



**Samuel Rodrigues Cruz**

**Estudo da Deposição da Parafina em  
Escoamento Multifásico em Dutos**

**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.

Orientador: Profa. Angela Ourivio Nieckele

Co-Orientador: Prof. Sidney Stuckenbruck

Rio de Janeiro

Abril de 2011



**Samuel Rodrigues Cruz**

**Estudo da Deposição da Parafina em  
Escoamento Multifásico em Dutos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre pelo programa de Pós-graduação em engenharia Mecânica da PUC-Rio aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Angela Ourivio Nieckele**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica-PUC-Rio

**Prof. Sidney Stuckenbruck**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica-PUC-Rio

**Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro**

Exploração e Produção - Petrobrás

**Ricardo Marques de Toledo Camargo**

Exploração e Produção – Petrobrás

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro 15 de Abril de 2011

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

**Samuel Rodrigues Cruz**

Graduou-se em Engenharia Química na Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ em 1988

Ficha Catalográfica

Cruz, Samuel Rodrigues

Estudo da deposição da parafina em escoamento multifásico em dutos / Samuel Rodrigues Cruz ; orientador: Angela Ourivio Nieckele ; co-orientador: Sidney Stuckenbruck. – 2011.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Deposição de parafina. 3. Difusão molecular. 4. Escoamento multifásico. 5. Simulação numérica. 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 orientadora, Professora Angela Ourivio Nieckele pelo apoio, orientação e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador Professor Sidney Stuckenbruk pelo apoio, orientação e por ter gentilmente cedido o programa Transflux para o desenvolvimento deste trabalho

A toda a minha família, em especial, para a minha esposa e filha pelo apoio, amor e compreensão.

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

Ao departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e seus funcionários pela colaboração.

Aos Gerentes Carlos Eduardo Costa Valle Longo e Ricardo Pereira Abrunhosa pela minha indicação ao curso de mestrado na Petrobras e todo apoio que me deram ao longo do curso.

Aos meus colegas da Petrobras pelo companheirismo e ajuda diária.

## Resumo

Cruz, Samuel Rodrigues; Nieckele, Angela Ourivio; Stuckenbruk, Sidney **Estudo da Deposição da Parafina em Escoamento Multifásico em Dutos**. Rio de Janeiro 2011.113p. Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Petróleo é formado por um conjunto de hidrocarbonetos. No reservatório, devido à altas pressões e temperaturas, encontra-se na forma de líquido. Conforme o petróleo escoar, a pressão cai assim como a temperatura, devido a perda de calor para o ambiente marinho, causando a liberação do gás dissolvido no petróleo tornando o escoamento bifásico. Adicionalmente, caso a temperatura caia abaixo da temperatura inicial de cristalização (TIAC), ocorre precipitação dos cristais, formando uma fase sólida que se deposita na parede interna das tubulações. Deposição de parafinas é um dos mais críticos problemas operacionais na produção e transporte de petróleo em linhas submarinas. O presente trabalho analisa numericamente a deposição de parafina em escoamento multifásico no interior de dutos para diversos padrões de fluxo. Investiga-se ainda a influência da presença da água e dos ângulos de inclinação da tubulação com a horizontal nas taxas de deposição. Para prever o escoamento multifásico utilizou-se o modelo de deslizamento e a deposição da parafina foi determinada baseada no modelo de difusão molecular. A modelagem desenvolvida foi validada com a simulação do escoamento ao longo de um duto curto, reproduzindo condições experimentais de laboratório. Os resultados obtidos para a espessura do depósito apresentaram excelente concordância com os dados experimentais e com os dados obtidos com o simulador comercial OLGA. Analisou-se o escoamento entre um poço produtor e uma plataforma na Bacia de Campos, onde determinou-se o impacto na perda de carga devido a diminuição do diâmetro interno da tubulação causada pelo aumento da espessura dos depósitos. Os resultados obtidos destes estudos apresentaram boa coerência física e razoável concordância com relação aos dados experimentais.

