



Luciana Boher e Souza

**Deposição de parafina em linhas de petróleo.
Estudo numérico e experimental**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Angela Ourivio Nieckele

Co-Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro
Setembro de 2014



Luciana Boher e Souza

Deposição de parafina em linhas de petróleo.

Estudo numérico e experimental

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

Instituto Sintef do Brasil

Prof. Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Daniel Merino Garcia

REPSOL

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2014

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

Luciana Boher e Souza

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Instituto Politécnico – Campus Regional da Universidade do Estado do Rio de Janeiro em Nova Friburgo (IPRJ - UERJ) em 2005. Concluiu o Mestrado em Engenharia Nuclear no Instituto Militar de Engenharia (IME – Rio de Janeiro) em 2008, na área de Controle Ambiental.

Ficha Catalográfica

Souza, Luciana Boher e

Deposição de parafina em linhas de petróleo. Estudo numérico e experimental / Luciana Boher e Souza ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele ; co-orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo. – 2014.

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

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Garantia de escoamento. 3. Deposição de parafina. 4. Escoamentos laminar e turbulento. 5. Modelo termodinâmico de fases multisólidas. 6. Difusão molecular. 7. Efeito Soret. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

À minha família e a todos
que sempre me apoiaram

Agradecimentos

Agradeço a Deus as bênçãos recebidas todos os dias, e a oportunidade de aqui estar, aprendendo e evoluindo a cada momento.

Agradeço a minha orientadora Professora Angela Nieckele a sua dedicação para a realização deste trabalho, em especial suas grandes habilidades e empenho no estudo numérico da tese, e a sua paciência e inestimável confiança.

Ao meu orientador Professor Luis Fernando Azevedo a liderança e a grande dedicação para a realização deste trabalho, e o imenso apoio ao longo do curso.

Ao Carlos Frederico o apoio e os auxílios sempre presentes e essenciais.

Aos meus amigos Marilyn e Andres, companheiros durante bons anos deste curso.

A todos os meus colegas do laboratório da PUC-Rio que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço, em especial, a Helena Maria a sua amizade e a enorme dedicação ao projeto experimental desta tese.

Agradeço ao Felipe Fleming a grande e fundamental contribuição para esse estudo.

Ao Luis Renato Minchola a parceria nos trabalhos ao longo do doutorado.

Aos membros da Comissão Examinadora a disponibilidade e o conhecimento para analisar a tese.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio a ajuda e os ensinamentos.

Ao CNPq o suporte financeiro concedido durante o curso de doutorado e a PUC-Rio a infraestrutura, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Souza, Luciana Boher; Nieckele, Angela Ourivio; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Deposição de parafina em linhas de petróleo. Estudo numérico e experimental.** Rio de Janeiro, 2014. 220p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Parafinas de alto peso molecular presentes no petróleo escoando em ambientes de baixa temperatura cristalizam-se e depositam-se nas paredes internas dos dutos, ocasionando a redução da taxa de escoamento e o aumento do custo de produção, podendo levar até mesmo ao bloqueio das linhas de transporte. O processo de deposição é complexo e envolve conhecimento multidisciplinar, de modo que diferentes abordagens têm sido propostas para a sua modelagem. O principal objetivo deste trabalho foi investigar o fenômeno de deposição de parafina em uma geometria simples, com condições bem controladas, utilizando uma abordagem numérica e experimental, com foco no melhor entendimento dos mecanismos que induzem a deposição, a formação dos depósitos e seu envelhecimento. Experimentalmente, foram conduzidos testes com fluidos de laboratório que permitiam a visualização e a medição da evolução espacial e temporal de depósitos de parafina formados sob escoamentos laminar e turbulento. Numericamente, foi desenvolvido um modelo multicomponente para escoamento laminar, chamado de entalpia-porosidade. Tanto a espessura quanto a composição do depósito foram determinadas através de um modelo termodinâmico acoplado às equações de conservação de massa, de quantidade de movimento linear, de energia e de espécies. Os resultados indicaram que o efeito Soret não influencia a deposição de parafina. A espessura do depósito foi bem avaliada numericamente para regime permanente, apresentando diferenças na sua evolução temporal. O modelo composicional desenvolvido fornece importantes dados além da espessura depositada, como a temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) e o número de carbono crítico (NCC) do sistema, ampliando a previsão do processo de deposição com informações sobre a composição e o

envelhecimento do depósito. As investigações numéricas mostraram que maiores taxas de cisalhamento e temperaturas da parede resultam em depósitos menos espessos. Mostrou-se também que maiores taxas de cisalhamento resultam em depósitos mais densos, e que maiores temperaturas da parede tendem a aumentar a saturação de sólido na região intermediária do depósito.

