

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Luis Fernando Palomino Yupa

Estudo Experimental da Deposição de Parafina em Escoamento Turbulento

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro
Setembro de 2010



Luis Fernando Palomino Yupa

Estudo Experimental da Deposição de Parafina em Escoamento Turbulento

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Setembro de 2010

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

Luis Fernando Palomino Yupa

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Dpto. de Engenharia Mecânica da UNSA (Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa-Peru), em 2008.

Ficha Catalográfica

Palomino Yupa, Luis Fernando

Estudo experimental da deposição de parafina em escoamento turbulento / Luis Fernando Palomino Yupa ; orientador: Luiz Fernando Alzuguir Azevedo. – 2010.

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

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Deposição de parafina. 3. Dutos. 4. Escoamento turbulento. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

“Tudo posso naquele que me fortalece”
Filipense 4:13

Agradecimentos

A Deus por cada novo dia.

A minha mãe, pai e irmã por seu amor e apoio incondicional.

A meu professor Luis Fernando Alzuguir Azevedo, meu orientador, pela amizade e enorme paciência que teve comigo durante estes anos.

A meus amigos: Helena, Paula, Leo, Fabio, Guillermo, Bruno, Carlos, Jose, Marco, Darwin pela amizade e pelos bons momentos compartilhados nestes anos.

Agradecimentos em particular ao CNPq, e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro fornecido, sem o qual este trabalho simplesmente não teria sido possível.

Resumo

Palomino Yupa, Luis Fernando; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Estudo Experimental da Deposição de Parafina em Escoamento Turbulento**. Rio de Janeiro, 2010. 100p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais problemas encontrados na produção de petróleo em águas profundas é a deposição de parafina em linhas de produção e transporte. À medida que o óleo escoar pelos dutos, perde calor para o ambiente marinho mais frio, reduzindo a solubilidade dos hidrocarbonetos mais pesados, podendo levar à deposição destes componentes nas paredes do duto. A deposição de parafina pode causar redução da capacidade de produção e até bloqueio total da linha. A capacidade de previsão da variação temporal destes depósitos, assim como a sua distribuição espacial ao longo do duto, são informações relevantes para o projeto e a operação das linhas. Uma revisão atualizada da literatura revela que os mecanismos responsáveis pela deposição de parafina ainda não são bem compreendidos. O presente trabalho faz parte de um programa de pesquisa em andamento voltado para o estudo dos mecanismos de deposição de parafina em dutos. Foram conduzidos experimentos de laboratório onde soluções de parafina e querosene com propriedades conhecidas escoavam por seção de testes especialmente projetada para permitir a medição da variação espacial e temporal da espessura dos depósitos. As medições foram realizadas para regime de escoamento turbulento utilizando um microscópio óptico. Os resultados obtidos mostraram que a espessura de depósito decresce com o aumento do número de Reynolds, sendo inferior aos valores obtidos para a condição de regime laminar. A boa qualidade das visualizações obtidas permitiu observar a remoção de depósito por cisalhamento. Os resultados obtidos estão disponíveis para validar soluções numéricas e auxiliar no entendimento dos mecanismos básicos responsáveis pela deposição de parafina.

Palavras-chave

Deposição de parafina; dutos; escoamento turbulento.

Abstract

Palomino Yupa, Luis Fernando; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Experimental Study Wax Deposition in Turbulent Flow**. Rio de Janeiro, 2010. 100p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the main problems encountered in oil production in deepwaters is the wax deposition in production and transportation lines. As the oil flows in the pipelines, it loses heat to the colder outside environment, reducing its solubility to heavy hydrocarbons, and potentially leading to deposition at the pipe walls. Wax deposition may cause loss of production and even the complete blockage of the line. The ability to predict the spatial and temporal variation of the deposits is relevant to the design and operation of subsea lines. An updated literature review revealed that the mechanisms responsible for wax deposition are still not fully understood. The present work is part of an ongoing research project aimed at studying the mechanisms responsible for wax deposition in pipelines. Laboratory experiments were conducted for turbulent flow of wax and querosene solutions through a specially designed test section that allowed for optical access. An optical microscope was employed for measuring the wax deposit thicknesses which were shown to decrease with increasing Reynolds number. The deposits measured in the turbulent regime were smaller than those for the laminar regime. The good quality of the visualizations obtained allowed the observation of wax deposit removal by shear effects. The experimental results obtained are available for comparison with numerical solutions, what can contribute to the study of the basic mechanisms responsible for wax deposition.

Keywords

Wax Deposition; turbulent flow; pipelines.

