



**COPPE/UFRJ**

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA PARAFINAÇÃO EM  
ESCOAMENTO DE HIDROCARBONETOS EM DUTOS PRODUTORES

Josué da Silva Teixeira dos Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Antonio Carlos Fernandes

Marco Giulietti

Rio de Janeiro

Março de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA PARAFINAÇÃO EM  
ESCOAMENTO DE HIDROCARBONETOS EM DUTOS PRODUTORES

Josué da Silva Teixeira dos Santos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

---

Prof. Antonio Carlos Fernandes, Ph.D.

---

Prof. Marco Giulietti, Dr.-Ing.

---

Prof. Sergio Hamilton Sphaier, Dr.-Ing.

---

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo, Ph.D.

---

Eng. Silas Derenzo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2009

Santos, Josué da Silva Teixeira dos

Estudo Experimental e Numérico da Parafinação em Escoamento de Hidrocarbonetos em Dutos Produtores/ Josué da Silva Teixeira dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XV, 121 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Antonio Carlos Fernandes

Marco Giuliatti

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 92-103.

1. Garantia de Escoamento. 2. Parafinação. 3. CFX. I. Fernandes, Antonio Carlos et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Aos meus pais  
pela compreensão  
e ajuda nos momentos difíceis.

A minha querida esposa  
Fabíola Andrade Porto Teixeira  
pelo companheirismo, carinho  
e pela palavra de incentivo.

Aos meus filhos  
João Pedro Porto Teixeira e Davi Porto Teixeira  
pela alegria diária e o sorriso constante.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Antonio Carlos Fernandes e Marco Giuliatti, pelos ensinamentos, incentivo e orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

Ao Professor Luis Fernando Azevedo pela oportunidade concedida para realizar os testes experimentais no Laboratório de Termociências da PUC-RIO. Aos Engenheiros Júlio Manuel Barros Júnior e Daniel Prata por todo apoio que me deram durante a realização dos trabalhos de laboratório.

A todos os amigos do Departamento de Engenharia Oceânica apoio, pela amizade, sugestões e incentivo durante a realização deste trabalho.

A todos os amigos do doutorado na COPPE/UFRJ e aos funcionários e professores do Programa de Engenharia Oceânica.

A minha família, pelo amor, apoio e paciência.

E principalmente a DEUS, que sem ele nada é possível.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA PARAFINAÇÃO EM  
ESCOAMENTO DE HIDROCARBONETOS EM DUTOS PRODUTORES

Josué da Silva Teixeira dos Santos

Março/2009

Orientadores: Antonio Carlos Fernandes  
Marco Giulietti

Programa: Engenharia Oceânica

A deposição de parafinas em linhas de transporte e produção tem criado diversos problemas na produção de petróleo em diversas partes do mundo. Frequentemente os problemas são mais severos nos campos *offshore*, onde suas soluções podem custar muito.

Nesse aspecto, o presente trabalho realizou estudos numéricos através do Fluido Dinâmica Computacional (CFD) utilizando o software comercial CFX 11.0, visando o estudo da hidrodinâmica do escoamento, a cristalização e a deposição. Os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais levantados na PUC-RIO, obtidos para deposição sob condição laminar em canal retangular. Os resultados mostraram que o modelo numérico empregado está coerente com o experimento e o perfil de temperatura no modelo numérico apresenta a mesma tendência do modelo experimental.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF PARAFFINATION IN  
HYDROCARBON FLOW IN PIPELINES PRODUCER

Josué da Silva Teixeira dos Santos

March/2009

Advisors: Antonio Carlos Fernandes  
Marco Giulietti

Department: Ocean Engineering

Paraffins deposition in transport lines and production has made several problems in petroleum production around the world. Frequently the problems are more severe in offshore fields, where the solutions are expensive.

In that aspect, the present work accomplished numerical studies through Computational Fluid Dynamic (CFD) using the commercial software CFX 11.0, seeking the study of hydrodynamic flow, crystallization and deposition. The results were compared with the experimental data obtained at PUC-RIO, for deposition under laminar condition in rectangular channel. The results show that the obtained numerical model is coherent with the experimental data and the temperature profile in numerical model presents the same tendency of the experimental data.



## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2. 1. O Petróleo e as Parafinas	4
2. 2. Parafinação e Deposição de Parafina	8
2. 3. Mecanismos da Deposição:	27
2. 3. 1. Deposição de Parafina por Difusão Molecular	28
2. 3. 2. Deposição de Parafina por Difusão Browniana	29
2. 3. 3. Deposição de Parafina por Dispersão por Cisalhamento	30
2. 3. 4. Deposição de Parafina por Efeitos Gravitacionais	31
2. 4. Mecanismos da Cristalização	31
2. 4. 1. Crescimento de Cristais	34
2. 4. 2. Aglomeração	34
2. 5. Modelagem de Escoamentos Multifásicos	35
2. 6. Objetivo do Presente Trabalho	46
3. O MODELO COMPUTACIONAL CFX 11.0	48
3. 1. Modelagem Matemática	50
3. 1. 1. Classificação de Modelos para Escoamentos Multifásicos	50
3. 1. 2. Abordagem Euleriana – Euleriana	53
3. 2. Equações Governantes	54
3. 3. Modelo Numérico	57
3. 3. 1. Características do Método Numérico	57
4. MODELO FÍSICO DO ESTUDO NUMÉRICO	59
4. 1. Introdução	59
4. 2. Modelo Físico	59
4. 2. 1. Modelagem do Crescimento do Depósito de Parafina	60
4. 3. Estudo de Malhas	63
4. 3. 1. Comparação de Malhas	64
5. MÉTODOS E MONTAGEM EXPERIMENTAL	65
5. 1. Introdução	65
5. 2. Metodologia	65

5. 3. Descrição dos Equipamentos	66
5. 4. Solução Parafina/Querosene	71
5.5. Procedimento Experimental	73
6. RESULTADOS	75
6. 1. Visualização Experimental do Escoamento e Comparação com Resultados Numéricos	76
6. 2. Perfil de Temperatura	87
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	89
7. 1. Conclusões	89
7. 2. Sugestões	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICES	104
Apêndice 1 – Arquivo de Comando do Solver do CFX 11.0 para o Escoamento no Estado Estacionário	104
Apêndice 2 – Tabela com os Valores Utilizados para Traçar as Curvas Espessura do Depósito x Comprimento	115
Apêndice 3 – Curva de Solubilidade da Solução n-Heptano/n-Docosano	116
Apêndice 4 – Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva.	118
Apêndice 5 – Determinação da Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais (TIAC).	119
Apêndice 6 – Determinação do Número de Reynolds para Mistura Parafina/Querosene.	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Parafinas macrocristalinas e microcristalinas (ALVES, 1999).	7
Figura 2.2: Células unitárias dos cristais de parafina (ROCHA, 1997).	34
Figura 3.1: Classificação de modelos para escoamentos multifásicos (PALADINO, 2005).	51
Figura 4.1: Comparação do Teste de Malha entre as espessuras de depósito de parafina do estudo experimental e estudo numérico.	64
Figura 5.1: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina em condições de escoamento.	66
Figura 5.2: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina.	67
Figura 5.3: Vistas da seção teste.	67
Figura 5.4: Vista da seção de teste com detalhe do cobre.	68
Figura 5.5: Vista detalhada da entrada do canal.	68
Figura 5.6: Vista detalhada da saída do canal.	69
Figura 5.7: Vista do reservatório de armazenamento.	69
Figura 5.8: Vista superior da seção de testes que mostra o posicionamento do microscópio.	70
Figura 5.9: Vista do microscópio ótico ZEISS.	71
Figura 6.1: Vista frontal do duto retangular.	75
Figura 6.2: Interseção acrílico/cobre para $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$ e $30min$ .	77
Figura 6.3: A 9 mm da entrada para $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$ e $30min$ .	77
Figura 6.4: A 15 mm da entrada para $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$ e $30min$ .	77
Figura 6.5: A 1000 mm da entrada para $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$ e $30min$ .	78
Figura 6.6: Espessura do depósito em função do comprimento do canal ao longo do tempo utilizando a mistura querosene/parafina em um escoamento laminar no estudo experimental.	79
Figura 6.7: Espessura do depósito ao longo do canal e do tempo utilizando a mistura parafina/querosene em um escoamento laminar no estudo	80

experimental.

Figura 6.8: Comportamento do crescimento logarítmico do depósito no trecho de 57 mm da interseção acrílico/cobre do estudo experimental.	81
Figura 6.9: Geometria criada a partir do canal experimental.	82
Figura 6.10: Geometria para simulação numérica do escoamento da solução.	82
Figura 6.11: Malha gerada através do CFX-Mesh.	83
Figura 6.12: Condições de contorno da simulação.	83
Figura 6.13: Vista do canal com deposição de parafina para o escoamento no estado estacionário.	84
Figura 6.14: Vista ampliada da seção retangular com depósito de parafina na posição de $x = 0,50$ a $0,57$ m no regime estacionário.	85
Figura 6.15: Comparação da espessura do depósito numérico com a espessura do depósito experimental.	86
Figura 6.16: Vista da “ <i>polyline</i> ” na posição axial variando de $0,50$ a $0,57$ m.	86
Figura 6.17: Perfil de temperatura na parede fria ao longo do canal.	87
Figura 6.18: Perfil de temperatura na parede quente ao longo do canal.	88
Figura A.3: Curva de saturação utilizada no CFX.	118
Figura A.4: Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva.	119

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades de algumas n-parafinas.	4
Tabela 4.1: Número de células das malhas.	63
Tabela 5.1: Propriedades gerais do n-docosano.	72
Tabela 5.2: Entalpia de mudança de fase do n-docosano.	72
Tabela 5.3: Entropia de mudança de fase do n-docosano.	72
Tabela 5.4: Propriedades gerais do n-heptano.	73
Tabela 6.1: Propriedades físico-químicas da mistura n-docosano/n-heptano.	84
Tabela A.2: Valores utilizados para plotar as curvas experimental e numérica.	115
Tabela A.3: Solubilidade do n-docosano em n-heptano.	116
Tabela A.6.1: Massa específica da mistura parafina/querosene.	120
Tabela A.6.2: Viscosidade da mistura parafina/querosene.	120

