



**Rafael Camel Albagli**

## **Deposição de parafina em escoamentos turbulentos**

### **Dissertação de Mestrado**

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

Orientadora: Profa. Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro  
Março de 2017



**Rafael Camel Albagli**

## **Deposição de parafina em escoamentos turbulentos**

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**

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Rafael Mendes**

Petrobras

**Dra. Luciana Boher e Souza**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de Março de 2017

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

## Rafael Camel Albagli

Graduou-se em Engenharia Eletrônica e de Computação na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2008. Ingressou na Petrobras no mesmo ano, onde exerce função referente ao planejamento e controle das operações de teste de formação desde seu ingresso.

### Ficha Catalográfica

Albagli, Rafael Camel

Deposição de parafina em escoamentos turbulentos / Rafael Camel Albagli; orientadora: Angela Ourivio Nieckele – 2017.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Garantia de escoamento. 3. Deposição de parafina. 4. Modelo Entalpia-Porosidade. 5. M Turbulência. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus pais para quem a educação sempre foi o bem mais valioso e para minha  
esposa cuja parceria permite a construção de todos os sonhos.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por poder exercer as minhas faculdades na plenitude.

Agradeço a minha orientadora Professora Angela Nieckele pela sua atenção e presteza em todas as etapas deste trabalho.

A Luciana Boher Souza por suas explicações sobre o modelo entalpia-porosidade original e sua solução numérica.

A minha antiga chefe Carolina Vaillant por ter me indicado para o programa de Mestrado da Petrobras, permitindo que eu desenvolvesse talentos que já havia esquecido que tinha.

Ao meu chefe atual, Igor Duarte, por confiar que seria possível concluir o mestrado enquanto estruturávamos o projeto especializado de completação e avaliação.

Aos meus colegas de trabalho que me auxiliaram e dividiram o dia-dia, permitindo que este projeto pudesse se finalizar.

A Petróleo Brasileiro S.A. pela oportunidade enriquecedora.

## Resumo

Albagli, Rafael Camel; Nieckele, Angela Ourivio. **Deposição de parafina em escoamentos turbulentos**. Rio de Janeiro, 2017. 135p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A deposição de parafina é um fenômeno presente nos sistemas de produção de petróleo (principalmente em águas profundas devido às baixas temperaturas), consistindo na aderência de frações sólidas de hidrocarbonetos nas colunas e linhas, conduzindo à redução da área aberta ao fluxo até o eventual bloqueio. A compreensão dos mecanismos que influenciam na deposição ainda não foi totalmente alcançada. Dada a relevância deste tipo de sistema para o desenvolvimento de novos campos e a ausência de uma teoria consolidada que seja capaz de explicar a evolução e as características do depósito, a limitação de produção por este fenômeno é um dos principais problemas de garantia de escoamento. Visando a aumentar o conhecimento acerca dos fenômenos existentes no processo de deposição, e identificar os mecanismos dominantes, diferentes modelos matemáticos podem ser confrontados com dados experimentais. Geralmente, os escoamentos encontrados ao longo das linhas de produção encontram-se no regime turbulento. Dessa forma, no presente trabalho, desenvolveu-se um modelo de turbulência de duas equações  $\kappa-\omega$ , acoplado com o modelo entalpia-porosidade, no qual o depósito é considerado um meio poroso. A partir de um equilíbrio termodinâmico determinam-se as espécies que saem de solução e a sua distribuição é determinada pela equação de conservação molar. As equações de conservação foram resolvidas pelo método de volumes finitos, utilizando o esquema Power-law e Euler implícito para as discretizações espacial e temporal. Comparações com dados experimentais em um duto anular foram realizadas, apresentando boa concordância para o regime permanente, mas superestimando a espessura do depósito durante o regime transiente. Constatou-se redução de espessura do depósito com o aumento do número de Reynolds.

## Palavras-chaves

Garantia de Escoamento; Deposição de Parafina; Modelo Entalpia-Porosidade; Turbulência.

