



Fabio Paula Brum

**Modelo de Transferência de Massa Convectivo para
Predição de Depósito de Parafina em Escoamento
Multifásico**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Angela Ourivio Nieckele
Co-Orientador: Prof. Sidney Stuckenbruck

Rio de Janeiro
Setembro de 2014



Fabio Paula Brum

**Modelo de Transferência de Massa Convectivo para
Predição de Depósito de Parafina em Escoamento
Multifásico**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica -PUC- Rio

Prof. Sidney Stuckenbruck

Co-orientador

Olympus Software Científico e Engenharia

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica -PUC- Rio

Dr. João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

Instituto SINTEF do Brasil

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Setembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fabio Paula Brum

Graduou-se em Engenharia Naval no Depto. de Engenharia Oceânica UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), em 1996. É Engenheiro de Petróleo na PETROBRAS, onde atua na área de Elevação e Escoamento.

Ficha Catalográfica

Brum, Fabio Paula

Modelo de transferência de massa convectivo para predição de depósito de parafina em escoamento multifásico / Fabio Paula Brum; orientador: Angela Ourivio Nieckele; co-orientador: Sidney Stuckenbruck. – 2014.

111 f.: il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Deposição de Parafina. 3. Convecção. 4. Escoamento Multifásico. 5. Simulação Numérica. 5. Unidimensional. 6. Modelo de Deslizamento. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Stuckenbruck, Sidney. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A minha esposa e filhos pelo amor, compreensão e apoio durante todo o período deste projeto de vida.

Aos meus pais e irmão que me proporcionaram uma estrutura familiar e a melhor orientação para que eu obtivesse mais esta conquista, minha eterna gratidão.

A Professora Angela Ourivio Nieckele, minha orientadora, pela credibilidade, paciência, disponibilidade e capacidade de ensino demonstrada neste período de trabalho em conjunto.

Ao orientador, o Professor Sidney Stuckenbruck, pela amizade, orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho, cuja base, o aplicativo Transflux, é de sua autoria.

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino excelente, e pelos conhecimentos adquiridos.

A empresa Petrobras, por me indicar para realização deste mestrado e pelo apoio ao longo de todo período do curso.

Aos meus colegas da UO-RIO/IPP/EES pela ajuda na obtenção das informações utilizadas neste trabalho e pelo incentivo na conclusão do curso.

A todos os meus familiares e amigos que sempre me incentivaram e acreditaram no meu sucesso.

Resumo

Brum, Fabio Paula; Nieckele, Angela Ourivio; Stuckenbruck, Sidney. **Modelo de Transferência de Massa Convectivo para Predição de Depósito de Parafina em Escoamento Multifásico**. Rio de Janeiro, 2014. 111p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Óleos brutos altamente parafínicos podem causar problemas operacionais significativos, tais como bloqueio de um oleoduto devido à precipitação e deposição de componentes de parafina durante a produção e transporte de petróleo bruto. O custo de gerenciamento da parafina é enorme e aumenta significativamente com o aumento da produção de petróleo em áreas marítimas profundas. Mas estes custos podem ser significativamente reduzidos se a deposição de parafina em dutos puder ser prevista com precisão. Nesta pesquisa, o fenômeno de deposição foi analisado numericamente. O modelo de deslizamento foi utilizado para prever o fluxo multifásico e a deposição de parafina foi determinada a partir de um modelo de convecção. Este modelo previu com precisão as taxas de deposição de escala de laboratório em regime de fluxo laminar e turbulento. A taxa de deposição de parafina apresentou uma boa concordância com os resultados do software comercial OLGA. A comparação com a produção de petróleo de um poço real foi modelado, e bons resultados foram obtidos no impacto da queda de pressão devido à redução da área seção transversal causada pela deposição de parafina progressiva na parede do tubo. Os resultados deste trabalho mostraram uma boa consistência física e um acordo razoável com os dados experimentais e de campo comparados.

Palavras-chave

Deposição de Parafina; Convecção; Escoamento Multifásico; Simulação Numérica; Modelo de Deslizamento.

Abstract

Brum, Fabio Paula; Nieckele, Angela Ourivio (Advisor); Stuckenbruck, Sidney (Co-Advisor). **Convective Mass Transfer Model to Predict Wax Deposition in Multiphase Flow in Pipelines**. Rio de Janeiro, 2014. 111p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Highly waxy crude oils can cause significant operational problems such as blockage of a pipeline due to the precipitation and deposition of select wax components during the production and transportation of the crude oil. The cost of wax management is enormous and rapidly increasing because of increased oil production in deep sea areas. Wax management costs can be significantly reduced if wax deposition in pipeline can be accurately predicted. In this research, the wax deposition phenomenon was numerically investigated. The drift flux model was employed to predict the multiphase flow and the wax deposition was determined based on a convective model. This model accurately predicted the deposition rates for lab scale under laminar and turbulent flows. The wax deposition rate presented a good agreement with the results of commercial software OLGA. A comparison with an existing oil production well was performed, and good results were obtained in the impact in pressure drop due to cross section area reduction caused by progressive wax deposition on the pipe wall. The results of this work showed a good physical consistency and a reasonable agreement with the compared experimental and field data.