## NOMENCLATURA

### ALFABÉTICO

A	Área	$m^2$
C	Fração volumétrica da parafina na solução	adimensional
$C_D$	Coeficiente de arraste	adimensional
$C_p$	Calor específico à pressão constante	J/mol.K
d	Diâmetro	m
D	Coeficiente de difusão	$m^2/s$
$D_p$	Diâmetro da partícula	mm
e	Coeficiente de restituição	adimensional
f	Força de interação entre as fases	adimensional
$f_L$	Fração volumétrica líquida	adimensional
g	Força da gravidade	$m/s^2$
$g_0$	Coeficiente de distribuição radial	adimensional
H	Entalpia	kJ/mol
k	Coeficiente de difusão granular	adimensional
K	Permeabilidade	
m	Massa	kg
$\dot{M}$	Vazão mássica na face do volume de controle	
$M_{ii}$	Termo de transferência de quantidade de movimento interfacial	adimensional
p	Pressão	Pa
r	Coordenada radial	m
$r_i$	Fração volumétrica da fase $i$	adimensional
Re	Número de Reynolds	adimensional
S	Entropia	J/mol.K
S	Termo Fonte	adimensional
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
$T_e$	Temperatura de entrada	$^{\circ}C$

u	Velocidade média locais das partículas	m/s
<b>U</b>	Vetor velocidade	m/s
v	Velocidade média locais das partículas	m/s
x	Fração molar	adimensional
y	Fração molar	adimensional

### **GREGOS**

$\alpha$	Fração volumétrica	adimensional
$\phi$	Fração volumétrica das partículas	adimensional
$\gamma$	Dissipação da colisão da energia	kg/s <sup>3</sup> m
$\lambda$	Condutividade térmica	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\mu$	Viscosidade dinâmica	cP
$\rho$	Massa específica	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Tensores tensão	Pa
$\Delta$	Varição	
$\Phi$	Variável genérica transportada	
$\Gamma$	Fluxo de massa entre fases (através da interface)	

### **SUBSCRITOS e SUPERESCRITOS**

ac	Acrílico
B	Browniana
c	Fase contínua
Cu	Cobre
col	Colisão
d	Fase dispersa
fr	Fricção
fus	Fusão
g	Gás
i	Fase <i>i</i>
kin	Cinético

l	Fase líquida
m	Molecular
max	Valor máximo
NB	Volumes vizinhos ao volume de controle
q	Interfase líquido-sólido
s	Fase sólida
sub	Sublimação
tr	Transição
1	Soluto
2	Solvente



## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a utilização do petróleo como fonte de energia faz com que muitos países sejam dependentes economicamente desse produto.

Grande parte das bacias sedimentares do mundo que oferecem probabilidade de existência de petróleo está localizada em pontos distantes da costa marítima, em áreas *offshore*. Algumas dessas áreas estão localizadas em regiões como o Golfo do México, Mar do Norte, Golfo Pérsico, costa oeste da África, Mar da China e a costa do Brasil. No Brasil, as maiores e mais importantes descobertas em termos de reservas de petróleo tem ocorrido, principalmente na Bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro, em águas cada vez mais profundas, com lâmina d'água entre 2000 e 3000 metros.

Dentre os problemas relacionados com a produção de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, podemos considerar a obstrução nas paredes internas das linhas de transporte e produção devido à deposição de hidrocarbonetos, nos quais os de cadeias parafínicas são os maiores responsáveis por esse problema.

A deposição de parafinas em linhas de transporte e produção tem criado diversos problemas na produção de petróleo em diversas partes do mundo. Frequentemente os problemas são mais severos nos campos *offshore*, onde suas soluções podem custar muito. Devido à relativa dificuldade e ao custo associado com a operação nos reservatórios de petróleo, especialmente *offshore*, é necessário entender a natureza da parafinação no petróleo e algumas variáveis fundamentais que afetam a deposição durante a produção e o processamento (HAMMAMI e RAINES, 1997).

A parafina se deposita e tende a reter água, areia e petróleo, formando depósitos de consistência, dureza e densidade variáveis.

O problema da deposição da parafina pode causar uma perda de milhões de dólares por ano com enorme custo de manutenção, reduzindo ou adiando a produção, aumentando a perda de carga, os riscos operacionais, perdas de equipamentos, perda da eficiência de tratamento e riscos ambientais (NÝVLT et al., 2001).

O petróleo sai do reservatório a uma temperatura variando entre 60 e 70°C e escoar para as linhas de produção. Essas linhas carregam o petróleo para plataformas e das plataformas para as instalações em terra. À medida que o petróleo escoar, troca calor com a água do mar, tornando-se menos solúvel até o início da cristalização. A solubilidade das parafinas no petróleo diminui drasticamente com a diminuição da

temperatura, sendo cristalizado e depositado nas paredes frias da linha, restringindo o fluxo (VENKATESAN et al., 2005).

Para uma remediação eficiente, é necessário entender a natureza dos depósitos de parafina e estudar o processo de deposição.

Nesse aspecto, o presente trabalho tem como objetivo realizar estudos numéricos através da Fluido Dinâmica Computacional (CFD) utilizando o software comercial CFX 11.0, visando o estudo da hidrodinâmica do escoamento, a cristalização e a deposição. Os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais levantados na PUC-RIO, obtidos para deposição sob condição de escoamento laminar em canal retangular (LEIROZ, 2004).

Apesar do estudo experimental utilizar a solução de parafina comercial e querosene como solvente, optou-se por trabalhar, no estudo numérico, com os dados físico-químicos de uma parafina isolada, contendo vinte e dois átomos de carbono (n-docosano), em solução de n-heptano. A escolha da solução para o estudo numérico e experimental se deu por dois motivos. Com relação ao estudo experimental não foi utilizada a parafina isolada devido à dificuldade de solucionar o problema de vazamento da solução na bancada de escoamento. Com relação ao estudo numérico, a parafina comercial e o querosene apresentam dados físico-químicos de difícil determinação, tais como a concentração e a composição. Por isso, resolveu-se aproximar as propriedades do n-docosano e n-heptano para simulação numérica, utilizando os dados determinados por ALVES (1999).

Para o desenvolvimento do estudo experimental e da simulação numérica foi considerado o regime de escoamento laminar, onde a troca de calor é responsável principal pela deposição. A geometria utilizada para o estudo numérico foi um canal retangular.

O modelo utilizado para o estudo da simulação numérica da deposição de parafina considera uma única fase com fração mássica para os componentes sólidos e líquidos do docosano como dado de entrada, o uso de expressões algébricas relacionando fração líquida com a temperatura e uso da Equação de Darcy, como termo fonte, para o escoamento na região metaestável. O modelo foi implementado usando o *CFX Command Language* (CCL).

A realização deste estudo propiciará um melhor entendimento do fenômeno de parafinação visando aumentar a produtividade da extração de petróleo em plataformas *off-shore* e no escoamento em dutos de petróleo.

No Capítulo 2 é apresentada uma extensa revisão bibliográfica sobre deposição de parafina em dutos e diferentes tipos de escoamento multifásicos.

No Capítulo 3 é apresentado o modelo computacional CFX com as condições de contorno, equações governantes e modelo numérico.

No Capítulo 4 é apresentado o modelo físico com o desenvolvimento das equações analíticas utilizadas.

Os detalhes construtivos dos experimentos para realização dos testes são apresentados no Capítulo 5.

No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos e comparados com os resultados numéricos, enquanto no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitas pesquisas foram realizadas na tentativa de entender e resolver o problema da deposição de parafina nas linhas de transporte e produção de óleo. Trabalhos com modelagem numérica e experimental têm sido desenvolvidos com a finalidade de prever o fenômeno da deposição da parafina.

Diversos tipos de abordagem são empregados, desde aquelas enfocando os fenômenos básicos até compilações de campo. Apesar do grande número de trabalhos existentes ainda não há uma visão clara de quais os mecanismos básicos responsáveis pelo processo de deposição de parafina no interior de dutos. Vários trabalhos publicados utilizam algum modelo de deposição e procedimentos de ajuste aos dados experimentais disponíveis o que, normalmente, produz previsões com alcance limitado. Há estudos que assumem correlações empíricas ou semi-empíricas para prever a queda de pressão e o perfil de temperatura, ignorando o fluxo de convecção radial na camada composta por parafina e óleo e usa a Lei de Fick para descrever o fluxo de difusivo das espécies para a parede do duto usando a regra de cadeia para relacionar gradiente de concentração a gradiente térmico.

AZEVEDO e TEIXEIRA (2003) descreveram uma detalhada revisão crítica dos mecanismos de deposição de parafina e posteriormente LEIROZ (2004) utilizou parte dessa revisão em sua pesquisa de doutorado.

Parte desta presente revisão bibliográfica descrita teve como base o trabalho de LEIROZ (2004).

### 2. 1. O Petróleo e as Parafinas

Do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), o petróleo no estado líquido é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho claro (THOMAS et al., 1996).

O petróleo bruto é uma mistura de hidrocarbonetos contendo principalmente alcanos e quantidades variáveis de naftenos (cicloalcanos), aromáticos e outras

impurezas como sais inorgânicos, areia e água. Dentre as principais frações encontradas no petróleo têm-se: gás, C<sub>1</sub> a C<sub>4</sub>; éter de petróleo e ligroína (nafta leve), C<sub>5</sub> a C<sub>7</sub>; gasolina, C<sub>6</sub> a C<sub>12</sub>; querosene, C<sub>9</sub> a C<sub>15</sub>; óleos combustíveis, C<sub>14</sub> a C<sub>18</sub>; óleos lubrificantes, parafinas, asfaltenos, aromáticos e resinas (TURNER, 1971, RØNNINGSEN et al., 1991, MISRA et al., 1995 e ROCHA, 1997).

Os hidrocarbonetos saturados constituem o maior grupo, formado por alcanos normais (n-parafinas), isoalcanos (isoparafinas) e cicloalcanos (naftenos). No petróleo são encontradas parafinas normais e ramificadas, que vão do metano até 45 átomos de carbono. As parafinas normais usualmente representam de 15 a 20% do petróleo, variando, no entanto, entre limites bastante amplos (3 a 35%) (THOMAS et al., 1996).