Palavras-chaves

Garantia de Escoamento; Deposição de Parafina; Escoamentos Laminar e Turbulento; Modelo Termodinâmico de Fases Multisólidas; Difusão Molecular; Efeito Soret.

Abstract

Souza, Luciana Boher; Nieckele, Angela Ourivio; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Wax deposition in pipelines. Numerical and experimental study.** Rio de Janeiro, 2014. 220p. Ph.D. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

High molecular weight paraffins crystallize and deposit on the inner walls of production lines and oil pipelines operating in cold environments, causing reductions in flow rate, increase of the production cost, or even the total blockage of the transport lines. Wax deposition is a complex process involving multidisciplinary knowledge, so that different approaches have been proposed for its modeling. The primary purpose of this work was to investigate the wax deposition process in a simple geometry under well-controlled conditions, using a numerical and experimental approach, focusing on a better understanding of the phenomena controlling the wax deposition, the formation of the deposit and its aging. Controlled experiments were conducted using laboratory solutions which allowed visualization and measurement of the spatial and temporal evolution of wax deposits under laminar and turbulent flows. A multicomponent model for laminar flow, called enthalpy-porosity, was developed. The thickness and composition of the deposit were determined by a thermodynamic model coupled with conservation equations of mass, linear momentum, energy and species. The results indicated that the Soret effect does not contribute to wax deposition. The thickness of the deposit was well predicted by the numerical model for steady state, presenting, however, differences in its temporal evolution. The multicomponent model developed provides valuable information in addition to the deposited thickness, such as the wax appearance temperature (WAT) and the critical carbon number (CCN) of the wax-oil system. These are relevant information for the prediction of the deposit composition and the aging process. The numerical results demonstrated that higher flow rates and wall temperatures lead to thinner deposits. It was also shown that the deposit wax content is higher

for higher shear rates, while higher wall temperatures lead to higher solid content in the intermediate region of the deposit.

Keywords

Flow Assurance; Wax Deposition; Laminar and Turbulent Flow; Multisolid-phase Thermodynamic Model; Molecular Diffusion; Soret Effect.

Sumário

1 Introdução	26
1.1 Objetivos e Metodologia do Trabalho	30
1.2 Organização do Trabalho	31
2 Fundamentos Teóricos	33
2.1 Depósito de Parafina e Características Básicas	33
2.2 Mecanismos de Transporte de Parafina	36
2.2.1 Difusão molecular	37
2.2.2 Difusão Browniana	38
2.2.3 Dispersão por cisalhamento	38
2.2.4 Deposição por efeitos gravitacionais	41
2.2.5 Efeito Soret	42
2.3 Adesão da Camada Depositada	43
2.4 Influência de Outros Materiais na Cristalização da Parafina	45
2.5 Morfologia dos Cristais e Envelhecimento do Depósito	45
2.6 Revisão de Estudos sobre a Deposição de Parafina	47
2.6.1 Modelos termodinâmicos de deposição	57
3 Montagens e Procedimentos Experimentais	63
3.1 Seção de Testes Retangular	63
3.1.1 Descrição da seção de testes retangular	64
3.1.2 Medição e controle da temperatura	68
3.1.3 Visualização e processamento de imagens	69
3.2 Procedimentos Experimentais	70
3.2.1 Solução de querosene com parafina	70
3.2.2 Metodologia experimental	72