## Abstract

Albagli, Rafael Camel; Nieckele, Angela Ourivio (Advisor). **Wax deposition in turbulent flow**. Rio de Janeiro, 2017. 135p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Wax deposition is a phenomenon present in oil production systems (mainly in deep water due to the low temperatures), which consists in the adhesion of solids fractions of hydrocarbon to tubing and lines, reducing the area opened to flow until be completely blocked. The comprehension of the mechanisms that influences in the deposition has not yet been fully achieved. Given the relevance of this kind of system in new fields' development and the absence of a theory able to explain the deposit's evolution and characteristics, the production limitation caused by this phenomenon is one of the main issues in flow assurance. Aiming to expand the knowledge about the phenomena that exist in deposition process and identify dominant mechanisms, different mathematical models can be compared with experimental data. The flow regime in production lines is usually turbulent. Thus, in this work, a two equation  $\kappa$ - $\omega$  turbulence model coupled to the enthalpy-porosity model, where the deposit is a porous media, was developed. From a thermodynamic equilibrium, the species that comes out of solution are determined while their distribution are determined by each molar conservation equation. The conservations equations were solved with the finite volume method, employing the Power-law and implicit Euler schemes to handle the spatial and temporal discretization. Comparisons with experimental data in an annular duct were realized, showing good agreement in the steady state. The deposit thickness, however, was overestimated during the transient. The deposit thickness reduction with the Reynold number increase was verified.

## Keywords

Flow Assurance; Wax Deposition; Enthalpy-Porosity Model, Turbulence.

# Sumário

1	Introdução	21
1.1	Parafina: Definições e Propriedades	21
1.2	Deposição de Parafinas em Linhas de Produção	22
1.3	Deposição de Parafinas em Testes de Formação a Poço Revestido	23
1.4	Modelagem do Fenômeno de Deposição	25
1.5	Objetivo	26
1.6	Descrição da Montagem Experimental	27
1.7	Organização do Trabalho	29
2	Revisão Bibliográfica	30
2.1	Deposição de parafina no regime turbulento	33
3	Modelo Matemático	39
3.1	Modelo Entalpia-Porosidade	39
3.1.1	Conservação de massa	40
3.1.2	Conservação de quantidade de movimento linear	41
3.1.3	Conservação de energia	43
3.1.4	Conservação molar das espécies	45
3.1.5	Conservação molar total	46
3.2	Modelagem da viscosidade turbulenta	47
3.3	Condições de Contorno e Inicial	52
3.3.1	Condição Inicial	56
3.4	Propriedades Termofísicas	56
3.4.1	Massa Específica	57
3.4.2	Viscosidade Molecular	58
3.4.3	Condutividade Térmica	59
3.4.4	Calor Específico à Pressão Constante	60

3.4.5 Coeficientes de Difusão Molecular	61
3.5 Equilíbrio Termodinâmico	61
3.5.1 Saturação de Sólidos	63
4 Método Numérico	64
4.1 Discretização das Equações de Conservação	65
4.1.1 Discretização das grandezas auxiliares	68
4.2 Convergência	68
4.3 Algoritmo de Solução	69
5 Resultados	72
5.1 Comparação com dados experimentais	74
5.2 Influência do Número de Reynolds no Regime Permanente	77
5.3 Análise do Escoamento Durante o Regime Transiente para $Re = 3500$	86
6 Conclusão	93
6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros	95
Referências bibliográficas	97
A Apêndices	103
A.1 Propriedades dos Componentes dos Fluidos	103
A1.1 Parafina dissolvida em querosene	103
A1.2 Fluido Puro	105
A.2 Validação	107
A2.1 Caso 1 – escoamento no regime laminar sem deposição	107
A2.2 Caso 2 – escoamento no regime turbulento sem deposição	110
A2.3 Caso 3 – escoamento no regime laminar com deposição	115
A3 Testes de Malha e de Passo de Tempo	118
A3.1 Teste de Malha	118
A3.1.1 Refino da Malha em Ambos os Eixos	120
A3.1.2 Refino do Malha no Eixo Radial	120

A3.1.3 Refino da Malha no Eixo Axial	124
A3.1.4 Influência da Malha do Acrílico	125
A3.1.5 Confirmação da distância adimensional da parede	126
A3.2 Teste de Passo de Tempo	126
A3.2.1 Passo de Tempo para o Regime Laminar	127
A3.3.2 Passo de Tempo para o Regime Turbulento	129
A3.3 Teste de Malha e Passo de Tempo para o Ensaio com Fluido Puro	130
A4 Demonstração das equações de $\kappa$ e $\omega$ para meio poroso	133

