

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**José Luis Plasencia Cabanillas**

**Deposição de Parafina em escoamento Laminar na  
Presença de Cristais em Suspensão**

**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: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro, Abril de 2006



**José Luis Plasencia Cabanillas**

**Deposição de Parafina em Escoamento Laminar na  
Presença de Cristais em Suspensão**

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

**Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Dr. Geraldo Spinelli Martins Ribeiro**

CENPES/PETROBRAS

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de Abril de 2006

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

**José Luis Plasencia Cabanillas**

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Dpto. de Engenharia Mecânica da UNT (Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo-Perú) em 2002.

Ficha catalográfica

Plasencia Cabanillas, José Luis

Deposição de parafina em escoamento laminar na presença de cristais em suspensão / José Luis Plasencia Cabanillas ; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

128 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Deposição de parafina. 3. Dutos submarinos. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

À minha esposa Sara e  
minha Família.

## Agradecimentos

A Deus por cada novo dia.

Ao meu orientador, Professor Luis Fernando Azevedo por sua dedicação, confiança e amizade concedida ao longo do curso. A Andréa Leiroz pelo constante apoio durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pelos ensinamentos que contribuíram na minha formação. Aos colegas e funcionários pela hospitalidade e apoio.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica dos Fluidos, muito obrigado pela ajuda e amizade.

A todos os amigos que com seu apoio e amizade contribuíram para que minha permanência seja muito agradável.

Finalmente minha gratidão à CAPES e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Plasencia Cabanillas, José Luis; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Deposição de Parafina em escoamento Laminar na Presença de Cristais em Suspensão**. Rio de Janeiro, 2006. 128p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A tendência da produção *offshore* do petróleo é crescente. O transporte do óleo nestes ambientes frios (águas profundas) ocasiona a perda de solubilidade e precipitação das parafinas de alto peso molecular. A deposição de parafinas nas paredes internas das linhas é um problema crítico para o transporte do óleo, causando o bloqueio parcial ou total da linha, um incremento da potência de bombeamento e elevados custos de manutenção que são proporcionais ao aumento da lâmina de água. A pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho revela que ainda existem discordâncias entre os pesquisadores sobre a relevância de cada um dos mecanismos de deposição de parafina conhecidos. O melhor entendimento dos mesmos resultaria em previsões mais acuradas das taxas de deposição que seriam muito importantes para orientar programas de manutenção e o projeto de novas linhas. A filosofia do presente trabalho é realizar experimentos simples, com propriedades de fluido conhecidas e condições de contorno bem controladas procurando um melhor entendimento da importância e relevância de cada um dos mecanismos de deposição. Para este fim, foram realizadas experiências de visualização do fenômeno de deposição para uma mistura de óleo-parafina escoando em regime laminar, submetida a diferentes condições de temperatura. Experiências feitas com cristais de parafina precipitados em suspensão mostraram que é necessário um fluxo de calor negativo para produzir deposição. Para fluxos de calor zero e positivo não foi visualizada deposição alguma. Adicionalmente, para condições de fluxo de calor negativo, foram realizadas medições da evolução temporal da espessura da camada depositada tendo como variáveis, diferentes números de Reynolds e gradientes de temperatura. Os perfis de deposição obtidos das experiências realizadas são informação importante e original que podem ser utilizadas para validação de modelos de simulação numérica.

## Palavras-chave

Deposição de parafina, dutos submarinos.

## Abstract

Plasencia Cabanillas, José Luis; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Wax deposition in Laminar Flow with Suspended Crystals**. Rio de Janeiro, 2006. 128p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