Sumário

1. Introdução	19
2. Revisão Bibliográfica	23
2.1. Características da parafina	23
2.2. Temperatura de aparecimento de Cristais (TIAC)	26
2.3. Mecanismos de Deposição	27
2.3.1. Difusão molecular	28
2.3.2. Difusão Browniana	29
2.3.3. Dispersão por Cisalhamento	30
2.3.4. Deposição por Efeitos Gravitacionais	32
2.4. Taxa de Deposição de Parafina	33
2.5. Erosão do Deposito de Parafina por Cisalhamento	35
2.6. Adesão da Camada Depositada.	36
2.7. Envelhecimento e Endurecimento do Deposito	36
2.8. Resultados Relevantes da Bibliografia.	38
3. Procedimento e Montagem Experimental	39
3.1. Montagem experimental	39
3.1.1. Controle e Medição da Temperatura	46
3.1.2. Solução de Parafina	48
3.1.3. Sistema de visualização e processamento de imagens	48
3.2. Procedimento experimental	50
4. Resultados	53
4.1. Resultados de Perfis de Temperatura	53
4.2. Ensaios Preliminares de Deposição de Parafina	58
4.2.1. Calibração das Imagens	58
4.2.2. Determinação do Tempo para Obtenção de Regime Permanente	59
4.2.3. Testes de Simetria do Depósito de Parafina	60
4.2.4. Avaliação da Movimentação das Paredes do Canal	62

4.3. Visualização da Deposição de Parafina sob Escoamento	
Laminar e Turbulento	64
4.4. Resultados Quantitativos para a Deposição de Parafina	79
4.4.1. Espessuras de Depósito de Parafina para Regime Permanente	79
4.4.2. Evolução Espacial e Temporal dos Depósitos de Parafina	82
5 Conclusões	91
6 Referências Bibliográficas	93
Apêndice	97
Apêndice A.1	98
Apêndice A.2	99
Apêndice A.3	100

Lista de Figuras

Figura 1.1: Disposição típica de linhas submarinas de transporte de óleo	19
Figura 1.2: Linha parcialmente bloqueada por deposição de parafina (Cortesia do CENPES/Petrobras)	20
Figura 1.3: Operação de remoção de parafina na plataforma PXA – 3....	21
Figura 2.1: Variação da temperatura de solidificação de parafinas normais <i>versus</i> número de átomos de carbono.....	25
Figura 2.2: Perfil de concentração de cristais de parafina precipitados [Burger <i>et al</i> , 1981].....	30
Figura 2.3: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto (b) histograma de probabilidade, para $Re=67$	32
Figura 2.4: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) histograma de probabilidade, para $Re=350$	32
Figura 2.5: Vista da estrutura do depósito imóvel	37
Figura 3.1: Disposição esquemática da seção de teste	40
Figura 3.2: Ilustração da seção retangular composta de dois blocos de cobre laterais	41
Figura 3.3: Vista isométrica de acrílico e as paredes de cobre no início ..	41
Figura 3.4: Vista isométrica de acrílico e as paredes de cobre no final....	41
Figura 3.5: Desenho da peça de acrílico na saída do canal.....	42
Figura 3.6: Desenho da peça de acrílico na entrada do canal	42
Figura 3.7: Vista isométrica e lateral do reservatório de armazenamento	43
Figura 3.8: Vista do topo e tampa do reservatório de armazenamento....	44
Figura 3.9: Imagem frontal da seção de teste	45
Figura 3.10: Imagem lateral da seção de teste	46
Figura 3.11: Diagrama da localização dos termopares	47
Figura 3.12: Imagem da disposição dos termopares na seção de teste ..	47
Figura 3.13: Imagem da mistura parafina-querosene.....	48
Figura 3.14: Microscópio posicionado sob a seção de teste	49

Figura 3.15: Processamento com o programa de computador Axiovision Rel 4.4.da Zeiss	50
Figura 3.16: Ilustração das posições de visualização das espessuras de depósito ao longo do canal.....	52
Figura 4.1: Evolução temporal do perfil axial de temperatura da parede interna do canal, para regime laminar com $Re=1660$	55
Figura 4.2: Teste de repetibilidade do processo de resfriamento da parede do canal. Resultados de 17 replicações dos experimentos para perfis de temperatura após 2 minutos do início do resfriamento. Regime de escoamento laminar, $Re = 1660$..	57
Figura 4.3: Comparação dos perfis de temperatura ao longo da parede do canal após 2 minutos do início do resfriamento para escoamento laminar ($Re = 1660$) e turbulento ($Re = 6900$). Barras verticais representam o espalhamento obtido na replicação de 17 experimentos.....	57
Figura 4.4: Variação temporal da espessura do depósito de parafina para uma posição axial no meio do canal para diferentes valores do número de Reynolds. Teste para a determinação do tempo necessário para a obtenção da condição de regime permanente na espessura do depósito de parafina.....	60
Figura 4.5: Testes para a verificação da simetria da distribuição de temperatura e espessura de depósito ao longo do canal. Resultados de regime permanente para $Re=5650$, $T_f= 40^{\circ}C$ e $T_p= 15^{\circ}C$..	61
Figura 4.6: Testes para a verificação da simetria dos depósitos de parafina. Resultados da obtidos para a condição de regime permanente, com $Re=5650$, temperatura de entrada $T_e = 40^{\circ}C$ e temperatura das paredes, $T_p = 15^{\circ}C$	62
Figura 4.7: Deslocamentos transversais da parede de cobre devido ao resfriamento da parede como função do tempo contado do início do resfriamento. Teste para regime laminar com $Re=1660$, para três posições longitudinais do canal: início, meio e fim do canal. Temperatura de entrada do querosene a $40^{\circ}C$ e temperatura final de resfriamento da parede igual a $15^{\circ}C$..	63