Os alcanos normais (n-parafinas), tais como os isoalcanos (isoparafinas) são moléculas de hidrocarbonetos flexíveis e, conseqüentemente, tendem a se agrupar e precipitar como parafinas sólidas. Se as moléculas são ramificadas (isoparafinas), estas demoram a formar o núcleo e os sólidos formados são instáveis. Os aromáticos, por outro lado, são conhecidos como bons solventes das ceras parafínicas. Os naftenos tendem a nuclear ocorrendo o processo de crescimento cristalino (HAMMAMI e RAINES, 1997).

Na caracterização de um petróleo, o teor de parafinas está relacionado com a presença de frações mais pesadas (>C<sub>18+</sub>) que precipitam e depositam a altas temperaturas (T < 50°C). Essas frações, no entanto, podem ser constituídas de cadeias acíclicas (parafinas) e cíclicas (naftênicas) (MISRA et al., 1995; TURNER, 1971).

Parafinas são essencialmente misturas de cadeias longas de hidrocarbonetos, na maior parte, de n-alcanos, hidrocarbonetos cuja fórmula química é C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>, numa faixa de comprimentos de cadeias variando entre C<sub>15</sub> até C<sub>75</sub><sup>+</sup>. Possuem a seguinte estrutura (KHALIL, 1999; HAMMAMI e RAINES, 1997):



As moléculas de parafina, durante o escoamento de petróleo, tendem a se aproximar uma das outras por atrações intermoleculares fracas (atrações de Van Der Waals entre os grupos metil). Quando a temperatura decresce, as interações entre essas moléculas aumentam. Quando as forças intermoleculares de atração alcançam um ponto onde elas são maiores que as interações entre o solvente (hidrocarbonetos leves) e a parafina, as moléculas se combinam para formar um núcleo cristalino (ALVES, 1999).

A Tabela 2.1 mostra as principais propriedades termodinâmicas das n-parafinas presentes no petróleo (PETINELLI, 1991; ALVES, 1999 e ROCHA, 1997):

Tabela 2.1: Propriedades de algumas n-parafinas.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Nº de átomos de C</b>	<b>Fórmula Molecular</b>	<b>P. M. (g/mol)</b>	<b>Ponto de Fusão (°C)</b>	<b>Ponto de Ebulição (°C)</b>	<b>Densidade a 20°C</b>
Hexadecano	16	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CH <sub>3</sub>	226	18,05	286,8	0,770
Heptadecano	17	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> CH <sub>3</sub>	240	21,85	302,0	0,775
Octadecano	18	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub>	254	28,05	316,3	0,779
Nonadecano	19	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> CH <sub>3</sub>	268	31,95	329,9	0,782
Eicosano	20	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>18</sub> CH <sub>3</sub>	282	36,55	343,8	0,785
Heneicosano	21	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>19</sub> CH <sub>3</sub>	296	40,15	356,5	0,788
Docosano	22	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> CH <sub>3</sub>	310	43,95	368,6	0,791
Tricosano	23	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>21</sub> CH <sub>3</sub>	324	47,45	380,2	0,793
Tetracosano	24	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>22</sub> CH <sub>3</sub>	338	50,55	391,3	0,796
Pentacosano	25	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>23</sub> CH <sub>3</sub>	352	53,45	401,9	0,798
Hexacosano	26	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>24</sub> CH <sub>3</sub>	366	56,25	412,2	0,800
Heptacosano	27	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>25</sub> CH <sub>3</sub>	380	58,75	422,1	0,802
Octacosano	28	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>26</sub> CH <sub>3</sub>	394	61,15	431,6	0,803
Nonacosano	29	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>27</sub> CH <sub>3</sub>	408	63,15	440,8	0,805
Tricontano	30	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>28</sub> CH <sub>3</sub>	422	65,35	449,7	0,806
Tetratriacontano	34	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>32</sub> CH <sub>3</sub>	478	73,05	482,0	0,811
Octatriacontano	38	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>36</sub> CH <sub>3</sub>	534	78,95	511,0	0,815
Tetracontano	40	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>38</sub> CH <sub>3</sub>	562	81,45	522,0	0,817
Tetratetracontano	44	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>42</sub> CH <sub>3</sub>	618	86,35	545,0	0,819
Pentacontano	50	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>48</sub> CH <sub>3</sub>	702	91,95	575,0	0,825
Hexacontano	60	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>58</sub> CH <sub>3</sub>	842	98,95	615,0	0,831
Heptacontano	70	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>68</sub> CH <sub>3</sub>	982	105,45	646,0	0,835
Hectano	100	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>98</sub> CH <sub>3</sub>	1402	115,20	662,0	0,846

As parafinas podem ser divididas em dois grupos distintos: macrocristalinas e microcristalinas. O grupo das parafinas macrocristalinas é constituído de parafinas de cadeia normal com número de átomos de carbono entre 18 e 30. Essas parafinas possuem cristais bem definidos e visíveis a olho nu. Parafinas com número de átomos de carbono acima de 41 e também as parafinas de cadeia ramificada são classificadas no grupo denominado parafinas microcristalinas (OLIVEIRA e LOUVISSE, 1991; HOWELL e JESSEN, 1956).

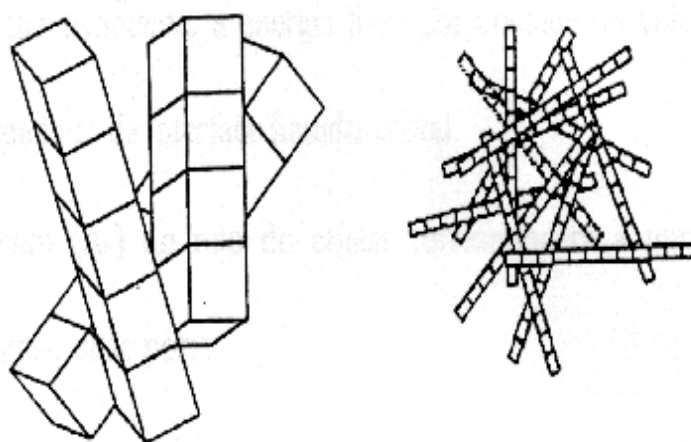


Figura 2.1: Parafinas macrocristalinas e microcristalinas (ALVES, 1999).

Hidrocarbonetos de praticamente todos os tipos podem resultar em uma variedade de formas, dependendo da temperatura e da taxa de resfriamento. Entre os fatores que exercem influência na morfologia dos cristais estão: viscosidade, velocidade de resfriamento e concentração do meio. Cristais na forma de agulhas se formam quando há a presença de uma quantidade apreciável de impurezas, já a formação de placas é favorecida pela ausência de impurezas. Quanto mais viscoso o licor-mãe, mais concentrada a solução e mais rápida a velocidade de resfriamento, menores serão os cristais; baixas viscosidades favorecem a formação de placas e altas viscosidades promovem a formação de agulhas; um resfriamento lento favorece a formação de placas (ALVES, 1999; BUCHLER, 1927; CLARKE, 1951; EDWARDS, 1957; FERRIS, 1945; KINSEL, 1945).

Muitos trabalhos mostram que tanto parafinas macrocristalinas como amorfas estão presentes no petróleo, mas a maioria dos autores acredita que as parafinas presentes são todas de natureza macrocristalina.

## **2. 2. Parafinação e Deposição de Parafina**

A parafinação é um processo gradual de deposição de hidrocarbonetos lineares, durante o escoamento do petróleo em dutos, notadamente submarinos, sob condições de severo resfriamento e regime transiente. A solubilidade de parafinas em petróleo depende de fatores como composição química do petróleo, temperatura e pressão. Variações de temperatura e pressão dentro do reservatório podem dar margem a depósitos de parafinas que bloqueiam o escoamento e diminuem a produtividade dos poços. A deposição da parafina ocorre ao longo da parede da tubulação no contato com o petróleo parafinado e pode ocorrer desde o poço portador do petróleo até o sistema de tratamento. Pode ocorrer na estação produtora, coluna de produção, linha de produção, *riser* de produção, oleoduto de exportação, vaso tratador e tanque de armazenamento (KHALIL, 1999; SANTOS, 1994).

Nas superfícies resfriadas, os depósitos de parafinas ocorrem de fontes de petróleo que contem cadeia normal, ramificada e cíclica. Os cristais formados das *n*-parafinas possuem o TIAC (Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais) menor que os cristais formados pela isoparafinas, isso com o mesmo peso molecular.

Enquanto o petróleo está sendo resfriado, cada componente parafínico torna-se menos solúvel até que a cristalização se inicia pelos componentes de mais alto peso molecular. Este começo de cristalização é conhecido como ponto de névoa, ou temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC). À medida que o fluido continua sendo resfriado, espécies de peso molecular mais baixo também cristalizam, somando-se à fração sólida. A cristalização parafina é controlada pela temperatura, mas também é dependente da composição do petróleo, especialmente dos compostos leves (KOK e SARACOGLU, 2000).

Segundo VENKATESAN et al. (2005) as propriedades dos depósitos de gel não são apenas função da composição do óleo, mas função do cisalhamento e da história térmica do depósito durante a formação do gel.



Muitos trabalhos foram e estão sendo feitos na tentativa de entender o fenômeno da deposição de parafina nas linhas de transporte de petróleo no qual podemos considerar:

HUNT (1962) realizou experiências de deposição de parafina para condições estáticas e com escoamento. O objetivo principal dessas experiências foi estudar os efeitos dos revestimentos em dutos e dos aditivos químicos sobre a deposição de parafinas. Experiências para medição das propriedades do depósito como sua dureza e aderência foram feitas usando como seção de testes uma placa fria. Além de medir as propriedades, essa experiência permitiu a medição de quantidades de parafina depositada para longos períodos de tempo (15 h). Foi observado, por exemplo, que o depósito não tinha aderência em aço inox polido, mas sim em uma superfície jateada com areia do mesmo material, do que foi concluído que o depósito não é preso numa superfície por forças de adesão, mas sim pela rugosidade da superfície.