Keywords

Wax Deposition; Convection; Multiphase Flow; Numerical Simulation; Drift Flux Model.

Sumário

1. Introdução	15
1.1 Revisão Bibliográfica	19
1.2 Objetivo	22
1.3 Organização do Manuscrito	23
2. Modelo Matemático	24
2.1 Equações de Fechamento	27
2.1.1 Transferência de Massa entre as fases	27
2.1.1.1 Massa específica	27
2.1.1.2 Viscosidade dinâmica	31
2.1.2 Tensão cisalhante	32
2.1.3 Fluxo de deslizamento	33
2.1.4 Fluxo de calor	35
2.2 Resistência Térmica na Superfície Interna do Duto	36
2.2.1 Escoamento Monofásico em Dutos de Seção Reta Circular	37
2.2.2 Escoamento Bifásico em Dutos de Seção Reta Circular	38
2.3 Modelo de Deposição de Parafina	42
2.3.1 Modelo Difusivo	44
2.3.2 Modelo Convectivo	45
2.4 Gas Lift na Equação de Energia Térmica	48
3. Modelo Numérico	51
3.1 Código TRANSFLUX	52
3.2 Discretização da Equação de Concentração de Parafina	54
3.3 Procedimento da Solução para Deposição de Parafina	56

4. Comparação com Dados de Laboratório	59
4.1 Configuração da Seção de Teste	59
4.2 Caracterização do Fluido	61
4.3 Casos Investigados	63
4.4 Teste de Malha	63
4.5 Correlações de Transferência de Calor	67
4.6 Comparação entre Modelo Difusivo e Convectivo	75
4.6.1 Escoamento Horizontal	76
4.6.2 Escoamento Levemente Inclinado (2°) – Padrão de Fluxo Intermitente	81
4.6.3 Escoamento Vertical	83
4.7 Análise de Sensibilidade aos Parâmetros de Ajuste de Matzain	87
5. Resultados de Campo	94
5.1 Geometria	94
5.2 Caracterização do Fluido	95
5.3 Condições de Contorno	96
5.4 Resultados Numéricos	97
5.5 Cálculo da Espessura do Depósito	99
5.6 Comparação com Dados de Campo	102
6. Comentários Finais e Sugestões	104
6.1 Comentários Finais	104
6.2 Sugestões	106
7. Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 1.1-	Produção de Petróleo em Águas Profundas	15
Figura 1.2-	Linha de produção parcialmente bloqueada	16
Figura 1.3-	Diferentes Tipos de Pigs para Limpeza de Linhas	17
Figura 1.4-	Esquema gráfico representativo dos padrões de escoamento	18
Figura 2.1-	Injeção de gas lift em um ponto da coluna de produção	50
Figura 3.1-	Malha de discretização deslocadas	52
Figura 3.2-	Fluxograma do Modelo Numérico	58
Figura 4.1-	Curva de solubilização de parafina	62
Figura 4.2-	Influência da malha na espessura do depósito. Caso 1	64
Figura 4.3-	Influência do passo de tempo na espessura do depósito. Caso 1	65
Figura 4.4-	Influência da malha e passo de tempo na espessura do depósito. Caso 1	66
Figura 4.5-	Mapa de Fluxo gerado pelo Matzain (1999)	70
Figura 4.6-	Influência das correlações de Kudirka et al (1965) e Ravipudi e Godbold (1978). Caso 1, $t= 24$ horas.	71
Figura 4.7-	Influência das correlações de Shah (1981) e Ravipudi e Godbold (1978), corrigida por Kim et al. (1999). Caso 5, $t= 24$ horas ($b=0.123$)	72
Figura 4.8-	Influência das correlações de Shah (1981) e Aggour (1978). Caso 8, $t= 24$ horas.	73
Figura 4.9-	Variação temporal da espessura do depósito na extremidade do duto	74
Figura 4.10-	Espessura do depósito na extremidade do duto. Casos 1, 2 e 3	77
Figura 4.11-	Perfil de espessura do depósito ao longo do duto. Casos 1, 2 e 3.	79