4 Modelagem Matemática	76
4.1 Hipóteses Fundamentais	78
4.2 Equação de Estado Cúbica de Peng-Robinson	79
4.3 Equilíbrio de Fases	82
4.3.1 Fugacidade	84
4.3.2 Equilíbrio sólido-líquido	85
4.4 Equilíbrio de Fase Sólido-líquido Local	89
4.4.1 Análise de estabilidade	91
4.4.2 Composição de equilíbrio	91
4.5 Equações de Conservação	93
4.5.1 Equação de conservação de massa	93
4.5.2 Equações de conservação de quantidade de movimento linear	93
4.5.3 Equação de conservação de energia	96
4.5.4 Equações de conservação de espécies	101
4.5.4.1 Fluxo difusivo molar	103
4.6 Condições Iniciais e de Contorno	105
5 Método Numérico	108
5.1 Solução do Equilíbrio de Fase Sólido-líquido Local	111
5.2 Solução das Equações de Conservação	112
5.2.1 Equação de conservação de quantidade de movimento linear	113
5.2.2 Equação de conservação de massa	114
5.2.3 Equação de conservação de espécies	115
5.2.4 Equação de conservação de energia	116
5.3 Critérios de Convergência	117
5.4 Algoritmo de Solução	119
5.5 Malha Computacional e Teste de Malha	121
5.6 Teste de Passo de Tempo	123
5.7 Espessura de Regime Permanente	125
6 Resultados	126
6.1 Validação do Modelo Termodinâmico	126
6.2 Resultados Experimentais Obtidos	129

6.3 Avaliação do Modelo Entalpia-Porosidade Desenvolvido	134
6.3.1 Influência do número de pseudocomponentes considerados	135
6.3.2 Influência dos mecanismos de transporte de massa	140
6.3.3 Evolução temporal da espessura para diferentes Reynolds	142
6.3.3 Comparação com o modelo de Minchola (2007)	145
6.4 Resultados do Modelo Entalpia-Porosidade	148
6.4.1 Campo de temperatura	149
6.4.2 Previsão da TIAC	153
6.4.3 Influência da morfologia do meio	154
6.4.4 Influência da taxa de cisalhamento	158
6.4.5 Influência da temperatura da parede	163
6.4.6 Estudo da composição do depósito	168
7 Conclusões	182
7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	184
Referências Bibliográficas	188
A Apêndices	204
A.1 Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva	204
A.2 Caracterização da Solução de Querosene com Parafina a 20%	205
A.2.1 Determinação da massa específica	205
A.2.2 Determinação da viscosidade	206
A.2.3 Curva de solubilidade e TIAC	208
A.2.4 Calor específico à pressão constante	210
A.2.5 Determinação da condutividade térmica	211
A.3 Monitoramento da Solução de Querosene com Parafina	213
B Apêndices	215
B.1 Composição das Soluções de Parafina Utilizadas	215
B.2 Cálculo da Viscosidade Absoluta do Fluido Multicomponente	218

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Ilustração esquemática de uma instalação de produção <i>offshore</i> com dados típicos da Bacia de Campos	27
Figura 1.2 - Amostras de (a) linha quase totalmente bloqueada por depósito de parafina; (b) depósito sendo removido em procedimento de limpeza	27
Figura 1.3 - Depósitos retirados após procedimento de limpeza	28
Figura 1.4 - Passagem de PIG para a remoção mecânica de depósito de parafina	29
Figura 2.1 - Mecanismos de transporte radial de parafina propostos na literatura e suas correspondentes direções de fluxo de massa	36
Figura 2.2 - Perfil de concentração de cristais de parafina	39
Figura 2.3 - Exemplo de resultado mostrando a concentração de partículas como uma função da posição radial	40
Figura 2.4 - Avaliação da simetria das espessuras de depósito, δ , nas paredes superior e inferior de um canal	42
Figura 2.5 - Teor de parafina do depósito em função do tempo para diferentes Reynolds	54
Figura 2.6 - Ilustração dos modelos termodinâmicos de (a) solução sólida e de (b) fases multisólidas	59
Figura 3.1 - Vista esquemática da seção de testes retangular	64
Figura 3.2 - Vista em corte transversal esquemática do canal de escoamento da seção de testes retangular	65
Figura 3.3 - Vista superior esquemática do canal de escoamento de 600 mm da seção de testes retangular	66
Figura 3.4 - Fotografia da seção de testes retangular	67
Figura 3.5 - Localização dos termopares ao longo do canal retangular	68