Todos os experimentos realizados por Hunt foram para condições de escoamento em regime laminar. O estudo tentou simular a deposição de parafinas produzida na tubulação vertical de saída de um poço de petróleo. A seção experimental usada permitia submeter o escoamento a diferentes gradientes de temperatura. Das experiências realizadas, concluiu-se que o resfriamento é o fator necessário para a deposição de cristais. Outros estudos feitos para condições de temperatura constantes não resultaram deposição. Visualizações de manchas de parafina depositada na região de entrada da seção de testes no início do resfriamento levaram a concluir que a deposição de parafinas é iniciada por nucleação. Com o transcorrer do tempo essas manchas transformavam-se numa camada homogênea, propondo que o crescimento do depósito depois da nucleação era causado pela difusão molecular. Visualizações similares para pequenos e elevados gradientes de temperatura concluíram que o mecanismo de deposição não varia devido ao gradiente de temperatura imposto. Em consequência, ele não considera a deposição de partículas já precipitadas na sua teoria.

PATTON e CASAD (1970) realizaram um estudo experimental visando determinar a influência da rugosidade das superfícies em contato com o escoamento e da solução na massa do depósito. Estudaram também superfícies revestidas com material plástico. Nenhuma correlação foi encontrada entre rugosidade e massa depositada. Apenas concluíram que a adesão da parafina à superfície é função de sua composição e da área de contato.

BERN et al. (1980) realizaram testes com cilindros concêntricos, onde ao cilindro externo poderia ser imposta uma rotação de forma a provocar um escoamento. O cilindro interno era resfriado, e nele ocorria deposição de parafina. Esperavam que os mecanismos que dominavam o processo fossem a difusão molecular e a dispersão por cisalhamento. Verificaram, porém que a difusão molecular controla o processo de deposição, observando que taxas de cisalhamento muito elevadas provocam uma diminuição na taxa de deposição. Atribuíram tal fato ao “arraste” do depósito devido ao cisalhamento.

BURGER et al. (1981) realizaram um estudo bastante completo sobre os mecanismos de deposição. Realizaram testes em tubos verticais e horizontais, concluindo que os efeitos gravitacionais não são importantes no processo de obstrução da linha. Modelaram matematicamente a contribuição da difusão molecular, difusão Browniana e dispersão por cisalhamento, concluindo que a primeira domina a deposição para maiores temperaturas e fluxo de calor, enquanto que a dispersão por cisalhamento ocorre em menores temperaturas e fluxo de calor. A deposição pelo mecanismo de difusão Browniana é desprezível se comparada com os outros mecanismos. As medidas das propriedades físicas do óleo incluíram a determinação de sua solubilidade, composição da parafina precipitada e do coeficiente de difusão molecular.

McCLAFLIN e WHITFILL (1984) realizaram um estudo experimental sobre o uso de métodos químicos de controle de formação de depósitos orgânicos, chegando a testar 22 modificadores de cristais, não constando resultados positivos com nenhum deles. Dispersantes também foram utilizados, fornecendo resultados positivos e mostrando-se mais eficientes que a injeção de óleo aquecido na linha.

WEINGARTEN e EUCHNER (1986) fizeram um estudo de deposição de parafinas com a finalidade de estimar as condições críticas de operação de um duto e as taxas de deposição geradas. Os experimentos realizados para escoamento com baixas taxas de cisalhamento resultaram em medições de depósito maiores do que o previsto por difusão molecular. Adicionalmente foi observado que as taxas de deposição foram maiores do que as previstas por difusão molecular, evidenciando a presença de outros mecanismos de deposição. Eles concluíram que a dispersão por cisalhamento tem a mesma importância que a deposição por difusão molecular em condições de taxas de cisalhamento baixas. A experiência com altas taxas de cisalhamento mostra um crescimento rápido no início do experimento, diminuindo a taxa de deposição com o

transcorrer do tempo. Foi verificado que os cristais eram removidos quando o esforço gerado pelo cisalhamento era maior que a resistência do depósito.

HARTLEY e BIN JADID (1989) estudaram problemas potenciais no transporte de óleo devido ao resfriamento, tentando reproduzir em laboratório as condições de produção do campo de *Troll* na Noruega. Os estudos feitos para deposição de parafina determinaram que, após a cristalização, ela depende fortemente do número de Reynolds e da diferença de temperaturas entre o óleo escoando e a parede do duto. Eles concluíram que um elevado gradiente de temperatura aumenta as condições de precipitação, devido ao fato que o mecanismo de difusão molecular é incrementado como resultado da concentração de parafina líquida gerada pelo gradiente de temperatura. Por outro lado, em relação à vazão como variável no processo de deposição, eles afirmaram que a máxima deposição de cristais é esperada na faixa de transição do número de Reynolds (entre 2000 e 4000). Afirmaram também que para escoamento em regime turbulento a deposição diminui e é limitada pela remoção de cristais.

MAJJED et al., (1990) desenvolveram um modelo termodinâmico para cálculo da formação e deposição de parafinas utilizando um novo método de análise do óleo, por eles desenvolvido. Realizaram também testes experimentais em laboratório e analisaram alguns dados de campo. Para seu modelo consideraram apenas difusão molecular.

HAMOUDA e RAVNOY (1992) simularam a deposição de parafinas e compararam seus resultados com dados de campo, objetivando explicar o comportamento da perda de carga nas linhas. Os resultados obtidos apresentaram uma discrepância significativa em magnitude, mas a curva de pressão x tempo simulada refletiu o mesmo comportamento que sua correspondente no campo. Uma alteração na rugosidade do depósito permitiu encontrar resultados da ordem de 10% de concordância entre as curvas.

HAMOUDA e VIKEN (1993) estudaram a deposição sobre efeito de pressões elevadas. Fizeram uso do modelo termodinâmico desenvolvido por HANSEN et al. (1988) para checar os dados obtidos em suas experiências. Observaram que ambos forneciam resultados opostos quando sobre a ação de pressões elevadas.

BROWN et al. (1993) desenvolveram um modelo numérico para prever as taxas de deposição de parafinas em linhas de petróleo e realizaram testes para validá-lo. Seu modelo considerava apenas a difusão molecular como mecanismo de deposição.

Concluíram em seus testes que ao aumentar a taxa de cisalhamento, diminui a razão de deposição e aumenta a quantidade sólida no depósito, ou seja, diminui a porosidade. Verificaram também a eficiência dos inibidores de parafina, observando que a maior parte dos inibidores testados não afeta a deposição e outros chegam até a aumentar a deposição. Simularam também situações de *start-up* de linhas e sua influência na deposição.

HSU et al. (1994) realizaram testes de deposição para condições de escoamento turbulento submetido a elevada pressão. A seção de testes foi projetada com o fim de estudar diferentes regimes de escoamento, composições de óleo e testar diferentes inibidores químicos. A partir dos resultados experimentais concluíram que a deposição de parafinas depende da composição do óleo, das temperaturas do óleo e da parede do duto, das condições de escoamento, da dimensão da tubulação, do seu isolamento e da pressão do sistema. Eles afirmaram que a diminuição da temperatura do óleo abaixo da temperatura do ponto de névoa aumentará a potencialidade do problema de deposição em um duto. Estudos sobre o comportamento do óleo usado, submetido a temperaturas menores que o ponto de névoa, revelaram que o óleo pode ainda continuar com um comportamento Newtoniano. A taxa de deposição de parafinas para os testes feitos nessas temperaturas críticas foi menor durante o comportamento Newtoniano do óleo e aumentaram ao mudar seu comportamento para pseudoplástico. Também foi concluído que o aumento da viscosidade (mudança do coeficiente de atrito) em testes feitos a baixas temperaturas resultou em camadas menores de depósito devido ao incremento da remoção de cristais por cisalhamento.

Foram também realizados testes para avaliar o impacto da remoção de cristais por cisalhamento. No início dos testes o óleo escoando em vazões pequenas era resfriado permitindo a precipitação de cristais. O incremento da vazão, e, portanto da taxa de cisalhamento, causava a remoção de cristais reduzindo a camada depositada até atingir uma espessura de equilíbrio. Baseados nessas observações, concluíram que a deposição de parafinas pode ser reduzida significativamente em condições de escoamento turbulento.

HAMOUDA e DAVIDSEN (1995) realizaram experiências para regimes laminar e turbulento com o objetivo de verificar a importância dos mecanismos de deposição por difusão molecular e dispersão por cisalhamento. Eles projetaram uma seção de testes com três seções diferentes dispostas em série, nas quais o fluido era submetido a diferentes condições de temperatura.

Partindo da consideração de que a difusão molecular é o mecanismo de deposição mais importante, decidiram testar a relevância da dispersão por cisalhamento para uma vazão fixa em que eles acharam previamente uma máxima taxa de deposição de cristais. Para esse teste o óleo entrava na primeira seção com uma temperatura maior que o ponto de névoa. Nessa seção o óleo era resfriado até atingir uma temperatura menor que o ponto de névoa gerando a deposição de parafinas. A temperatura de saída do óleo da primeira seção (menor que a TIAC) garantia que o óleo entrasse na segunda com cristais em suspensão. Na segunda seção (a mais importante) tentava-se garantir um fluxo de calor nulo, para finalmente na terceira seção ser restabelecido o resfriamento gerando novamente a deposição de cristais. Se a dispersão por cisalhamento fosse um mecanismo relevante na deposição de parafinas, uma quantidade razoável de depósito deveria ser encontrada para as condições de teste da segunda seção (fluxo de calor nulo). Nessa seção de interesse, não foi visualizado depósito mensurável para condições de fluxo zero. Os autores concluíram então que a dispersão por cisalhamento não é o mecanismo responsável pelo transporte de cristais em suspensão na direção da parede, enfatizando que um fluxo nulo gera uma distribuição de cristais num duto relativamente homogênea. HAMOUDA e DAVIDSEN (1995) compartilham a mesma conclusão dada por BURGER (1981) na qual afirmam que a dispersão por cisalhamento poderia ser um mecanismo de transporte lateral em condições de elevadas concentrações de cristais perto da parede (geralmente causada por um resfriamento).