*Offshore* crude oil production is steadily growing. Oil transport in these cold environments (deep water) causes the precipitation of the heavy organic crude oil components like waxes. Wax deposition at the inner wall of pipelines is a serious problem in crude oil transportation causing the partial or total plugging of pipelines, increase in pumping energy and a high cost of maintenance that is proportionally greater as development depth increases. A literature research conducted in the present work leads to the conclusion that the relative importance of the wax deposition mechanisms is still misunderstood. The importance of this knowledge will result in more accurate prediction of paraffin deposition rates that would be very important to sub sea pipelines maintenance and design. The philosophy of this work is to make simple experiments with known fluid properties and well controllable conditions trying to understand the importance and relevance of each known fouling mechanism. Hence, wax deposition experiments were performed in laminar flow for different temperature conditions with a single-phase paraffin-oil mixture, having the particle migration visualization in mind. Experiments with oil mixture injection temperature below the Wax Appearance Point (with wax crystals flowing) have shown that it is necessary a negative heat flux to produce significant deposition. For positive and zero heat fluxes there was no deposition visualized. Also, the unsteady fouling state for negative heat flux was followed and their temporal deposition profiles measured for different Reynolds and temperature conditions. Those temporal and dimensional deposition profiles are original important information to be compared with numerical simulation.

## Keywords

Wax Deposition, Pipelines.

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1 . Introdução  | 18 |
| 2 . Revisão Bibliográfica                                   | 21 |
| 2.1. Características da Parafina                            | 21 |
| 2.2. Temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) | 22 |
| 2.3. Mecanismos de deposição                                | 24 |
| 2.3.1. Difusão molecular                                    | 24 |
| 2.3.2. Difusão Browniana                                    | 25 |
| 2.3.3. Dispersão por cisalhamento                           | 27 |
| 2.3.4. Deposição por efeitos gravitacionais                 | 29 |
| 2.4. Revisão da Literatura                                  | 30 |
| 2.4.1. Hunt, 1962   | 31 |
| 2.4.2. Burger et al., 1981                                  | 32 |
| 2.4.3. Weingarten et al., 1988                              | 34 |
| 2.4.4. Hartley et al., 1989                                 | 36 |
| 2.4.5. Brown et al., 1993                                   | 36 |
| 2.4.6. Hsu et al., 1994                                     | 37 |
| 2.4.7. Hamouda et al., 1995                                 | 38 |
| 2.4.8. Creek et al., 1999                                   | 39 |
| 2.4.9. Leiroz, 2004   | 40 |
| 2.4.10. Todi, 2005  | 42 |
| 2.5. Resultados relevantes                                  | 46 |
| 2.6. Objetivo do Presente Trabalho                          | 48 |
| 3 . Procedimento e Montagem Experimental                    | 49 |
| 3.1. Montagem experimental                                  | 49 |
| 3.2. Procedimento Experimental                              | 63 |
| 4 . Resultados  | 66 |
| 4.1. Validação dos experimentos                             | 66 |
| 4.1.1. Comparação com os Resultados de Leiroz [14]          | 68 |
| 4.1.2. Comparação dos Testes Realizados Com e Sem o Uso do  |    |