Figura 3.6 - Localização da junção dos termopares	69
Figura 3.7 - Localização dos pontos de visualização das espessuras de depósito ao longo do canal retangular	70
Figura 4.1 - Tipo de problema do equilíbrio de fases	83
Figura 4.2 - Ciclo termodinâmico de mudança de fase sólido-líquido	86
Figura 4.3 - Esquema da seção de teste	105
Figura 5.1 - Segmento de malha deslocada para um domínio bidimensional	109
Figura 5.2 - Fluxograma do procedimento de execução numérica	120
Figura 6.1 - Depósitos de parafina para três posições axiais no início do canal. $Re=660$. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. (a) 0 min (b) 1 min (c) 30 min	130
Figura 6.2 - Depósitos de parafina para três posições axiais no início do canal. $Re=6000$. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. (a) 0 min (b) 1 min (c) 30 min	131
Figura 6.3 - Distribuição espacial da espessura dos depósitos de parafina para regime permanente referentes aos números de Reynolds ensaiados. $Re= 660, 2019, 6000$. Solução de querosene com parafina a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	132
Figura 6.4 - Distribuição espacial e temporal da espessura dos depósitos para $Re=660$ considerando difusão molecular. Comparação entre 2 e 12 pseudocomponentes com os dados experimentais. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	137
Figura 6.5 - Distribuição espacial da espessura dos depósitos para $Re=1732$ em regime permanente considerando difusão molecular. Comparação entre 2 e 12 pseudocomponentes com dados experimentais. Canal de 1 m. Solução a 15%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	138
Figura 6.6 - Reprodução dos resultados de Leiroz (2004). Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina no canal	139

Figura 6.7 - Distribuições espacial e temporal das espessuras dos depósitos de parafina para $Re=660$, considerando 12 pseudocomponentes. Influência dos mecanismos considerados. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	140
Figura 6.8 - Distribuições espacial e temporal das espessuras dos depósitos de parafina para $Re=660$, considerando 2 pseudocomponentes. Influência dos mecanismos considerados. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	141
Figura 6.9 - Comparação das espessuras em $x/L = 0,8$ dos depósitos experimental e numéricos. $Re = 1732$. Considerando 2 ou 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 1 m. Solução a 15%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	143
Figura 6.10 - 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%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	145
Figura 6.11 - Distribuição espacial da espessura dos depósitos para diferentes Reynolds em regime permanente. Comparação com os resultados numéricos de Minchola (2007). $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	147
Figura 6.12 - Distribuição espacial e temporal da espessura do depósito para $Re=1078$, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	149
Figura 6.13 - Campos de temperatura para $Re=1078$, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. (a) 30s; (b) regime permanente	150
Figura 6.14 - Perfis de temperatura em três diferentes posições axiais no canal 30 s após o resfriamento das paredes. $Re=1078$, 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	152

Figura 6.15 - Perfis de temperatura em três diferentes posições axiais no canal em regime permanente de espessura. $Re=1078$, 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	152
Figura 6.16 - Saturação de sólido percentual em função da temperatura para as soluções de querosene com 15% e 20% de parafina	153
Figura 6.17 - Perfis de velocidade axial adimensional em três diferentes posições axiais no canal no regime permanente. $Re=1078$, 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. $C=1,0 \times 10^6 m^{-2}$	155
Figura 6.18 - Campos de velocidade axial adimensional para $Re=1078$, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. (a) 30 s; (b) 2 min. $C=1,7 \times 10^{11} m^{-2}$	156
Figura 6.19 - Perfis de velocidade axial adimensional em três posições axiais no canal 30 s após o resfriamento das paredes. $Re=1078$, 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. $C=1,7 \times 10^{11} m^{-2}$	157
Figura 6.20 - Perfis de velocidade axial adimensional em três posições axiais no canal 2 minutos após o resfriamento das paredes. $Re=1078$, 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. $C=1,7 \times 10^{11} m^{-2}$	157
Figura 6.21 - Distribuição espacial da espessura dos depósitos em regime permanente para diferentes números de Reynolds, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	159
Figura 6.22 - Espessura média dos depósitos ao longo do tempo para diferentes números de Reynolds simulados, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$	160