RIBEIRO (1996) desenvolveu um estudo da deposição de parafina em poços de petróleo, simulando as condições de campo de um determinado reservatório em produção. No modelo numérico foi considerado o mecanismo de deposição por difusão molecular em escoamento laminar com estudo de deposição no sentido axial. Concluiu que a deposição de parafina é fortemente função da temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) do óleo. Os resultados obtidos experimentalmente para TIAC foram muito distintos com relação à TIAC obtida através do DSC e da viscosidade.

KOK et al. (1996) realizaram um estudo experimental para determinação da TIAC com quinze diferentes amostras de óleos através de Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC), técnicas de microscopia e viscosimetria. Mostraram que não é possível afirmar qual é a melhor técnica para determinar a TIAC devido à grande diversidade de óleos e mostraram que o DSC obtém melhores resultados que as técnicas de microscopia e viscosimetria.

PAN et al. (1997) estudaram os efeitos da composição e da pressão sobre a temperatura do ponto de névoa e a quantidade de parafina precipitada. Concluíram que as n-parafinas precipitam facilmente, seguida pelos naftenos e iso-parafinas enquanto que os aromáticos permanecem na fase líquida e não estão presentes na parafina. Além disto, mostraram que o ponto de névoa era fortemente influenciado pelas n-parafinas pesadas enquanto que a quantidade de parafina precipitada dependia da concentração de n-parafina assim como isoparafinas e naftenos.

ROCHA (1997) realizou em escala de laboratório experimentos com condicionador magnético usando soluções de petróleo cru e uma mistura de parafinas. Determinou os parâmetros de viscosidade aparente, ponto de fluidez, Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais (TIAC), densidade e morfologia de cristais antes e após o tratamento magnético, sendo observado que campos magnéticos reduzem a viscosidade aparente das amostras em temperaturas próximas à TIAC.

CREEK et al. (1999) projetaram experiências com o objetivo de determinar os efeitos da temperatura e da vazão sobre a taxa de deposição e as características do depósito. Eles propuseram que a deposição de parafinas é gerada na camada limite laminar para condições de escoamento turbulento, e na região de baixas velocidades para condições de escoamento laminar. Cinco diferentes técnicas foram empregadas para estimar a espessura da camada depositada (diferença de pressão, balanço de energia, variação de volume no interior da seção de testes, ultra-som e medição direta). Mesmo assim, os resultados da estimativa da espessura mostraram uma considerável dispersão, revelando que a estimativa da espessura do depósito é realmente uma tarefa difícil. As experiências realizadas variando a diferença entre a temperatura do óleo e a da parede fria, concluíram que o fator gradiente de temperatura  $dT/dr$  é diretamente proporcional à taxa de deposição para ambos os regimes laminar e turbulento. Os testes feitos para diferentes taxas de cisalhamento concluíram que a remoção por cisalhamento deve ter uma influência importante quando as taxas de cisalhamento são aumentadas. A camada de depósito formada para condições de escoamento turbulento foi significativamente mais resistente e com menor conteúdo de óleo que a camada formada em condições laminares. Por outro lado, elevados gradientes de temperatura geravam camadas mais macias que os pequenos gradientes, o que foi atribuído ao fato que gradientes pequenos ocasionam somente a deposição dos componentes mais pesados. A espessura da camada de depósito para condições de escoamento laminar foi consideravelmente maior que aquela obtida para regime turbulento. Isso revela, uma vez

mais, a participação do cisalhamento como possível mecanismo de remoção de depósito.

Foi realizado adicionalmente um teste para condições de fluxo nulo para avaliar a relevância do mecanismo de dispersão por cisalhamento e sua contribuição na deposição de cristais precipitados. Um teste inicial feito em condições de escoamento laminar resultou em um depósito desprezível. O teste feito em regime turbulento nas mesmas condições de temperatura do anterior não mostrou deposição alguma. A aparente deposição achada nas condições de escoamento laminar foi atribuída a possíveis erros na medição de temperatura. Assim, poderiam ter ocorrido na experiência, fluxos de calor negativos não detectados que, como é sabido, produzem a difusão molecular. Finalmente eles concluíram que em condições de fluxo de calor nulo não é produzida deposição de parafinas.

SINGH et al. (2000) propuseram um mecanismo para explicar o envelhecimento dos depósitos de parafina e desenvolveram um modelo matemático para prever o crescimento e o conteúdo de parafina do depósito. Os resultados obtidos tiveram excelente concordância entre a teoria e os experimentos para finas camadas de gel. O fluido utilizado foi uma mistura de parafina e óleo refinado e seu modelo considerava apenas a difusão molecular como mecanismo de deposição e o processo era assumido quase-permanente. Seu modelo numérico previu a deposição de parafina no sentido axial ao escoamento e concluíram que quanto maior o gradiente de temperatura, mais espesso se torna o depósito.

IRIGON (2002) estudou o escoamento de uma mistura de óleo e parafina através de um tubo cilíndrico, simulando as condições de extração de petróleo em águas profundas. Foi construída uma bancada possibilitando controlar a pressão e temperatura na entrada da seção de testes. Foram realizados testes mantendo a pressão ou vazão constantes. Foi mostrado que sob certas condições é possível a formação de um material estruturado tenro e de fácil remoção, inclusive pelo próprio escoamento, inibindo a obstrução das linhas por difusão molecular.

SARMENTO (2002) estudou a viabilidade técnica de um procedimento para remoção de bloqueios ocasionados por depósitos de parafina. Nesse procedimento, a seção da linha de petróleo obstruída com parafina é aquecida por indução utilizando-se uma bobina externa posicionada sobre a linha no fundo do mar. Conclui-se que as linhas flexíveis comerciais podem ser aquecidas por indução e podem transferir o calor para o desbloqueio de parafina no interior da linha.

SANTOS (2002) estudou a formação do depósito de parafina através da metodologia de dedo frio baseada em desenvolvimento de Nývlt. Para avaliação de incrustações a partir de misturas binárias. O trabalho estendeu a referida metodologia para a parafinação de petróleo. Iniciava-se aplicando análise dimensional do processo referente ao simulador estático e em seguida estudava-se a utilização do Calorímetro Diferencial de Varredura, ou DSC (Differential Scanning Calorimetry). Como ponto básico, fez-se uma revisão do processo de deposição de parafina, enfocando o processo de cristalização em solução.

Apresentou assim argumentos que indicam uma metodologia alternativa à utilização do conceito da TIAC (Temperatura Inicial de Aparecimento dos Cristais). Esse conceito não é suficiente para prever a formação das incrustações, pois essa formação é afetada pela velocidade de resfriamento do petróleo, implicando na pouca nitidez em que ocorre o início da formação dos cristais. Concluiu-se que quanto mais alta for a taxa de resfriamento, menor será a temperatura de nucleação ou TIAC, mostrando que deve-se ter muita cautela na utilização da metodologia que tem sido normalmente empregada para o DSC.

A utilização do DSC ainda mostrou a influência da velocidade de resfriamento na largura da zona metaestável, conforme a literatura. Quanto maior a taxa de resfriamento maior a largura da zona metaestável.

A metodologia do Nývlt permite estimar o tempo de incrustação crítico e a diferença de temperatura crítica, mas não foi possível estabelecer uma correlação entre a temperatura em que o fluido se encontra no copo e a temperatura do dedo frio. Desta forma, a existência de parafinas antes de se atingir a temperatura de nucleação pode causar uma variação na supersaturação efetiva, acarretando uma nucleação na superfície resfriada seguida do crescimento cristalino. O mesmo se pode dizer em relação ao tempo crítico, pois a provável presença de parafina no seio do fluido ajuda na aderência na superfície resfriada e contribui para um crescimento irregular da camada. Isso pode levar a uma mudança no coeficiente de transferência de calor do seio do fluido, influenciando na resistência térmica.

LEIROZ (2004) direcionou o seu trabalho para estudos de caráter fundamental buscando, mediante experimentos simples, tentar contribuir com o melhor entendimento dos mecanismos fundamentais responsáveis pela deposição de parafinas em dutos.



Suas primeiras experiências consistiram no estudo do fenômeno de deposição em cavidades com fluido estagnado. O aparato experimental usado consistiu em uma cavidade retangular, feita de vidro, com as paredes dos extremos de cobre que atuavam como aletas condutoras, que permitiam impor um gradiente de temperatura controlado. As paredes de vidro foram projetadas com a idéia de acompanhar visualmente o fenômeno de deposição, tentando detectar alguma movimentação dos cristais devido ao gradiente de temperatura imposto. Com esse aparato experimental foram testadas diferentes condições de temperatura, obtendo-se a evolução temporal da espessura do depósito. Um modelo numérico para simular essas experiências de fluido estagnado foi baseado em difusão molecular como único mecanismo de deposição. Os resultados mostraram que o modelo difusivo subestimou os perfis de deposição indicando que outros mecanismos além da difusão molecular poderiam estar agindo.

Seguindo a filosofia de estudarem-se problemas com grau crescente de dificuldade, foram realizadas experiências de deposição sobre escoamento laminar. A seção de testes consistia num canal retangular com duas paredes de vidro que permitiam a visualização, e duas de cobre para controlar a temperatura. O fluido usado foi uma solução de 90% de óleo *spindle* e 10% de parafina comercial, com propriedades bem conhecidas. Os testes foram realizados todos com temperaturas de injeção do fluido acima do ponto de névoa submetido a diferentes condições de resfriamento. Os perfis da evolução temporal e espacial dos depósitos de parafina foram obtidos para os diferentes casos, com a finalidade de serem comparados com modelos de simulação numérica. Os resultados obtidos nesses testes de deposição revelaram uma perfeita simetria entre as camadas de depósitos obtidas nas paredes superior e inferior do canal, indicando que os efeitos gravitacionais são irrelevantes no processo de deposição. Não foi observada qualquer evidência de movimento de cristais na direção da parede fria, evidenciando que a difusão Browniana não estava presente.

VENKATESAN et al. (2005) realizaram um estudo reométrico de um sistema modelo para estudar a intensidade da força dos géis formados de parafina – óleo abaixo da variação cisalhante e da história térmica. Foi observado que a intensidade da força do gel parafina – óleo é uma função complexa da composição do gel, do cisalhamento e da história térmica abaixo no qual o gel tenha sido formado. Os cristais de parafina são observados para formar estruturas de plaqueta que crescem em duas dimensões. Quando o gel é formado abaixo do resfriamento *shut in*, a intensidade da força diminui com o aumento da taxa de resfriamento.

