já que a queda de pressão é constante. Este comportamento também pode ser observado na Figura 6, que apresenta o campo de velocidade como formato parabólico na seção transversal do canal, com velocidades máximas no centro.

O problema se inicia, com o escoamento de água gelada, ($T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) ao longo do cobre. A parede externa perde calor para o ambiente.

A Figura 7 ilustra a posição da parafina depositada medida no laboratório e com os modelos de difusão desenvolvido em Leiroz et al, (2004), para o regime permanente. Observa-se que a deposição aumenta ao longo do canal. Os resultados experimentais são comparados com os resultados de dois modelos de difusão molecular da parafina, obtidos por Mao (2004). Observa-se que qualitativamente os resultados são satisfatórios.

A fração de líquido obtida com o modelo de solidificação pode ser analisada na Figura 8 e o campo de temperatura na Figura 9. Para facilitar a visualização o domínio não encontra-se em escala. Nota-se o resfriamento da região do acrílico, a baixa temperatura do cobre, porém, somente o modelo de solidificação não é capaz de prever corretamente a deposição da parafina. Uma pequena região de parafina sólida pode ser vista no final do domínio após atingir o regime permanente.

Considerações finais

Para a determinação da taxa de deposição é necessário resolver de forma acoplada com escoamento, a equação de concentração de parafina diluída no óleo. Porém a aplicação deste modelo requer um estudo maior, uma compreensão melhor do *software* e uma maior compreensão das equações que são resolvidas por ele. Esta evolução é com certeza um caminho para a continuidade deste estudo tão complexo.

Sem dúvida com o prosseguimento deste trabalho poderá se construir uma rotina de modelagem que pode prever com segurança a deposição de parafina em quaisquer duto ou linha de produção. Fato considerável pois o método preditivo de controle é o mais econômico e eficaz, pois evita gastos com equipamentos de remoção de depósitos e otimiza a utilização de métodos preventivos (inibidores).