Figura 4.14-	Espessura do depósito na extremidade do duto. Casos 7, 8 e 9.	85
Figura 4.15-	Perfil de espessura do depósito ao longo do duto. Casos 7, 8 e 9.	87
Figura 4.16-	Influência de C2 na espessura de depósito na extremidade final do duto.	89
Figura 4.17-	Influência de C1 e C2 na espessura do depósito na extremidade final do duto.	91
Figura 4.18-	Espessura de depósito na extremidade final comparando os métodos LD-LD e modelo difusivo com o modelo convectivo ajustado	92
Figura 5.1-	Geometria do poço produtor	95
Figura 5.2-	Perfil de pressão ao longo da linha sem depósito de parafina	98
Figura 5.3-	Perfil de holdup de líquido ao longo da linha sem depósito de parafina	98
Figura 5.4-	Perfil de temperatura ao longo da linha sem depósito de parafina Influência do passo de tempo na espessura do depósito. Caso 1	98
Figura 5.5-	Perfil de Temperatura próximo ao TDP durante a deposição de parafina	100
Figura 5.6-	Perfil de espessura do depósito de parafina após 5 e 10 dias	100
Figura 5.7-	Evolução com o tempo da espessura de depósito de parafina em três posições diferentes da linha de produção	101
Figura 5.8-	Comparação entre os perfis de espessura de depósito ao longo da linha	102
Figura 5.9-	Perfil de holdup de líquido na região de TDP em diferentes instantes de tempo	102
Figura 5.10-	Variação no tempo da diferença de pressão entre o reservatório e a plataforma	103

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Coeficientes para fator volume de formação	29
Tabela 4.1-	Característica do Tubo	59
Tabela 4.2-	Característica do Fluido	61
Tabela 4.3-	Composição do Fluido	61
Tabela 4.4-	Calor específico à pressão constante para os fluidos	62
Tabela 4.5-	Casos Estudados	63
Tabela 4.6-	Correlações de cálculo para h_{in} conforme literatura atual	67
Tabela 4.7-	Correlações de cálculo para h_{in} conforme sugestão de Matzain	68
Tabela 4.8-	Correlações de cálculo para h_{in} utilizadas no estudo	68
Tabela 4.9-	Correlações para h_{in} utilizadas e padrões obtidos em cada caso	69
Tabela 5.1-	Ambiente Externo ao poço	95
Tabela 5.2-	Fluido Produzido pelo Reservatório	95
Tabela 5.3-	Propriedades Termofísicas dos Fluidos	96

Lista de símbolos

A	Área da seção transversal da tubulação
Bo	Fator volume de Formação de óleo.
Cp	Calor específico a pressão constante.
Cv	Calor específico a volume constante.
C_o	Parâmetro de distribuição
C	Concentração de Parafina
D	Diâmetro da tubulação
D_m	Coefficiente de Difusão
f	Fator de fricção
Fr	Número de <i>Froude</i>
g	Aceleração da gravidade
h	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção
h_m	Coefficiente Convectivo de Transferência de Massa
J	Fluxo de Deslizamento
k	Condutividade térmica.
m	Massa
N_u	Número de Nusselt
P	Pressão média da mistura e da fase gasosa
Pr	Número de Prandtl
q_w	Fluxo de Calor
Q	Vazão Volumétrica
r	Raio
R	Constante do gás
Re	Número de <i>Reynolds</i>
S	Perímetro molhado
Sh	Número de Sherwood
Sc	Número de Schmidt
t	Tempo
T	Temperatura
U	Coefficiente global de transferência de calor.

u	Energia Interna
v	Velocidade
\dot{V}	Vazão volumétrica
x	Coordenada axial
Y	Fator de Expansão
w_{sol}	Fração da Parafina Saturada

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica da fase
Δ	Varição de uma grandeza
μ	Viscosidade dinâmica
ε	Rugosidade Absoluta.
ν	Viscosidade cinemática
σ	Tensão cisalhante
δ	Espessura do Depósito
ϕ	Porosidade
ρ	Massa específica
τ	Tensão de cisalhamento
θ	Ângulo do Escoamento

Subscritos

e, w	Faces leste e oeste do volume de controle principal
d	Depósito
e	Externo
E	Referente ao centro do volume principal de controle a leste
$drift$	Deslizamento
g	Fase gasosa
i	Índice representativo do bloco-i
in	Interno

<i>int</i>	Interface fluido-parafina
<i>inj</i>	Injeção
<i>JT</i>	Joule-Thomson
<i>l</i>	Fase Líquida
<i>m</i>	Mistura
<i>P</i>	Centro do volume de controle principal
<i>o</i>	Fase Óleo
<i>sg</i>	<i>Superficial do Gás</i>
<i>sl</i>	<i>Superficial do Líquido</i>
<i>r</i>	Relativo entre as fases
<i>ref</i>	Referência
<i>sol</i>	Solubilidade
<i>w</i>	Parede da tubulação
<i>wax</i>	Parafina
<i>W</i>	Corresponde ao volume de controle oeste ao principal
∞	Meio externo

Sobrescritos

<i>o</i>	Referente ao passo de tempo anterior
<i>std</i>	Condição Padrão