TODI (2005) desenvolveu um modelo numérico baseado em experiências realizadas com a finalidade de estudar a deposição de parafinas em condições de escoamento, e com temperaturas de injeção do óleo menores que o ponto de névoa (na presença de cristais em suspensão). A finalidade desse estudo foi avaliar os mecanismos de deposição de cristais já formados e suspensos na solução. O aparato experimental era formado por um duto circular posicionado em um ambiente, com a temperatura controlada por um termostato que possuía uma incerteza de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Esse duto foi construído de acrílico para possibilitar a visualização da formação de camadas de depósito de parafina. O fluido usado foi uma mistura de querosene, óleo mineral e parafina industrial. Assim, com essa composição conseguiu que o modelo de óleo preparado apresentasse um comportamento pseudoplástico quando resfriado em temperaturas menores que a TIAC. A TIAC da solução utilizada por Todi foi medida em  $10,9^\circ\text{C}$ .

O estudo do escoamento foi realizado utilizando a técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*), com que foram obtidos os perfis de velocidades para as diferentes condições de escoamento estudadas. Para o estudo da concentração de cristais devido ao cisalhamento foi usada uma técnica chamada *Laser Light Scattering*, que consistiu na iluminação da região de estudo da tubulação mediante um plano de luz emitido por um laser, acompanhando a visualização com uma videocâmara. Com essa técnica, Todi observou que os cristais de parafina migram para uma região anular perto da linha central da tubulação. Ao mesmo tempo ele visualizou esses cristais difundindo para regiões de menor concentração como resultado da difusão Browniana. O estudo do efeito da taxa de cisalhamento na distribuição de cristais revelou que elevadas taxas de cisalhamento faziam com que a concentração anular de cristais ficasse mais perto da linha central do duto. Foi concluído que as diferentes temperaturas do fluido e as diferentes condições de fluxo de calor a que é submetido, não influenciam significativamente a distribuição de cristais na tubulação.

As experiências de deposição de parafina com temperaturas de injeção do fluido e da parede abaixo do ponto de névoa resultaram em deposição para as três condições de fluxo de calor (nulo, positivo e negativo). Para o caso de fluxo zero e positivo, as camadas de depósito visualizadas foram muito finas e os tempos de formação de depósito para alguns casos foi de até 3 dias.

O teste realizado para fluxo de calor positivo foi projetado inicialmente com uma temperatura de injeção de  $5^\circ\text{C}$  e temperatura ambiente de  $22^\circ\text{C}$ . Essa temperatura

do ambiente gerava uma temperatura da parede do duto de 13,5°C (maior que a TIAC). Para três dias de teste não foi encontrado material depositado. Um segundo teste diminuindo a temperatura do ambiente para 15°C gerou uma temperatura de parede de 9°C (menor que a TIAC), resultando em uma camada de depósito muito fina e homogênea visualizada depois de três dias. De ambos dos testes concluiu-se que a deposição em condições de fluxo positivo ocorre se ambas as temperaturas de injeção do óleo e da parede encontram-se abaixo da TIAC.

Os testes para fluxo de calor nulo foram realizados para alta e baixa concentração de cristais. A alta concentração de cristais foi gerada com as temperaturas de injeção e do ambiente, iguais a 5°C. Com essa temperatura, uma camada visível de depósito foi encontrada após 8 h. Por outro lado, o teste com baixa concentração de cristais foi feito para a temperatura de 9°C. Nessas condições, a deposição de cristais foi visualizada a jusante da tubulação na metade inferior após o 3º dia. Uma experiência adicional com maiores taxas de cisalhamento para as mesmas condições de temperatura do teste com alta concentração de cristais, não resultou em deposição para um tempo de experimento de três dias. Isso revelou uma vez mais que o aumento da taxa de cisalhamento pode ocasionar a remoção de cristais.

As conclusões de Todi, sobre os resultados dos testes para fluxo de calor zero, consideraram que a deposição por gravidade é um possível mecanismo responsável pelo transporte de cristais, especialmente em condições de vazão muito pequena. Afirmou também que na ausência de difusão de parafina dissolvida devido ao fluxo de calor nulo, alguma forma de transporte de partículas na direção da parede devia ser responsável pelo depósito.

O fluxo de calor negativo foi avaliado com a temperatura de injeção de 5°C e a temperatura do ambiente de 0°C. Um depósito fino e contínuo foi visualizado após 7 horas. Nessas condições, a difusão de parafina dissolvida cumpre uma função relevante devido ao gradiente de temperatura imposto. A formação de finas camadas de depósito foi atribuída a que um material de baixa condutividade térmica como o acrílico (material do duto) gera um isolamento natural. Por outro lado, o aumento da taxa de cisalhamento para esse teste resultou em camadas descontínuas de depósito, evidenciando a remoção de material depositado causado pelo aumento da vazão.

Assim, das experiências realizadas variando-se as taxas de cisalhamento, foi concluído que um aumento da vazão gera sempre uma redução da espessura da camada de parafina depositada causada pela remoção por cisalhamento. O autor conclui que a

dispersão por cisalhamento é um mecanismo importante e possível de estabelecer um perfil de concentração de cristais na tubulação (levando os cristais longe da parede), afirmando que esse mecanismo não é responsável pelo transporte de cristais na direção da parede. Finalmente fazendo referência aos testes para fluxos positivo e nulo, foi concluído que a deposição por efeitos gravitacionais e principalmente por difusão Browniana poderiam ser os mecanismos responsáveis pelo transporte de cristais na direção da parede.

ROMERO (2005) realizou uma análise numérica do processo de deposição da parafina em dutos retangulares considerando a difusão molecular como único mecanismo responsável pela deposição. Foram consideradas duas formulações para modelar a taxa de transporte de parafina para a parede do duto. A primeira formulação utiliza uma versão modificada da equação da Lei de Fick para difusão, a qual é reescrita em termos de quantidades diretamente mensuráveis como massa específica da parafina sólida, área de deposição, coeficiente de difusão da parafina líquida, coeficiente de solubilidade e gradiente da temperatura na interface. A segunda formulação utiliza a equação de Fick para difusão, baseada em gradientes de concentração da espécie química. A primeira formulação conduz a um modelo unidimensional e a segunda a um modelo bidimensional. Foi observada a boa concordância das espessuras de deposição ao longo do canal para a condição de regime permanente, porém as previsões transientes geradas pelo modelo desenvolvido ficaram significativamente abaixo dos resultados experimentais, indicando que poderia haver outro mecanismo atuando em conjunto com a difusão molecular. Os resultados numéricos de ROMERO (2005) foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente por LEIROZ (2004).

Além do modelo unidimensional implementado, também foi utilizado um modelo bidimensional, mostrando que a deposição de parafina pode ser influenciada por outro mecanismo além da difusão molecular.

PLASENCIA (2006) realizou experiências de visualização do fenômeno de deposição, para uma solução óleo-parafina com propriedades conhecidas e submetida a condições de escoamento bem controladas. As experiências foram realizadas em condições de regime laminar e na presença de cristais em suspensão para as diferentes condições de fluxo de calor (nulo, positivo e negativo) com a finalidade de estudar a relevância dos mecanismos de deposição de cristais precipitados como a difusão Browniana e a dispersão por cisalhamento. Foi verificado que os testes feitos para condições de fluxo de calor nulo e positivo não resultaram em deposição, o que

evidenciou que é necessário um fluxo de calor negativo para que esse fenômeno aconteça. Por outro lado, os experimentos para condições de fluxo de calor negativo resultaram em espessas camadas de depósito, podendo ser obtida a evolução temporal e espacial dos perfis para cada uma das condições de resfriamento estudadas.

O aumento da taxa de cisalhamento em experiências com escoamento realizadas para as mesmas condições de temperatura resultou em menores camadas de parafina depositada, evidenciando a possível presença de um mecanismo de remoção de cristais depositados por cisalhamento. Resultados da visualização dos experimentos realizados para condições de fluxo de calor negativo mostraram a movimentação de cristais suspensos escoando perto da parede e sendo adicionados ao depósito. As maiores taxas de deposição são mostradas em condições de baixas taxas de cisalhamento e que elevadas taxas de cisalhamento podem evitar que cristais já formados e suspensos no escoamento possam ser depositados na parede fria.

Muitos modelos termodinâmicos foram propostos para descrever o equilíbrio (HANSEN et al., 1988; COUTINHO et al., 1995; COUTINHO, 1999). O modelo desenvolvido por COUTINHO (1999) e modificado por SINGH et al. (2001) descreve o sistema termodinâmico de parafina – óleo. Ainda podemos citar BUTLER e MacLEOD (1961), WON (1986), WEINGARTEN (1986), PEDERSEN et al. (1991), PEDERSEN (1995), SVENDSEN (1993), ERICKSON et al. (1993), COUTINHO et al. (1996), COUTINHO et al. (2001), PAN et al. (1997), COUTINHO e DARIDON (2001), COUTINHO et al. (2002), DARIDON et al. (2001), LEONTARITIS E LEONTARITIS (2003).

Alguns desses modelos propostos na última década apresentam diferentes graus de sucesso. Embora alguns desses sejam utilizados atualmente na indústria do petróleo, eles ainda não são satisfatórios. Segundo COUTINHO et al. (2001), do ponto de vista teórico, a maioria dos modelos foi baseada em hipóteses erradas no que diz respeito à natureza da fase sólida. Alguns autores trataram a solução sólida como uma fase sólida ideal (ERICKSON et al. (1993)). Alguns modelos consideraram a co-precipitação de aromáticos e naftênicos ajustando as propriedades termofísicas do componente puro (PEDERSEN et al. (1991)) e todos os modelos falharam claramente quanto ao comportamento do material sólido. COUTINHO et al. (2001) propuseram a utilização de um modelo para descrever a não idealidade da fase sólida baseado em um modelo já existente.