- Figura 6.23 - Espessura e saturação de sólido médias no depósito em função do tempo para Reynolds igual a 1078, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 15^{\circ}\text{C}$ 161
- Figura 6.24 - Campos de porosidade em regime permanente de espessura para diferentes Reynolds, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 15^{\circ}\text{C}$. (a) $Re=660$; (b) $Re=1078$; (c) $Re=2019$ 162
- Figura 6.25 - Perfis de temperatura adimensional em três diferentes posições axiais no canal em regime permanente para diferentes Reynolds, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 15^{\circ}\text{C}$ 163
- Figura 6.26 - Distribuição espacial da espessura dos depósitos em regime permanente para diferentes temperaturas da parede, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$ 164
- Figura 6.27 - Espessura média dos depósitos ao longo do tempo para diferentes temperaturas da parede. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$ 165
- Figura 6.28 - Campos de porosidade em regime permanente de espessura para diferentes temperaturas da parede. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$. (a) $T_w = 15^{\circ}\text{C}$; (b) $T_w = 20^{\circ}\text{C}$; (c) $T_w = 25^{\circ}\text{C}$ 166
- Figura 6.29 - Fração molar total do pseudocomponente 12 em regime permanente de espessura para diferentes temperaturas da parede. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$. (a) $T_w = 15^{\circ}\text{C}$; (b) $T_w = 20^{\circ}\text{C}$; (c) $T_w = 25^{\circ}\text{C}$ 167

- Figura 6.30 - Evolução temporal do campo de porosidade para $Re = 1078$, considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. (a) 30s; (b) 2min; (c) 10min; (d) Regime permanente de espessura 169
- Figura 6.31 - Fração molar total de 4 pseudocomponentes em regime permanente de espessura. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. Pseudocomponentes (a) 4; (b) 8; (c) 11; (d) 12 171
- Figura 6.32 - Evolução temporal da fração molar total do pseudocomponente 12. $Re = 1078$, e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$. (a) 30s; (b) 2min; (c) 10min; (d) regime permanente de espessura 173
- Figura 6.33 - Distribuição dos 12 pseudocomponentes (composição total) dentro do depósito como uma função do tempo em $x/L=0,5$. $Re = 660$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$ 175
- Figura 6.34 - Distribuição dos 12 pseudocomponentes (composição total) dentro do depósito como uma função do tempo em $x/L = 0,5$. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$ 175
- Figura 6.35 - Distribuição dos 12 pseudocomponentes (composição total) dentro do depósito como uma função do tempo em $x/L = 0,5$. $Re = 2019$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}C$, $T_w = 15^{\circ}C$ 176
- Figura 6.36 - Distribuição média dos pseudocomponentes (composição total) dentro do depósito, em $x/L = 0,5$ em regime permanente de espessura para diferentes Reynolds, 177

considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 15^{\circ}\text{C}$	
Figura 6.37 - Perfis de fração molar total dos pseudocomponentes 4, 8, 10, 11 e 12 em regime permanente de espessura em $x/L=0,5$. $Re=1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 15^{\circ}\text{C}$	178
Figura 6.38 - Variação da fração molar dos 12 pseudocomponentes dentro do depósito como uma função do tempo em $x/L = 0,5$. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 15^{\circ}\text{C}$	179
Figura 6.39 - Variação da fração molar dos 12 pseudocomponentes dentro do depósito como uma função do tempo em $x/L = 0,5$. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 20^{\circ}\text{C}$	180
Figura 6.40 - Variação da fração molar dos 12 pseudocomponentes dentro do depósito como uma função do tempo em $x/L = 0,5$. $Re = 1078$ e considerando 12 pseudocomponentes e difusão molecular. Canal de 600 mm. Solução a 20%. $T_{in} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_w = 25^{\circ}\text{C}$	180
Figura A.1 - Curva de calibração da bomba de cavidade progressiva	204
Figura A.2 - Representação de um picnômetro	205
Figura A.3 - Viscosímetro Cannon-Fenske	207
Figura A.4 - Variação da viscosidade com a temperatura para uma solução de querosene com 2% de parafina em massa	209
Figura A.5 - Curva de solubilidade da solução de querosene com parafina a 20%	210
Figura A.6 - Esquema da Célula K-c utilizada para medição da condutividade térmica da solução de querosene com parafina	212

Figura A.7 - Massa específica da solução de querosene com parafina a 20%	214
Figura A.8 - Viscosidade cinemática da solução de querosene com parafina a 20%	214