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Evolução dos eventos de obstrução de linhas por deposição de parafinas e formação de hidratos no Golfo do México.	23
Figura 1.2 - Foto de parafina depositada em árvore submarina de teste.	25
Figura 1.3 – Desenho de montagem anular para deposição de parafina.	27
Figura 1.4 – Componente principal da seção de testes anular.	27
Figura 1.5 – Depósito virtual de 1,5 mm de espessura na seção anular.	28
Figura 2.1 – Depósitos de parafina para três posições axiais no início do canal. $T_{in} = 40^{\circ}C$ , $T_w = 15^{\circ}C$ (a) 0 min (b) 1 min (c) 30 min. $Re = 660$ e $Re = 6000$ .	36
Figura 2.2 – Distribuição espacial da espessura dos depósitos de parafina para regime permanente referente aos números de Reynolds ensaiados. $Re = 660, 2019, 6000$ . Solução de querosene com parafina a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$ , $T_w = 15^{\circ}C$ .	36
Figura 2.3 – Comparação das espessuras em $x/L = 0,8$ dos depósitos experimentais e numéricos. $Re = 660$ e $2019$ . Considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$ , $T_w = 15^{\circ}C$ .	37
Figura 3.1 – Representação esquemática de uma variável genérica $\phi$ em função do tempo demonstrando seu valor médio e flutuação.	40
Figura 3.2 – Esquema da seção de testes.	53
Figura 4.1 – Distribuição da malha e nomenclatura dos pontos.	65
Figura 4.2 – Fluxograma de solução.	71
Figura 5.1 – Variação da temperatura da parede de cobre com o	75

tempo, $T_s(t)$ . Ensaio com fluido puro e $Re = 4098$ .	
Figura 5.2 – Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede de cobre após 1 min e 2 min de resfriamento. Comparação dos modelos de turbulência I e II com dados experimentais.	76
Figura 5.3 –Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede de cobre após 1 min, 2 min, 10 min e 1 h de resfriamento. Comparação do modelo de turbulência III com dados experimentais.	77
Figura 5.4 – Variação da temperatura da parede de cobre com o tempo $T(s)$ . Querosene com parafina a 20%.	79
Figura 5.5 – Espessura do depósito para regime permanente. $Re = 1260, 3500$ e $6000$ .	80
Figura 5.6 – Campo de temperatura para regime permanente. $Re = 1260, 3500$ e $6000$ .	80
Figura 5.7 – Perfil de saturação de sólido para regime permanente. $Re = 1260, 3500$ e $6000$ .	81
Figura 5.8 – Campo de concentração das espécies 3, 6, 9 e 12 para ensaios com número de Reynolds 1260, 3500 e 6000.	82
Figura 5.9 – Perfil radial do componente axial de velocidade em $z/L = 0,6$ . Regime permanente. $Re = 1260, 3500$ e $6000$ .	83
Figura 5.10 – Perfil radial de temperatura para regime permanente. $Re=1260, 3500$ e $6000$ .	84
Figura 5.11 – Campo de energia cinética turbulenta expressa em $(m/s)^2$ para os ensaios com número de Reynolds 3500 e 6000.	85
Figura 5.12 – Campo da dissipação específica expressa em $1/s$ . Regime permanente, $Re = 3500$ e $6000$ .	86
Figura 5.13 – Perfil da energia cinética turbulenta e dissipação específica em $z/L=0,6$ . Regime permanente. $Re = 3500$ .	86
Figura 5.14 – Evolução da espessura do depósito com o tempo. $Re=3500$ .	87
Figura 5.15 – Evolução do envelhecimento do depósito. Campo de saturação de sólido. $Re=3500$ .	89