### Palavras - Chave

Deposição de Parafina; Difusão Molecular; Escoamento Multifásico; Simulação Numérica; Modelo de Deslizamento

## Abstract

Cruz, Samuel Rodrigues; Nieckele, Angela Ourivio (Advisor); Stuckenbruk, Sidney (Co-Advisor). **Wax Deposition Study in a Multiphase Pipe Flow**. Rio de Janeiro, 2011. 113p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Crude oil is formed by several hydrocarbons. At the reservoir, due to high pressures and temperatures, it is found in the liquid form. As the oil flows, its pressure drops as well as its temperature, due to a heat loss to the ambient, causing liberation of the gas dissolved in the oil and it becomes a two-phase flow. Further, if the temperature drops below the initial crystallization temperature, crystals precipitation occurs, forming a solid phase deposit at the inner pipeline walls. Wax deposition is one of the most critical operational problems regarding oil flow through subsea pipelines. This work, wax deposition in a multiphase flow is numerically predicted. The influence of a water phase and pipe inclination angle in the deposition rate is investigated. The Drift Flux Model was employed to predict the multiphase flow and the wax deposition was determined based on a Molecular Diffusion Model. The methodology was validated by investigating the flow in a short pipe, reproducing laboratory experimental conditions. The wax deposit thickness presented a excellent agreement with the experimental data and against results of commercial code OLGA. An existing oil production well in Campos Basin was modeled, and the impact in pressure drop due to cross section area reduction caused by progressive wax deposition on the pipe wall. The results obtained in this study demonstrated good physical consistency and a reasonable agreement with the compared experimental database.

## Keywords

Wax Deposition; Molecular Diffusion; Multiphase Flow; Numerical Simulation; Drift Flux Model

# Sumário

1. Introdução	16
1.1 escoamento Multifásico	18
1.2 Mecanismo de Deposição	20
1.3 Objetivos	23
1.4 Revisão Bibliográfica	23
1.4.1 Modelos de deposição	24
1.4.2 Deposição em sistema Multifásico	26
1.5 Organização do Manuscrito	29
2. Modelagem Matemática	31
2.1 Modelo de Deslizamento	31
2.2 Fluxo de Deslizamento J	34
2.2.1 Padrão Intermitente e Estratificado	35
2.2.2 Padrão de Bolhas	36
2.3 Atrito com a Parede	36
2.4 Transferência de Calor para o Ambiente externo	38
2.4.1 Coeficiente de Película Externo	39
2.4.2 Coeficiente de Película Interno	40
2.4.3 Energia Interna e Temperatura	42
2.5 Modelo de Deposição de Parafina	44
2.6 Propriedades dos Fluidos	47
2.6.1 Massa específica	48
2.6.2 Viscosidade Dinâmica	52
2.6.3 Calor Especifico e Condutividade térmica	53
2.6.4 Condutividade Térmica da Parafina	53
2.6.5 Curva de Solubilidade	54
2.6.6 Coeficiente de Difusão Molecular	55
3. Método Numérico	56
3.1 Discretização Numérica das Equações	56

3.2 Solução do Sistema Algébrico	58
3.3 Procedimento Solução para Deposição de Parafina	60
4. Análise de Casos	62
4.1 Geometria e Condições de Contorno	62
4.2 Caracterização do Fluido	63
4.3 Estudo de Casos	66
4.3.1 Análise de Sensibilidade das Constantes Empíricas $C_1$ e $C_2$	68
4.3.2 Padrão Intermitente Horizontal	71
4.3.3 Padrão Intermitente Inclinado e Vertical	75
4.3.4 Padrão Bolha Vertical	78
4.3.5 Padrão Estratificado	80
4.3.6 Influência da Presença de Água	81
4.3.7 Porosidade	82
4.3.8 Caso 2-Distribuição de Pressão, Temperatura e Fração Volumétrica	83
5. Poço Produtor	87
5.1 Geometria	87
5.2 Caracterização do Fluido	88
5.3 Condições de Contorno	91
5.4 Resultados Numéricos	94
5.4.1 Espessura do Depósito	98
5.4.2 Comparação Dados de Campo	101
6. Comentários Finais	103
7. Referências Bibliográficas	107