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 - Resultado do teste de malha realizado	122
Tabela 5.2 - Tempo de convergência dos resultados em função da malha utilizada	123
Tabela 5.3 - Número de Courant dos passos de tempo utilizados no teste	124
Tabela 5.4 - Resultado do teste de passo de tempo realizado	125
Tabela 6.1 - Composição de alimentação do sistema utilizado para a verificação do modelo termodinâmico	127
Tabela 6.2 - Composição do sistema da Tab. 6.1 em função da temperatura a 101,3 kPa	128
Tabela 6.3 - Casos de deposição de parafina simulados com o modelo entalpia-porosidade desenvolvido	135
Tabela 6.4 - Valores de TIAC experimentais e previstas para as soluções de querosene com parafina utilizadas	154
Tabela 6.5 - Caracterização da solução de querosene com 20% de parafina	170
Tabela A.1 - Valores das massas específicas obtidos com o picnômetro	206
Tabela A.2 - Valores de condutividade térmica medidos com a Célula K-c	213
Tabela B.1 - Composição da solução a 20% considerando doze pseudocomponentes	216
Tabela B.2 - Composição da solução a 20% considerando dois pseudocomponentes	216
Tabela B.3 - Composição da solução a 15% considerando doze pseudocomponentes	217
Tabela B.4 - Composição da solução a 15% considerando dois pseudocomponentes	217

Lista de Símbolos

A	parâmetro da PR-EOS
A_t	área da seção transversal do canal retangular
a	largura do canal retangular
a_i	parâmetro a da PR-EOS para o componente i
a_m	parâmetro a de mistura da PR-EOS
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
ΔC_{p_i}	calor específico de fusão
D_M	coeficiente de difusão molecular
D_T	coeficiente de difusão por gradiente térmico
f_i	fugacidade do componente i
$f_{j,i}$	fugacidade do componente i na fase j
$f_{j,i}^{\text{puro}}$	fugacidade do componente i puro na fase j
H	Entalpia
H^*	entalpia de gás ideal
ΔH^f	entalpia de fusão
J	fluxo difusivo molar
K	condutividade térmica
K_{ef}	condutividade térmica efetiva do meio poroso
K	permeabilidade efetiva do meio
$k_{i,j}$	parâmetro de interação binária entre os componentes i e j
L	comprimento resfriado do canal retangular

M	peso molecular
m	Massa
m_i	parâmetro da PR-EOS
n	número de componentes (ou espécies)
$n_{j,i}$	fração molar do componente i na fase j
P	Pressão
P_c	pressão crítica
P^f	pressão de fusão
Q	vazão volumétrica
R	constante universal dos gases perfeitos
Re	número de Reynolds
S_{poro}	termo fonte da equação de conservação
\mathcal{S}	Entropia
S_j	fração volumétrica da fase j (ou saturação da fase j)
S_o	fração volumétrica da fase líquida (porosidade)
T	temperatura
T_{in}	temperatura na entrada do canal retangular (quente)
T_w	temperatura da parede de cobre do canal retangular (fria)
t	Tempo
Δt	passo de tempo
T_c	temperatura crítica
T^f	temperatura de fusão
U	energia interna
U, V	componentes cartesianos da velocidade nas direções x e y
\forall	Volume
u	vetor velocidade
v	volume molar específico
v_c	volume molar crítico
x, y	coordenadas cartesianas horizontal e vertical
$x_{j,i}$	composição molar do componente i na fase j
w	fator acêntrico
w	fração mássica

Z	fator de compressibilidade
z_i	composição de alimentação (fração molar total do componente i no sistema)

Símbolos gregos

α_i	parâmetro da PR-EOS para o componente i
β_j	fração molar da fase j
Γ	coeficiente de difusão na equação geral de conservação
δ	espessura do depósito de parafina
Λ	parâmetro variável função da porosidade do meio
λ_i	calor latente molar do componente i
μ	viscosidade dinâmica (ou absoluta)
$\mu_{j,i}$	potencial químico do componente i na fase j
ν	viscosidade cinemática
ρ	massa específica
τ	tensor das tensões viscosas
ϕ	variável dependente na equação geral de conservação
φ_i	coeficiente de fugacidade do componente i

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

*	iteração anterior
^o	passo de tempo anterior
o	fase líquida (ou fase óleo)
s	fase sólida
n, s, e, w	faces dos volumes de controle
P, N, S, E, W	pontos nodais do domínio computacional

“Tecnologia por uma sociedade melhor”

Sintef