Figura 5.16 – Evolução temporal da concentração da espécie 3.	90
Figura 5.17 – Evolução temporal da concentração da espécie 6.	90
Figura 5.18 – Evolução temporal da concentração da espécie 12.	90
Figura 5.19 – Evolução temporal da velocidade na coordenada $z/L = 0,6$ para três instantes de tempo.	91
Figura 5.20 – Evolução temporal da temperatura na coordenada $z/L = 0,6$ para três instantes de tempo.	91
Figura 5.21 – Evolução temporal da energia cinética turbulenta.	92
Figura 5.22 – Evolução temporal da dissipação específica.	92
Figura A2.1 – Desenvolvimento da tensão cisalhante nas paredes da seção anular.	109
Figura A2.2 – Comparação dos perfis numérico e analítico de velocidade hidrodinamicamente desenvolvida na seção anular. Regime laminar.	109
Figura A2.3 – Comparação dos perfis numérico e analítico da tensão cisalhante hidrodinamicamente desenvolvida na seção anular ( $z/L = 0,7$ ). Regime laminar.	110
Figura A2.4 – Comparação do perfil radial do componente de velocidade axial $u_z$ em $z = 0,5m$ com FLUENT.	111
Figura A2.5 – Comparação do perfil radial da energia cinética turbulenta $\kappa$ em $z = 0,5m$ com FLUENT.	112
Figura A2.6 – Comparação do perfil radial da dissipação específica $\omega$ em $z = 0,5m$ com FLUENT.	112
Figura A2.7 – Comparação do perfil radial da temperatura $T$ com FLUENT. (a) $z/L=0,25$ (b) $z/L=0,5$ .	113
Figura A2.8 – Comparação do perfil axial do componente de velocidade axial $u$ em $r/R = 0,84$ m com FLUENT.	113
Figura A2.9 – Comparação do perfil radial do componente de velocidade axial $u$ em $r/R = 0,84$ com FLUENT.	114
Figura A2.10 – Perfil da energia cinética turbulenta $\kappa$ em $r/R = 0,84$ obtida pelo FLUENT e pelo modelo entalpia-porosidade.	114
Figura A2.11 – Perfil da dissipação específica $\omega$ em $r/R = 0,84$ obtida pelo FLUENT e pelo modelo entalpia-porosidade.	114

Figura A2.12 – Perfil axial de temperatura em $r/R = 0,84$ obtida pelo FLUENT e pelo modelo entalpia-porosidade.	115
Figura A2.13 – Comparação numérica versus experimental da espessura na seção de teste anular, com parafina dissolvida em querosene, $Re=1260$ .	116
Figura A3.1 – Malha computacional representando a seção de teste anular.	118
Figura A3.2 – Influência do refino simultâneo radial e axial na espessura do depósito para diferentes instantes de tempo.	122
Figura A3.3 – Influência do refino radial na espessura do depósito para $t = 30s$ .	123
Figura A3.4 – Espessura do depósito em 25%, 50% e 75% do domínio aos 30s de resfriamento conforme se refina a malha no sentido radial.	123
Figura A3.5 – Influência do refino axial na espessura do depósito para $t= 30s$ .	124
Figura A3.6 – Influência da não uniformidade da malha na região doacrílico na espessura do depósito para $t = 30s$ número de volumes: $77 \times 92$ .	125
Figura A3.7 – Influência da não uniformidade da malha na região doacrílico na espessura do depósito para $t = 30s$ número de volumes: $114 \times 62$ .	126
Figura A3.8 – Distância adimensional da parede interna e externa no regime permanente.	127
Figura A3.9 – Influência do passo de tempo na espessura do depósito para $t = 30s$ .	128
Figura A3.10 – Resultado da espessura do depósito em dadas posições do canal para diversos passos de tempo.	129
Figura A3.11 – Curvas de espessura de depósito após 30s de resfriamento para diversos passos de tempo.	130
Figura A3.12 – Resultado da espessura do depósito em 3 posições fixas para com valores de passo de tempo distintos adotados na solução numérico.	130

Figura A3.13 – Teste de malha para o ensaio com fluido puro.  $\Delta t = 0,01$  s. 131

Figura A3.14 – Teste de passo de tempo para o ensaio com fluido puro. Malha 77x62. 132

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Resumo das condições de contorno	56
Tabela 4.1 – Coeficientes de difusão e termos de fontes	66
Tabela 4.2 – Coeficientes de difusão e termos de fontes das grandezas turbulentas	67
Tabela 5.1 – Dimensões da bancada de ensaios	72
Tabela 5.2 – Condição de contorno na entrada	78
Tabela A1.1 – Propriedades da composição do querosene a 20% considerando doze pseudocomponentes	103
Tabela A1.2 – Coeficientes da equação (3.104) para a entalpia molar de gás ideal	104
Tabela A1.3 – Coeficientes das equações da correlação de Bahadori & Mokhatab (2008)	105
Tabela A1.4 – Composição do fluido puro e propriedades de seus constituintes	105
Tabela A1.5 – Coeficientes da equação (3.105) para a entalpia molar de gás ideal.	106
Tabela A2.1 – Propriedades consideradas para os fluidos	110
Tabela A3.1 – Testes de Malha Realizados	120
Tabela A3.2 – Courant correspondente a cada teste de passo de tempo realizado	127
Tabela A3.3 – Courant correspondente a cada teste de passo de tempo realizado para fluxo em regime turbulento	130