## Lista de Figuras

Figura 1.1-	Arranjo Submarino para a produção de petróleo no mar	16
Figura 1.2-	Bloqueio do duto por deposição de parafina. Cortesia do CENPES/Petrobras	18
Figura 1.3-	Esquema gráfico representativo dos padrões de escoamento	19
Figura 1.4-	Esquema gráfico representativo dos padrões de escoamento	18
Figura 1.5-	Esquema gráfico do processo de difusão molecular	20
Figura 1.6-	Mecanismo de transporte radial de parafina (Merino-Garcia et al,2007)	21
Figura 1.7-	Mapa do padrão de escoamento, representando a espessura do depósito de parafina (Matzain, 1999)	27
Figura 2.1-	Evolução de um sistema da condição P,T para a condição padrão	48
Figura 2.2-	Curva de Solubilização da parafina	54
Figura 3.1-	Malha de discretização deslocadas	57
Figura 3.2-	Fluxograma	61
Figura 4.1-	Condutividade Térmica do Líquido e do Gás	64
Figura 4.2-	Calor Específico a pressão constante do líquido e do gás	65
Figura 4.3-		66
Figura 4.4-	Curva de solubilização de parafina	68
Figura 4.5-	Teste de Malha e de Passo de Tempo	
	Evolução Temporal da Deposição em $x=7$ metros.	70
Figura 4.6-	Teste de Sensibilidade das constantes de Matzain	
	Evolução temporal da deposição em $x=7$ metros.	72
Figura 4.7-	Padrão Intermitente horizontal. Casos 1,2 e3	
	Distribuição Espacial da Espessura do depósito em	73
Figura 4.8-	$t=24$ horas. Padrão Intermitente horizontal. Casos 1,2 e3	
Figura 4.9-	Influência da Fração de gás na distribuição temporal	75

	intermitente inclinado e vertical. Casos 4 e 5.	76
Figura 4.10-	Distribuição Espacial da Espessura do depósito em t=24 horas. Padrão Intermitente inclinado e Vertical. Casos 4 e 5	78
Figura 4.11-	Caso 6: $V_{sl} = 1, 219\text{m/s}$ , $V_{sg} = 0, 152\text{m/s}$ . Vertical $\Theta = 90^\circ$ Padrão bolha vertical.	79
Figura 4.12-	Evolução temporal da deposição em x=7 metros Caso 7: $V_{sl} = 0,061\text{m/s}$ , $V_{sg} = 0, 305\text{m/s}$ . Horizontal Padrão Estratificado	80
Figura 4.13-	Comparação da Evolução temporal da deposição em x=7 metros. Casos 1 a 7.	81
Figura 4.14-	Influência da fração de água na evolução temporal da deposição em x=7 metros. Padrão intermitente horizontal. Caso 2.	82
Figura 4.15-	Evolução Temporal da Pressão ao longo do Duto.	84
Figura 4.16-	Evolução Temporal do Holdup do Líquido ao longo do duto.	85
Figura 4.17-	Evolução Temporal das velocidades superficiais ao longo do duto.	86
Figura 4.18-	Evolução Temporal da Temperatura Média ao longo do duto.	87
Figura 5.1-	Geometria do poço produtor	88
Figura 5.2-	Curva de solubilização da parafina	91
Figura 5.3-	Variações de pressão no PDG no poço produtor durante o ano de 2008.	92
Figura 5.4-	Evolução da pressão no fundo do poço, na ANM e na chegada de plataforma com o tempo no período de 30/10/2008 a 12/11/2008	93
Figura 5.5-	Variação da pressão e velocidades superficiais ao longo da tubulação para o tempo de simulação de 1 hora.	96

Figura 5.7-	Varição da Massa Específica e Viscosidade Dinâmica com o comprimento.	97
Figura 5.8-	Distribuição espacial da espessura do depósito em diferentes tempos de simulação.	99
Figura 5.9-	Evolução Temporal de deposição em $s = 7058$ metros e $s = 7700$ metros.	100
Figura 5.10-	Varição da Porosidade com Comprimento.	100
Figura 5.11-	Pressão de chegada na plataforma (nó 4).	101

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1-	Constante da correlação de transferência de calor externa	39
Tabela 2.2-	Número de Reynolds do depósito em função do padrão de escoamento	47
Tabela 2.3-	Coeficientes para fator volume de formação	50
Tabela 4.1-	Composição do Fluido	64
Tabela 4.2-	Casos Estudados	67
Tabela 4.3-	Espessura de depósito no final do duto após 24 horas	74
Tabela 4.4-	Porosidade	83
Tabela 5.1-	Características Poço Produtor	88
Tabela 5.2-	Fluido no Reservatório	89
Tabela 5.3-	Composição do fluido poço produtor	89
Tabela 5.4-	Propriedades termofísicas do fluido no	90
Tabela 5.5-	reservatório	94
Tabela 5.6-	Condições de contorno da pressão e Temperatura	94
Tabela 5.7-	Condições de contorno de vazão de fluido	94