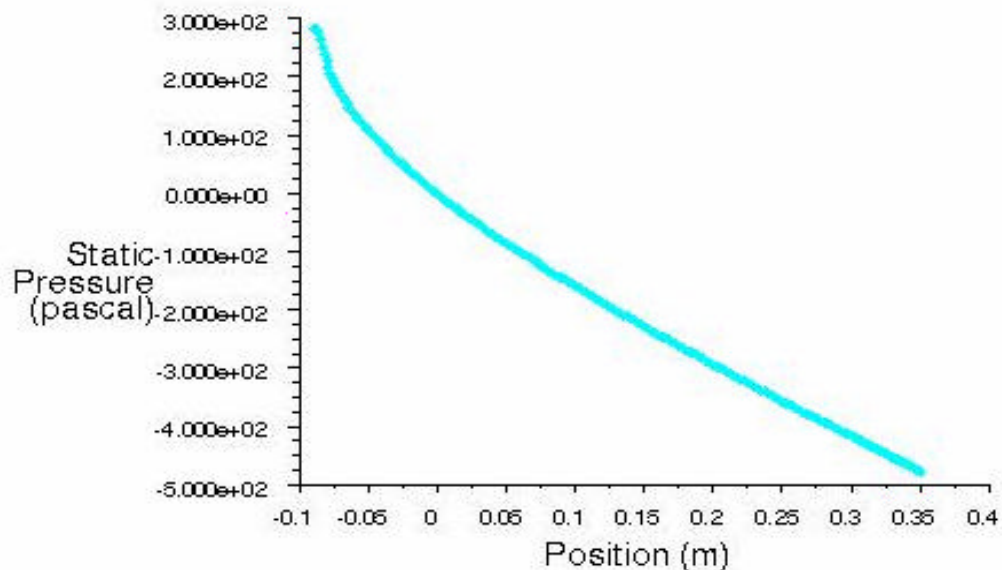


Figura 5 – Variação da pressão ao longo da linha de simetria

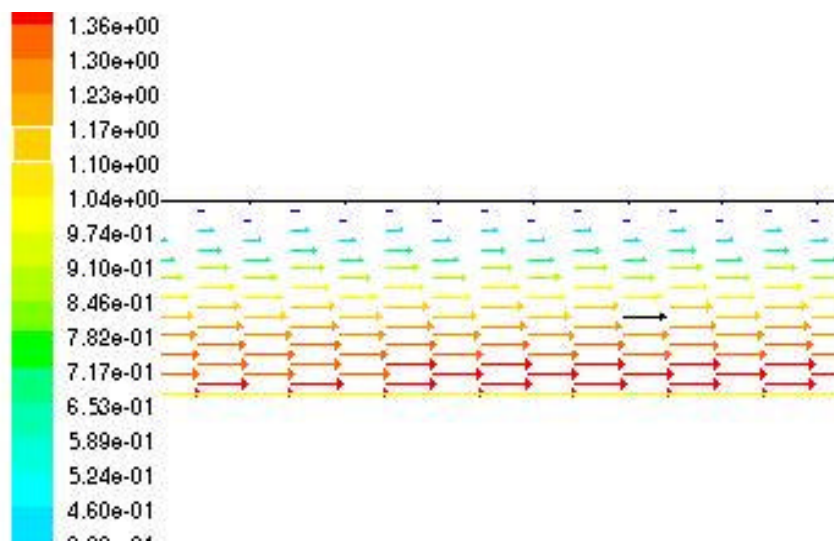


Figura 6 – Campo de velocidade axial

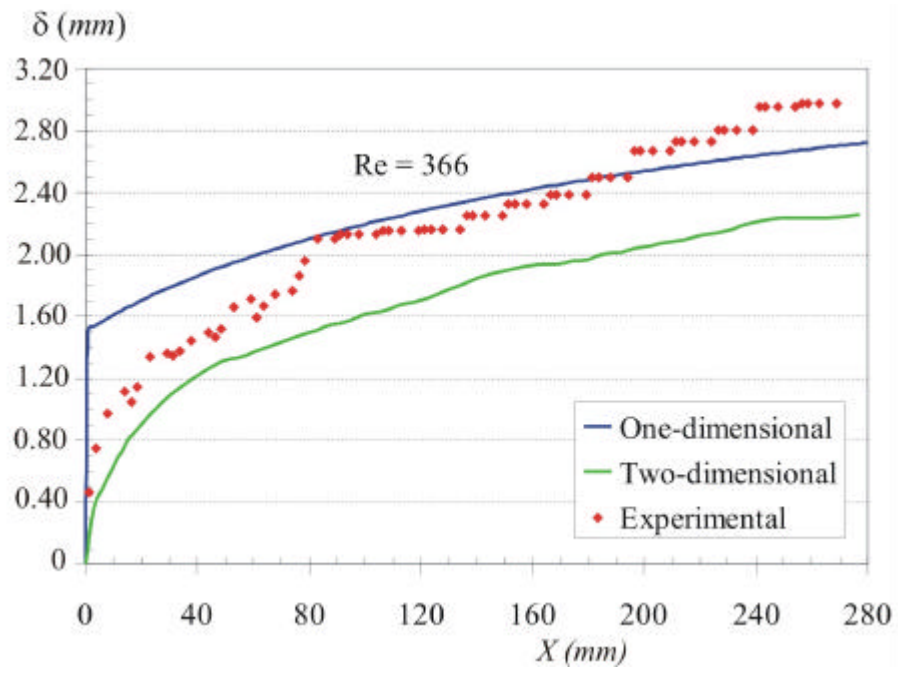


Figura 7 – Posição de depósito. (Leiroz et al, 2004)



Figura 8 – Fração de líquido

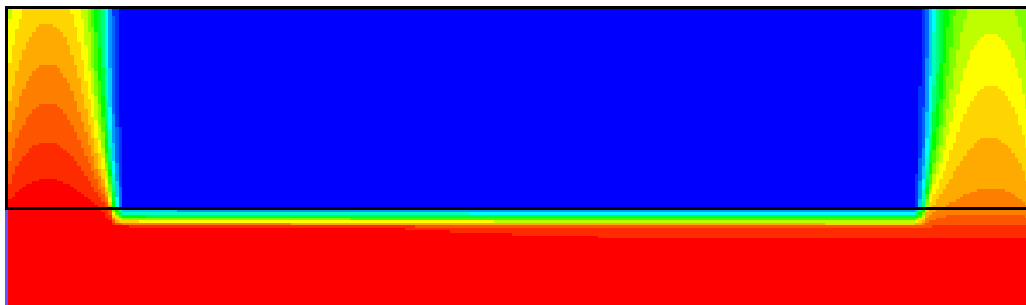


Figura 8 – Campo de Temperatura

Referências

- AZEVEDO, L.F.A. AND TEIXEIRA, A.M., A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms, **Petroleum Science & Technology**, Vol.21, pp. 393-408, 2003.
- BROWN, T.S., NIESEN, V.G., AND ERICKSON, D.D., 1993, Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition, 68th Annual Conference of the Society of Petroleum Engineers, paper no. SPE 26548.
- BURGER, E.D., PERKINS, T.K., AND STRIEGLER, J.H., 1981, Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline, *Journal of Petroleum Technology*, June, 1075-1086.
- CREECK, J. L., LUND, H. J., BRILL, J. P., WOLK, M. Wax Deposition in Single Phase Flow. **Fluid Phase Equilibria**, 158 – 160, 801 – 811, 1999.
- FUSI, L., On the Stationary Flow of a Waxy Crude Oil With Deposition Mechanisms, **Nonlinear Analysis**, vol 53, pp. 507-526, 2003.
- JORDA, R. M., Paraffin Deposition and Prevention in Oil Wells, *JPT* Dec.1996, 1605; **Transactions AIME**, pp. 237, 1996.
- HUTCHINSON, B. R. AND RAITHBY, G.D., 1986, “A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy,” *Numerical Heat Transfer*, 9, pp.511-537.
- LEIROZ, A.T., 2004, Estudo da Deposição da Parafina em Linhas de Petróleo, tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brazil.
- LEIROZ, A. T., ROMERO, M. I., NIECKELE, A.O., AZEVEDO, L.F.A., 2005, Wax Deposition in Laminar Channel Flow, *Proceedings of 18th International Congress of Mechanical Engineering*, ABCM, November 6-11, 2005, Ouro Preto, MG, Brazil
- PATANKAR, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, NY.
- RIBEIRO, F.S., SOUZA MENDES, P.R., AND BRAGA, S.L., 1997, Obstruction of Pipelines due to Paraffin Deposition during the Flow of Crude Oils, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 4319-4328.
- SVENDSEN, J.A., 1993, Mathematical Modeling of Wax Deposition in Oil Pipeline Systems, *AIChE Journal*, 39, No.8, 1377-1388.
- ROMERO VELÁSQUEZ, M. I., 2004, “Avaliação Do Mecanismo De Difusão Molecular Para A Modelagem Da Deposição De Parafina Em Dutos De Petróleo”, *Dissertação de mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brazil