|  |     |
|--|-----|
| Sistema de Jatos de Ar   | 74  |
| 4.2. Resultados para Deposição com Fluido Estagnado  | 83  |
| 4.3. Resultados para Deposição sob Escoamento Laminar  | 88  |
| 4.3.1. Resultados para Espessura de Deposição de Parafina –<br>Fluxo de Calor Negativo   | 89  |
| 4.3.2. Resultados sobre a Observação da Movimentação de<br>Cristais de Parafina  | 102 |
| 4.3.3. Resultados para Espessura de Deposição de Parafina –<br>Fluxo de Calor Nulo e Positivo                                    | 110 |
| 4.4. Comparação dos Resultados com o Trabalho de Todi, 2005  | 116 |
| <br>   |     |
| 5 . Conclusões e Comentários   | 120 |
| 5.1. Conclusões  | 120 |
| 5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros  | 121 |
| <br>   |     |
| 6 . Referências Bibliográficas   | 123 |
| <br>   |     |
| A. Apêndice  | 126 |
| A.1. Caracterização das Parafinas  | 126 |
| A.1.1. Determinação da Temperatura Inicial de Aparecimento de<br>Cristais (TIAC) e Variação da viscosidade com a<br>Temperatura. | 126 |
| A.1.2. Determinação da Massa Específica da Mistura Óleo-<br>Parafina como Função da Temperatura                                  | 127 |
| A.2. Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva  | 128 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Arranjo típico de linhas submarinas de transporte de petróleo (Cortesia do CENPES / Petrobras).  | 19 |
| Figura 1.2: Exemplo de uma linha bloqueada por deposição de parafinas (Cortesia do CENPES / Petrobras).  | 19 |
| Figura 2.1: Perfil de concentração de cristais de parafina precipitados devido ao resfriamento da parede [5].  | 26 |
| Figura 2.2: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) o correspondente histograma de probabilidade, para $Re=67$ .   | 28 |
| Figura 2.3: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) o correspondente histograma de probabilidade, para $Re=350$ .  | 28 |
| Figura 2.4: Comparação das taxas de deposição medidas experimentalmente com a previsão das equações propostas [5].   | 34 |
| Figura 2.5: Comparação entre a deposição medida experimentalmente com uma previsão por difusão molecular para baixas taxas de cisalhamento [31].   | 35 |
| Figura 2.6: Comparação entre a deposição medida experimentalmente com uma previsão por difusão molecular para elevadas taxas de cisalhamento ainda em regime laminar [31].   | 35 |
| Figura 2.7: Teste para a avaliação da simetria da camada de parafina depositada nas paredes superior e inferior do canal. Temperatura de entrada $40^{\circ}C$ . Temperatura da parede igual a $15^{\circ}C$ . $Re=580$ . $TIAC$ igual a $36,6^{\circ}C$ [14]. | 42 |
| Figura 2.8: Concentração de cristais suspensos em função do raio da tubulação. $T_e=5^{\circ}C$ , $T_p=0, 5$ e $25^{\circ}C$ [29].   | 43 |
| Figura 3.1: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina em condições de escoamento.   | 50 |
| Figura 3.2: Vistas da montagem do canal com as duas peças de acrílico na entrada e saída.  | 51 |
| Figura 3.3: Vistas de conjunto e explodida do canal.   | 51 |
| Figura 3.4: Vista de frente e detalhe das dimensões do canal.  | 52 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.5: Vista lateral e detalhe das dimensões do canal.   | 53 |
| Figura 3.6: Vista isométrica e lateral do reservatório de armazenamento.  | 54 |
| Figura 3.7: Vista do topo e tampa do reservatório de armazenamento.   | 55 |
| Figura 3.8: Vista isométrica e tampa do reservatório de alumínio.   | 56 |
| Figura 3.9: Vista lateral e de topo do reservatório de alumínio.  | 57 |
| Figura 3.10: Vista superior da seção de testes que mostra o posicionamento da câmera.   | 58 |
| Figura 3.11: Vista esquemática do sistema de aquecimento por jatos de ar utilizado.   | 60 |
| Figura 3.12: Imagem que mostra o posicionamento do sistema por jatos de ar nas paredes de vidro do canal.   | 60 |
| Figura 3.13: Vista lateral do posicionamento dos jatos em ambas paredes de vidro.   | 61 |
| Figura 3.14: Detalhe da disposição dos termopares na parede de vidro do canal.  | 62 |
| Figura 4.1: Esquema das diferentes posições da câmera para cada experiência.  | 68 |
| Figura 4.2: Esquema da disposição do tanque, canal e bomba na seção de testes usada por Leiroz [14].  | 69 |
| Figura 4.3: Teste para avaliar da simetria das camadas de depósito nas paredes superior e inferior do canal ( $Re=863$ ).   | 71 |
| Figura 4.4: Comparação dos testes com os realizados por Leiroz para $Re=368$ .  | 72 |
| Figura 4.5: Comparação dos testes com os realizados por Leiroz para $Re=519$ .  | 73 |
| Figura 4.6: Comparação dos testes com os realizados por Leiroz para $Re=863$ .  | 73 |
| Figura 4.7: Efeito da utilização de aquecimento por jatos na deposição de parafina no interior do canal. (a) Sem deposição de parafina. (b) Depósitos de parafina obtidos sem a utilização de jatos de aquecimento. (c) Depósitos de parafina obtidos com a utilização de jatos de aquecimento. | 76 |
| Figura 4.8: Visão esquemática da seção transversal do canal com depósito gerado para as mesmas condições de resfriamento das paredes de cobre. (a) Formação típica do depósito sem o uso de   |    |