## Lista de Símbolos

$A$	Área da seção transversal do duto.
$A_{si}$	Área da superfície interna do duto.
$A_i^0$	Área da seção transversal do duto no instante de tempo anterior.
$A_d$	Área da seção transversal do depósito.
$B_o$	Fator volume de Formação de óleo.
$C_p$	Calor específico a pressão constante.
$C_v$	Calor específico a volume constante.
$C_o$	Coefficiente de distribuição.
$D$	Diâmetro interno do duto.
$D_h$	Diâmetro hidráulico.
$D_w$	Coefficiente de difusão da parafina líquida na mistura.
$F_r$	Número de Froude.
$f$	Fator de atrito.
$f_{pb}$	Fator pressão de bolha.
$g$	Aceleração da gravidade.
$h$	Coefficiente de película.
$J$	Fluxo de deslizamento ('drift').
$k$	Condutividade térmica.
$k_T$	Coefficiente de compressibilidade isotérmica.
$m_{gl}$	Fluxo interfacial de massa entre as fases.
$\dot{m}_p$	Fluxo mássico da parafina depositada.
$M_o$	Peso molecular efetivo do óleo
$M_g$	Peso molecular do gás
$N_u$	Número de Nusselt.
$p$	Pressão média da mistura.
$p_b$	Pressão de Bolha
$p_c$	Pressão crítica
$p_r$	Pressão reduzida
$Pr$	Número de Prandtl.

$q_c$	Fluxo de calor entre o escoamento interno e o exterior.
$Re$	Número de Reynolds.
$R_{ef}$	Número de Reynolds da fase líquida
$R$	Resistência a transferência de calor.
$R_{so}$	Razão de Solubilidade do gás no óleo
$\mathfrak{R}$	Constante universal
$r$	Raio da tubulação.
$S_w$	Perímetro molhado na parede.
$t$	Tempo.
$T$	Temperatura.
$T_c$	Temperatura crítica
$T_r$	Temperatura reduzida
$u$	Energia interna.
$U$	Coeficiente global de transferência de calor.
$V$	Volume
$x$	Coordenadas axial ao longo do duto.
$z$	fator de compressibilidade

#### Símbolos gregos

$\alpha$	Fração volumétrica.
$\beta$	Coeficiente de Expansão Térmica.
$\gamma_g$	Fração molar de gás dissolvido
$\gamma_{gs}$	Fração molar de gás dissolvido na pressão de 100 psig
$\delta$	Espessura do depósito de parafina.
$\varepsilon$	Espessura da tubulação.
$\Theta$	Angulo de Inclinação do duto.
$\mu$	Viscosidade dinâmica.
$v$	Velocidade.
$v_{gs}$	Velocidade superficial de gás.
$v_{gl}$	Velocidade superficial de líquido.
$v_r$	Velocidade relativa entre as fases.
$v_{gj}$	Velocidade relativa entre a fase gasosa e fluxo volumétrico total.

$v_{gm}$	Velocidade entre a fase gasosa e a velocidade média da mistura.
$v_{drift}$	Velocidade de deslizamento.
$\rho$	Massa específica.
$\tau_w$	Tensão cisalhante na parede.
$v_A$	Volume molar
$\phi$	Porosidade.
$\omega_m$	Fração em massa da mistura óleo/parafina.
$\omega_{sol}$	Fração da parafina saturada na interface.

### Subscritos

$g$	<i>fase gasosa</i>
$l$	<i>fase líquida</i>
$m$	<i>mistura de líquido e gás</i>
$o$	<i>óleo</i>
$g$	<i>gás</i>
$w$	<i>água</i>
$in$	<i>interno a tubulação</i>
$ex$	<i>externo a tubulação</i>
$si$	<i>superfície interna do duto</i>
$se$	<i>superfície externa do duto</i>
$std$	<i>Condição padrão</i>
$\infty$	<i>meio externo</i>
$i$	<i>interface parafina-fluido</i>