## Lista de Símbolos

$A$	parâmetro da PR-EOS
$a_i$	parâmetro $a$ da PR-EOS para o componente $i$
$a_m$	parâmetro $a$ de mistura da PR-EOS
$A_t$	área transversal da seção de teste
$B$	parâmetro da PR-EOS
$b_i$	parâmetro $b$ da PR-EOS para o componente $i$
$b_m$	parâmetro $b$ de mistura da PR-EOS
$c_j$	concentração molar da mistura na fase $j$
$c_{j,i}$	concentração molar do componente $i$ na fase $j$
$Co$	número de Courant
$C_p$	calor específico a pressão constante
$\Delta C_{p_i}$	calor específico de fusão
$D_M$	coeficiente de difusão molecular
$D_h$	diâmetro hidráulico
$e_{acr}$	espessura do acrílico
$f_{j,i}$	fugacidade do componente $i$ na fase $j$
$f_{j,i}^{puro}$	fugacidade do componente $i$ puro na fase $j$
$H$	Entalpia
$H^*$	entalpia de gás ideal
$\Delta H^f$	entalpia de fusão
$I_{turb}$	Intensidade turbulenta
$K$	condutividade térmica
$K_{so}$	condutividade térmica do meio poroso
$K_{ef}$	condutividade térmica efetiva
$K$	permeabilidade efetiva do meio
$k_{i,j}$	parâmetro de interação binária entre os componentes $i$ e $j$
$k_s$	rugosidade da superfície
$L$	comprimento da seção de teste
$M$	peso molecular
$m$	massa
$m_i$	parâmetro da PR-EOS

$n$	número de componentes (ou espécies)
$N_{C,i}$	número de carbonos do componente $i$
$n_{j,i}$	fração molar do componente $i$ na fase $j$
$P$	Pressão
$P_c$	pressão crítica
$P_m$	perímetro molhado
$P_r$	número de Prandtl
$R$	constante universal dos gases perfeitos
$R_{in}$	raio interno
$R_{ex}$	raio externo
$r,z$	coordenadas cilíndricas radial e axial
$Re$	número de Reynolds
$S_c$	número de Schmidt
$S_{ij}$	tensor taxa de deformação
$S_j$	fração volumétrica da fase $j$ (ou saturação da fase $j$ )
$S_o$	fração volumétrica da fase líquida (porosidade)
$T$	temperatura
$T_s(t)$	temperatura da parede de cobre (fria)
$t$	tempo
$\Delta t$	passo de tempo
$T_c$	temperatura crítica
$T^f$	temperatura de fusão
$V$	volume
$\dot{V}$	vazão volumétrica
$\mathbf{u}$	vetor velocidade
$u^*$	velocidade de atrito
$v_c$	volume molar crítico
$x_{j,i}$	composição molar do componente $i$ na fase $j$
$w$	fator acêntrico
$Z$	fator de compressibilidade
$z_i$	composição de alimentação (fração molar total do componente $i$ no sistema)

## Símbolos gregos

$\alpha_i$	parâmetro da PR-EOS para o componente i
$\Gamma$	coeficiente de difusão na equação geral de conservação
$\delta$	espessura do depósito de parafina
$\kappa$	energia cinética turbulenta
$\mu$	viscosidade molecular
$\mu_T$	viscosidade turbulenta
$\rho$	massa específica
$\tau$	tensor das tensões
$\phi$	variável dependente na equação geral de conservação
$\omega$	dissipação específica

## Abreviaturas

NCC	Número de Carbono Crítico
PR-EOS	equação de estado cúbica de Peng-Robinson
TDMA	algoritmo matricial tridiagonal
TIAC	Temperatura de Início de Aparecimento de Cristais
WDT	<i>Wax Disappearance Temperature</i>

## Subscritos e Superescritos

–	média temporal
'	flutuação estatística
+	adimensional
in	entrada da seção de teste
r	componente radial
z	componente axial
o	fase líquida (ou fase óleo)
s	fase sólida
T	parcela turbulenta
n, s, e, w	faces dos volumes de controle
P, N, S, E, W	pontos nodais do domínio computacional

*Então Einstein estava errado quando disse: "Deus não joga aos dados". A consideração dos buracos negros sugere não apenas que Deus joga aos dados, como que às vezes nos confunde, jogando-os onde eles não podem ser vistos.*

Stephen Hawking