O modelo proposto por COUTINHO et al. (2002) é baseado diretamente em dados termodinâmicos precisos. COUTINHO et al. (2002) afirmaram que os modelos desenvolvidos por WON (1986), HANSEN et al. (1988), WON (1989), RØNNINGSEN et al. (1991), PEDERSEN et al. (1991), ERICKSON et al. (1993), PAN et al. (1997) propuseram várias correlações para prever os parâmetros termodinâmicos, mas não existe evidência experimental direta para mostrar que as suposições feitas estão corretas. Em vez disso, esses autores dependem de dados experimentais para a formação de parafina para validar seus modelos, predominantemente medidas da temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC).

Para tornar os cálculos de parafina melhor fundamentados, COUTINHO et al. (1996) desenvolveram um modelo baseado diretamente em dados de laboratório de alta qualidade para as propriedades de hidrocarbonetos líquido e sólido e suas misturas. Dando continuidade a esse trabalho, COUTINHO mostrou que esse modelo prevê com exatidão o comportamento parafínico para óleos diesel (COUTINHO et al. (2000)) e petróleos (COUTINHO e DARIDON (2001)). COUTINHO e DARIDON (2001) mostraram que bons resultados podem ser obtidos assumindo-se a fase líquida como uma solução ideal. Existe uma escassez de dados sobre a formação de parafina para petróleos. Recentemente, DARIDON et al. (2001) apresentaram dados para dois petróleos do Mar do Norte que incluíam análises de n-parafinas com incertezas para a temperatura inicial de aparecimento de cristais da ordem de 2K.

BIDMUS e MEHROTRA (2004) investigaram a deposição de parafina de uma mistura ( $C_{20}$ - $C_{40}$ ) dissolvida em n-dodecano ( $C_{12}$ ). Um novo banho foi desenvolvido no qual o fluxo da mistura “quente” mantinha a homogeneização através de uma hélice axial e a deposição ocorria na parte interna quando em contato com a superfície “fria” de um tubo. Os efeitos da composição da mistura, taxa de cisalhamento, tempo de residência, e temperatura da deposição foram estudados no estado pseudo-estacionário. Confirmou-se que o modelo de transferência de calor no estado estacionário estava de acordo com os dados experimentais do processo de deposição de parafina e que controle primário do depósito era feito através da transferência de calor.

A quantidade de parafina depositada encontrada aumentou de acordo com o número de carbono da mistura ( $C_{12}$ ), assim como, com a diminuição da corrente quente. A massa de sólido depositada, não necessariamente, era proporcional à diferença entre o fluxo quente e frio.

JENNINGS e WEISPFENNIG (2005) estudaram o efeito de dois fatores no processo de deposição: cisalhamento e temperatura. Foram realizados experimentos com dedo frio, que se mostrou simples para aproximação da realidade nas linhas de escoamento. Embora os resultados obtidos não representem o resultado real da deposição nas linhas de escoamento, os valores obtidos mostram como a deposição varia com as mudanças de condições de temperatura e tamanho do dedo frio. No estudo, foi aplicado um aumento do cisalhamento (velocidade de agitação) resultando numa diminuição na quantidade de depósito no dedo frio e principalmente a redução da quantidade de óleo contido no depósito. A quantidade de parafina nos depósitos era determinada como sendo constante, dentro da variação da agitação estudada. Porém, a concentração de parafina aumentou com o aumento do cisalhamento, por causa da redução da quantidade de óleo dentro do depósito. O aumento do gradiente de temperatura entre o óleo e a superfície fria, levou a um aumento do depósito (parafina e óleo). A concentração dentro do depósito do óleo foi observada para um aumento da taxa de deposição. Consequentemente, maior concentração de óleo acontece para maior gradiente de temperatura.

KYOTOKU et al. (2006) apresentaram um modelo matemático e resultados de simulação computacional com base no balanço de energia para estimar o perfil de temperatura, um modelo termodinâmico para prever o equilíbrio de fases e um balanço de massa para prever a quantidade de parafina depositada na parede interna do duto. Um aplicativo computacional de fácil utilização foi desenvolvido em MATLAB para simulação computacional do fenômeno. Perfis de temperatura e deposição no duto foram obtidos como resultado das simulações. Segundo os autores os resultados se mostraram bastante consistentes, quando comparados com resultados existentes na literatura.

CHEN e ZHAO (2006) desenvolveram um modelo termodinâmico modificado de equilíbrio sólido-líquido para calcular a precipitação de parafina como função da temperatura e da composição em sistemas de petróleo. Foi feita uma aproximação termodinâmica molecular baseada na teoria da solução regular. Foram levados em conta os efeitos da transição sólido-sólido nas constantes de equilíbrio. A quantidade de parafina precipitada em diferentes temperaturas do presente modelo se aproximam dos resultados experimentais, sendo esse resultado apresentado melhor que obtido pelo modelo de LEELAVANICHKUL (2004).

Novas correlações para a entalpia de fusão e temperatura de transição sólido-sólido e entalpia dos n-alcenos foram obtidas. As entalpias de fusão dos n-alcenos são divididas em quatro componentes que correspondem às quatro estruturas cristalinas, assim, a entalpia de fusão obtida estava em concordância com os dados de entalpia encontrados na literatura. Para as propriedades da transição sólido-sólido, foram desenvolvidas correlações com polinômios de terceira ordem como função do número de carbonos.

CORRERA et al. (2007a) fizeram um trabalho focalizado na deposição de sólidos nas paredes de tubos durante o transporte de óleo. Foi observado que quando a temperatura externa é mais baixa que a TIAC, ocorre solidificação na parede, acarretando a deposição. A deposição da parafina foi modelada num tubo com escoamento turbulento, levando em consideração somente o mecanismo de difusão molecular para essa deposição. A possível desaturação do óleo foi incluída no modelo, embora os dados de campo disponível não mostrem esse fenômeno. A camada de limite laminar foi calculada e com as condições de contorno da parede foi obtido o perfil de temperatura no *bulk*. O conhecimento do gradiente térmico da camada limite foi essencial para obter uma expressão explícita da taxa de deposição devido à difusão molecular.

DALIRSEFAT e FEYZI (2007) desenvolveram um modelo termodinâmico baseado na teoria de fases sólidas múltiplas. Nesse modelo são calculadas as fugacidades das fases vapor e líquida usando a equação de estado de Peng Robinson Modificada (MPR). As fugacidades da fase sólida para componentes puros são calculadas indiretamente através da equação de estado pela razão das fugacidades. Propriedades das frações são calculadas usando a análise química dos compostos parafínicos, naftênicos e aromáticos e uma correlação é desenvolvida para avaliar a entalpia de fusão. A pesquisa visou desenvolver um modelo termodinâmico computadorizado para a TIAC e a quantidade de parafina depositada em misturas de petróleo. O modelo foi aplicado para calcular a temperatura inicial de aparecimento de cristais e a quantidade depositada de parafina em petróleos do Mar do Norte e sintético.

MERINO-GARCIA et al. (2007) analisou experimentalmente a importância do transporte convectivo axial e a gelatinização do óleo na superfície fria, ou seja, a mudança de líquido para gel induzida pela variação da temperatura. Não descartando o processo de difusão molecular, os autores deram maior importância à formação de gel (a formação de gel é mais rápida que a difusão molecular). Foi empregado um aparato



experimental para medir a cinética de formação de gel em uma mistura modelo e em um óleo estocado. Os dados obtidos foram modelados através da solução clássica para o problema da transferência de calor na condução.

Nesse trabalho, foi verificado que a espessura do depósito é controlada, principalmente, pela parafina gelatinosa transportada axialmente. O processo de formação do gel foi estudado experimentalmente e teoricamente com base na transferência de calor. Verificou-se que o crescimento do depósito é inibido pela ação combinada de transferência de calor e do efeito cisalhante.

CHEN et al. (2007) desenvolveram um novo modelo termodinâmico para prever o equilíbrio de fases do petróleo. Foram usadas as equações SRK EOS (*Equation of State*) modificada e UNIQUAC para descrever as fases vapor, líquida e sólida (parafina), respectivamente. Foram introduzidas novas correlações para calcular o parâmetro de volume no SRK EOS e o calor de vaporização nas equações do UNIQUAC. O modelo descreve os sistemas que contêm frações parafínicas, naftênicas e aromáticas. Novas correlações para entalpia, temperatura de transição sólido-sólido e entalpias de fusão das parafinas foram estabelecidas baseadas em dados obtidos na literatura. O modelo modificado proposto prediz a precipitação de parafina em fluidos de hidrocarbonetos para três sistemas de petróleo. Os resultados obtidos foram comparados com observações experimentais e esses resultados obtidos foram usados em modelos de solução. Assim, em sistemas complexos como o de precipitação de parafina esse novo modelo pode ser usado.

CORRERA et al. (2007b) mostraram como obter a difusividade da parafina e os valores de sua solubilidade em petróleos a partir das medidas de depósito em aparato de dedo frio com agitação. O modelo apresentado permite determinar a solubilidade da parafina e a difusividade a partir dessas medidas experimentais. Segundo os autores, tais parâmetros são de crucial importância para determinar as taxas de deposição em oleodutos.

A transferência de parafina dissolvida para a parede do dedo frio, cuja força motriz é a difusão molecular, ocorre numa camada limite na qual o perfil de temperatura é calculado em função da geometria do aparato e do coeficiente de transferência de calor, expresso como uma função velocidade de agitação e das propriedades físicas do petróleo. A formação do depósito é discutida como um processo de duas etapas. Na primeira etapa o óleo é saturado pela parafina e na segunda etapa não. O modelo prediz que a taxa de deposição é constante durante a primeira etapa e permite obter o tempo de

transição para segunda etapa. A evolução da concentração de parafina durante o regime insaturado é calculada, mostrando que a massa de parafina depositada tende exponencialmente para seu limite assintótico. Usando dados experimentais foram deduzidos valores para a solubilidade das parafinas e suas difusividades, que permitem estimar o crescimento do depósito em determinadas condições experimentais.

EDMONDS et al. (2008) simularam a deposição de parafina em oleodutos onde a fase sólida é representada como uma distribuição contínua de componentes de parafinas normais. São obtidas as propriedades termodinâmicas da parafina usando um modelo termodinâmico previamente desenvolvido. Foi também adotado um modelo de transferência de massa para obter a provável taxa de deposição de parafina.