- sistema de jatos por ar. (b) Formação típica do depósito com o uso de sistema de jatos por ar. 77
- Figura 4.9: Teste para avaliar da simetria das camadas de depósito nas paredes superior e inferior do canal, com o uso do sistema de jatos de ar ( $Re=519$ ). 78
- Figura 4.10: Comparação dos testes realizados com e sem jatos de ar ( $Re=368$ ). 79
- Figura 4.11: Comparação dos testes realizados com e sem jatos de ar ( $Re=519$ ). 80
- Figura 4.12: Comparação dos testes realizados com e sem jatos de ar ( $Re=863$ ). 80
- Figura 4.13: Temperaturas ao longo do canal, da linha central da parede de vidro para os testes realizados sem o uso de jatos de ar ( $T_e=40^\circ C$ ,  $T_{ps}=15^\circ C$ ,  $T_{pi}=15^\circ C$ ). 82
- Figura 4.14: Temperaturas ao longo do canal, da linha central da parede de vidro para os testes realizados com o uso de jatos de ar ( $T_e=40^\circ C$ ,  $T_{ps}=15^\circ C$ ,  $T_{pi}=15^\circ C$ ). 82
- Figura 4.15: Seqüência de imagens registrada nos testes de fluido estagnado com  $T_q=45^\circ C$  e  $T_f=5^\circ C$ . (a) Paredes de cobre superior e inferior antes de iniciado o resfriamento. (b) Camada de depósito resultante na parede inferior após 1 minuto. (c) Camada de depósito após 3 minutos. (d) Camada de depósito após 10 minutos. 84
- Figura 4.16: Evolução temporal da espessura de depósito para os testes realizados com fluido estagnado para  $\Delta T = 40^\circ C$ ,  $\Delta T = 30^\circ C$  e  $\Delta T = 20^\circ C$ . TIAC igual a  $36,6^\circ C$ . 85
- Figura 4.17: Detalhe dos primeiros 30 minutos da evolução temporal da espessura do depósito dos testes realizados com fluido estagnado. 86
- Figura 4.18: Evolução dos perfis de temperatura para testes com fluido em cavidade estagnada. 87
- Figura 4.19: Comparação da espessura do depósito em regime permanente (4 horas) para diferentes números de Reynolds ( $\Delta T = 5^\circ C$ ). 92
- Figura 4.20: Temperaturas na linha central da parede de vidro para os testes realizados na presença de cristais em suspensão

|  |     |
|--|-----|
| ( $T_e=34^\circ\text{C}$ , $T_{ps}=35^\circ\text{C}$ , $T_{pi}=29^\circ\text{C}$ ).  | 92  |
| Figura 4.21 - Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ). $Re=151$ .  | 94  |
| Figura 4.22: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ). $Re=213$ .   | 94  |
| Figura 4.23: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ). $Re=354$ .   | 95  |
| Figura 4.24: Taxa de crescimento de depósito para os 10 primeiros minutos dos testes realizados com cristais em suspensão ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ).   | 96  |
| Figura 4.25: Temperaturas na linha central da parede de vidro para os testes realizados na presença de cristais em suspensão ( $T_e=34^\circ\text{C}$ , $T_{ps}=35^\circ\text{C}$ , $T_{pi}=19^\circ\text{C}$ ). | 96  |
| Figura 4.26: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ( $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ ). $Re=151$ .   | 98  |
| Figura 4.27: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ( $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ ). $Re=213$ .   | 99  |
| Figura 4.28: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ( $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ ). $Re=354$ .   | 99  |
| Figura 4.29: Taxa de crescimento de depósito para os 10 primeiros minutos dos testes realizados com cristais em suspensão ( $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ ).   | 100 |
| Figura 4.30: Temperaturas na linha central da parede de vidro para os testes realizados na presença de cristais em suspensão ( $T_e=34^\circ\text{C}$ , $T_{ps}=35^\circ\text{C}$ , $T_{pi}=9^\circ\text{C}$ ).  | 100 |
| Figura 4.31: Região de concentração de cristais perto da parede nos primeiros segundos depois de iniciado o resfriamento.  | 103 |
| Figura 4.32: Seqüência de imagens obtidas na entrada do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com  |     |