Figura 4.8: Vista esquemática das posições das regiões de observação com microscópio ao longo do canal (reprodução da Figura 3.16).....	65
Figura 4.9: Visão esquemática da seção transversal do canal indicando a formação de depósito de parafina nas faces internas das paredes de vidro..	66
Figura 4.10: Região de concentração de cristais perto da parede nos primeiros segundos depois de iniciado o resfriamento.....	67
Figura 4.11: Seqüência de imagens obtidas na região de entrada do canal, mostrando a evolução temporal e espacial do depósito para o teste com $T_e=40^{\circ}\text{C}$, $T_{pi}=15^{\circ}\text{C}$ e $Re=1660$. O aumento utilizado foi 32x. As imagens foram obtidas nas posições axiais 1, 2 e 3, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento..	69
Figura 4.12: Seqüência de imagens obtidas na região de saída do canal, mostrando a evolução temporal e espacial do depósito para o teste com $T_e=40^{\circ}\text{C}$, $T_{pi}=15^{\circ}\text{C}$ e $Re=1660$. O aumento utilizado foi 32x. As imagens foram obtidas nas posições axiais 22, 23 e 24, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento..	72
Figura 4.13: Seqüência de imagens obtidas na região de entrada do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^{\circ}\text{C}$, $T_{pi}=15^{\circ}\text{C}$ e $Re=6900$. O aumento utilizado foi 32x. As imagens foram obtidas nas posições axiais 1, 2 e 3, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento..	74
Figura 4.14: Seqüência de imagens obtidas na região de saída do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^{\circ}\text{C}$, $T_{pi}=15^{\circ}\text{C}$ e $Re=6900$. O aumento utilizado foi 50x. As imagens foram obtidas nas posições axiais 22, 23 e 24, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados	

após o início do resfriamento.	75
Figura 4.15: Seqüência de imagens obtidas na metade do canal, posição 16, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=1660$. Aumento utilizado de 32x. (a) 0 minutos, (b) 2 minutos, (c) 4 minutos, (d) 6 minutos, (e) 8 minutos, (f) 10 minutos, (g) 12 minutos, e (h) 14 minutos.....	77
Figura 4.16: Seqüência de imagens obtidas na metade do canal, posição 16, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=6900$. O aumento utilizado foi 50x. (a) 0 minuto, (b) 2 minutos, (c) 4 minutos, (d) 6 minutos, (e) 8 minutos, (f) 10 minutos, (g) 12 minutos, e (h) 14 minutos	78
Figura 4.17: Distribuição espacial da espessura de depósito de parafina para regime permanente (150 min.) e diferentes números de Reynolds. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_p=15^\circ\text{C}$ e $TIAC = 28,7^\circ\text{C}$	81
Figura 4.18: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento laminar para $Re=1660$. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_p=15^\circ\text{C}$ e $TIAC = 28,7^\circ\text{C}$	83
Figura 4.19: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 1660, para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 min. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$	84
Figura 4.20: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento turbulento para Reynolds igual 4400. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$	85
Figura 4.21: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 4400 para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 min após do início da experiência. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$	86
Figura 4.22: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento turbulento para Reynolds igual 5650. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$	87
Figura 4.23: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 5650 para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos após do início da experiência. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$	87

Figura 4.24: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento turbulento para Reynolds igual 6900.

Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$ 89

Figura 4.25: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 6900 para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos após do início da experiência.

Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$ e $T_p=15^\circ\text{C}$ 89

Figura 4.26: Taxa de crescimento de depósito para uma posição no meio do canal, como função do número de Reynolds.

Resultados para os 10 primeiros minutos dos testes 90

Figura 4.27: Taxa de crescimento de depósito para uma posição no meio do canal, como função do número de Reynolds.

Resultados para os 30 primeiros minutos dos testes. 90

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Características físicas de algumas parafinas normalmente encontradas no petróleo....	Erro! Indicador não definido.	24
Tabela 2.2 – Comparação entre diferentes técnicas na determinação de TIAC. Plasencia et al. [20] - Reprodução parcial. ...		27

Lista de símbolos

A	área	$[m^2]$
C	fração volumétrica da parafina na solução	$[-]$
c_p	fração de partículas solidas	$[-]$
c_v	coeficiente de difusão	$[m^2/s]$
\bar{c}_r	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	$[^{\circ}C]$

Símbolos gregos

ΔT	diferença de temperatura	[°C; K]
ΔP	queda de pressão	[kPa]
μ	viscosidade	[N s m ⁻²]
ρ	massa específica	[kg.m ⁻³]
γ	taxa de cisalhamento na parede.	[s ⁻¹]

Subscritos

amb	ambiente
e	entrada no canal
p	parede
B	Browniana