|   |     |
|---|-----|
| $T_e=34^{\circ}\text{C}$ , $T_{pi}=9^{\circ}\text{C}$ e $Re=151$ . Aumento utilizado 45x.   | 104 |
| Figura 4.33: Seqüência de imagens obtidas na saída do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=34^{\circ}\text{C}$ , $T_{pi}=9^{\circ}\text{C}$ e $Re=151$ . Aumento utilizado 45x.               | 106 |
| Figura 4.34: Seqüência de imagens obtidas na entrada do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=34^{\circ}\text{C}$ , $T_{pi}=9^{\circ}\text{C}$ e $Re=354$ . Aumento utilizado 45x.             | 108 |
| Figura 4.35: Seqüência de imagens obtidas na saída do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=34^{\circ}\text{C}$ , $T_{pi}=9^{\circ}\text{C}$ e $Re=354$ . Aumento utilizado 45x.               | 109 |
| Figura 4.36: Temperaturas da parte exterior das paredes de vidro geradas pelo aquecimento de ar para as experiências realizadas para condições de fluxo de calor nulo com $T_e=34^{\circ}\text{C}$ e $T_p=35^{\circ}\text{C}$ . | 113 |
| Figura 4.37: Temperaturas da parte exterior das paredes de vidro geradas pelo aquecimento de ar para a experiência realizada para a condição de fluxo de calor nulo com $T_e=32^{\circ}\text{C}$ e $T_p=33^{\circ}\text{C}$ .   | 114 |
| Figura 4.38: Temperaturas da parte exterior das paredes de vidro geradas pelo aquecimento de ar para a experiência realizada para condição de fluxo de calor positivo com $T_e=32^{\circ}\text{C}$ e $T_p=35^{\circ}\text{C}$ . | 116 |
| Figura 4.39: Comportamento da viscosidade com a temperatura do óleo utilizado por Todi comparado com um tipo de petróleo cru [29].  | 118 |
| Figura A.1 - Variação da viscosidade com a temperatura da solução utilizada. TIAC igual a $36,6^{\circ}\text{C}$  | 126 |
| Figura A.2 - Massa específica em função da temperatura da mistura utilizada.  | 127 |

## Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Comparação entre os diferentes métodos de determinação do ponto de névoa [25] - reprodução parcial.                           | 24 |
| Tabela 2.2: Dados das condições em que foram realizadas as experiências em laboratório [5].  | 33 |
| Tabela 2.3: Reprodução parcial dos resultados das experiências realizadas para condições de fluxo de calor nulo, positivo e negativo [29]. | 45 |
| Tabela 2.4: Principais conclusões da revisão bibliográfica realizada.  | 47 |

## Lista de símbolos

|         |   |
|---------|---|
| $A$     | área, $m^2$   |
| $C$     | fração volumétrica da parafina na solução, adimensional |
| $C_w^*$ | fração de partículas sólidas, adimensional              |
| $D$     | coeficiente de difusão, $m^2/s$                         |
| $k^*$   | constante da taxa de deposição, $kg/m^2$                |
| $m$     | massa, kg   |
| $r$     | coordenada radial, m                                    |
| $R$     | raio do duto, m   |
| $Re$    | número de Reynolds                                      |
| $t$     | tempo, s  |
| $T$     | temperatura, $^{\circ}C$                                |
| $TIAC$  | temperatura inicial de aparecimento de cristais         |

## Símbolos Gregos

|          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| $\rho$   | massa específica, $kg/m^3$            |
| $\gamma$ | taxa de cisalhamento na parede, $1/s$ |
| $\Delta$ | diferença                             |
| $\mu$    | viscosidade dinâmica, Pa.s            |



## Subscritos

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| <i>amb</i> | ambiente                 |
| <i>e</i>   | entrada no canal         |
| <i>f</i>   | parede fria              |
| <i>inj</i> | injeção no canal         |
| <i>i</i>   | incorporação de cristais |
| <i>j</i>   | saída do jato            |
| <i>m</i>   | molecular                |
| <i>p</i>   | parede                   |
| <i>pi</i>  | parede inferior          |
| <i>os</i>  | parede superior          |
| <i>q</i>   | parede quente            |
| <i>w</i>   | parafina                 |
| <i>B</i>   | Browniana                |