Foi definido no trabalho que o cisalhamento da camada de parafina pode ser uma parte importante do mecanismo de deposição nas condições reais dos oleodutos.

Houve dificuldade de interpretação dos resultados físicos na experiência devido ao número de processos envolvidos. Não foi possível tratar cada efeito isoladamente, tais como os coeficientes de transferência de calor, massa, crescimento do depósito, propriedades da parafina e do óleo, etc. O resultado do modelo pode ser comparado com os resultados experimentais, mas foi difícil analisar a precisão das suposições individuais dentro da simulação.

ISMAIL et al. (2008) investigaram o efeito de aplicar movimento oscilatório na deposição de parafina usando um tubo oscilatório com chicanas, ou seja, uma tecnologia relativamente nova que oferece uma mistura mais uniforme e sólidos em suspensão quando comparada com os dispositivos tradicionais. Outro assunto tratado é o entendimento do mecanismo da cinética de cristalização da parafina de acordo com a teoria de Avrami.

A deposição de parafina foi determinada gravimetricamente e os resultados obtidos indicam que o movimento oscilatório possui dois efeitos opostos na porcentagem da deposição de parafina: para baixa concentração de parafina em solução, a presença da oscilação reduz significativamente a deposição de parafina, de 40-60% e impede a formação de gel em 100% dos casos. Porém, para alta concentração de parafina o movimento oscilatório não só promove a deposição da parafina como também aumenta a velocidade de crescimento do cristal até atingir 100% dessa deposição.

BANKI et al. (2008) desenvolveu um modelo matemático rigoroso para escoamento em fluxo laminar para prever a deposição de parafina em oleodutos para

multicomponentes. A deposição transiente de cada componente foi calculada através do acoplamento da equação de momento, energia e das equações de balanço de cada espécie, com um modelo termodinâmico de precipitação local de parafina. A formulação da entalpia foi baseada em uma aproximação *fixed-grid* para o escoamento convectivo na camada de gel. A expressão do fluxo de difusão usada inclui difusão molecular (sendo a força motriz do gradiente de concentração) e difusão térmica (sendo a força motriz o gradiente térmico) com coeficientes de difusão apropriados. Esses dois gradientes não são proporcionais na camada de gel. O gradiente térmico é alto perto da parede do tubo e o gradiente de concentração, por causa da mudança de fase, é alto na interface da região da fase líquida com a camada de gel.

Foi utilizada uma aproximação de entalpia-porosidade, que leva em conta a desaceleração do fluxo na camada de gel, considerada como um meio pseudo-poroso. Um termo fonte do tipo Darcy é acrescentado às equações de quantidade de movimento. Este termo fonte é função da porosidade (saturação do óleo) na camada de gel. Na fase líquida essa função é zerada e a velocidade é calculada pela equação de quantidade de movimento. Na camada de gel, o termo fonte aumenta gradualmente com a função tipo Carman–Koseny. Um aumento no termo fonte leva a uma diminuição do campo de velocidade.

Foi apresentado um algoritmo numérico detalhado para resolver o modelo matemático. A equação de quantidade de movimento foi acoplada à equação de balanço de massa, sendo resolvido pelo Método SIMPLER, para aproximar o campo de pressão e velocidade. A equação de energia é discretizada por um esquema de volumes finitos e linearizada pelo Método de Newton-Raphson (NR). A entalpia líquida é relacionada com a temperatura utilizando a equação de PR-EOS. Também foi apresentado um algoritmo para o equilíbrio sólido-líquido, o qual usa o Método Sucessivo-Substituição-Iteração SSI ou o Método NR.

### **2. 3. Mecanismos da Deposição**

O fenômeno de deposição é governado por três eventos bem definidos: cristalização, transporte de massa da fase *bulk* do petróleo para a parede da tubulação e fixação do depósito. A presença de teores consideráveis de parafinas, de asfaltenos e de

resinas, associada ao aumento da viscosidade aparente do petróleo, modificações das condições hidrodinâmicas do escoamento do óleo, o regime transiente, a rugosidade e a extensão elevada dos oleodutos são fatores preponderantes no processo de deposição de frações pesadas do petróleo. Dependendo da temperatura de escoamento e da composição do petróleo, pode-se chegar numa condição de perda total de fluidez (CARNAHAN, 1989).

Segundo APTE et al., (1999), quatro mecanismos podem ser considerados para sugerir a deposição de parafina: difusão molecular, dispersão cisalhante, difusão browniana e deposição por gravidade, onde a deposição por gravidade não tem impacto sobre a deposição de parafina e a difusão browniana pode ser ignorada. Geralmente é considerado que a difusão molecular é o mecanismo dominante no caso de escoamento de óleo monofásico, enquanto que os efeitos de cisalhamento na dispersão são considerados desprezíveis. O consenso na indústria de petróleo é que o gradiente radial de temperatura é estabelecido entre o óleo e a parede do duto, com a temperatura do óleo ficando abaixo da T.I.A.C., ocorrendo a deposição (APTE et al., 2000).

SINGH et al. (2000), um fluxo de massa convectivo externo das moléculas de parafina da fase *bulk* para a parede fria e um fluxo interno difusivo dentro da camada de gel são responsáveis pelo crescimento e envelhecimento dos depósitos com gel.

Muitos autores estudaram o mecanismo da deposição no qual citavam a difusão molecular, difusão Browniana, dispersão por cisalhamento e deposição gravitacional como responsáveis pela deposição (BERN et al., 1980; BURGER et al., 1981; MAJEED et al., 1990).

### **2. 3. 1. Deposição de Parafina por Difusão Molecular**

A difusão molecular é considerada por muitos o mecanismo dominante para o transporte de parafina na fase líquida para a parede do duto. Quando o óleo está sendo resfriado em um duto, um gradiente radial de temperatura se estabelecerá no fluido, de modo que o fluido próximo à parede estará mais frio que o fluido na região central do duto. Como a solubilidade da parafina é uma função decrescente da temperatura, o gradiente de temperatura estabelecido produzirá uma maior concentração de parafina

dissolvida na região mais quente o que ocasiona um transporte por difusão molecular da parafina na direção da parede do duto.

A tendência de deposição e sua taxa podem ser também previstas calculando a taxa de difusão molecular da parafina na parede.

A Lei de Fick pode ser aplicada para prever a taxa de acúmulo da deposição da parafina:

$$\frac{dm}{dt} = -\rho D_m A \frac{dC}{dr} = -\rho D_m A \frac{dC}{dT} \frac{dT}{dr} \quad (2.1)$$

O coeficiente de difusão molecular ( $D_m$ ) desenvolvido por WILKE (1955) é expresso frequentemente como uma constante experimental dividida pela viscosidade do óleo ou por correlações empíricas desenvolvidas para parafinas normais. Porém, a correlação disponível que prevê os coeficientes de difusão é apropriada somente para misturas binárias.

O gradiente de concentração pode ser calculado através da concentração prevista no modelo termodinâmico para uma variação de temperatura.

A grande maioria dos modelos numéricos de simulação do fenômeno de deposição foram desenvolvidos considerando a deposição por difusão molecular como o único mecanismo atuante (BROWN et al., 1993; HAMOUDA e DAVIDSEN, 1995; RIBEIRO, 1996).

### **2. 3. 2. Deposição de Parafina por Difusão Browniana**

A difusão Browniana é um mecanismo que considera o transporte de partículas na fase sólida. Algumas regiões do escoamento podem ficar a uma temperatura abaixo da temperatura do ponto de névoa. Com isso, cristais de parafina precipitarão da solução e ficarão suspensas no fluido em escoamento. Com a temperatura abaixo do ponto de névoa os cristais em suspensão colidirão com moléculas do fluido termicamente agitado produzindo um movimento randômico dos cristais.

No caso de existir gradiente de concentração de partículas, essas serão difundidas na direção de menor concentração. A lei de Fick para a difusão Browniana é caracterizada por um coeficiente de difusão de partículas sólidas. Assim,

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho D_{BA} \frac{dC}{dr} \quad (2.2)$$

Muitos autores que modelam a predição da deposição disponíveis na literatura desprezam o mecanismos de difusão Browniana (BROWN et al., 1993; HSU et al., 1994; HUND, 1962; MAJEED, 1990; RIBEIRO e MENDES, 1997). Acredita-se que a difusão Browniana poderia ser responsável pelo transporte de partículas (cristais) para o depósito.

### **2. 3. 3. Deposição de Parafina por Dispersão por Cisalhamento**

A dispersão por cisalhamento é considerada como um possível mecanismo responsável pelo transporte de parafina precipitada (cristais). A dispersão por cisalhamento é um mecanismo de transporte lateral de partículas sólidas em suspensão.

Vários estudos foram realizados em circuitos de teste de deposição de parafina sob as condições de fluxo de calor nulo. Nesses estudos, misturas de óleo e parafina foram bombeadas através de tubos, sendo a temperatura de entrada da solução inferior ao ponto de névoa. A parede dos tubos era isolada termicamente ou mantida na mesma temperatura de entrada da solução, de maneira a garantir que não houvesse fluxo de calor do fluido para a parede. Sob essas condições, era esperado que cristais de parafina estivessem presentes em todo o fluido e disponíveis para deposição nas paredes. Como o fluxo de calor é nulo, não há possibilidade do mecanismo de deposição por difusão molecular agir. Também, como não há fluxo de calor radial e, consequentemente, não há fluxo radial difusivo de parafina líquida, não haverá possibilidade da existência de gradiente de concentração de partículas sólidas próximo na parede. Pode-se concluir que, sob condições de fluxo de calor nulo, a deposição só será possível devido a um mecanismo induzido pelo escoamento, como a dispersão por cisalhamento. Todos os resultados experimentais disponíveis na literatura mostram que não há deposição de parafina sob condições de fluxo de calor nulo. Assim, aparentemente, vê-se que a dispersão por cisalhamento não deve ser um mecanismo relevante na deposição de cristais de parafina.

### **2. 3. 4. Deposição de Parafina por Efeitos Gravitacionais**

A deposição por gravidade foi também considerada como um possível mecanismo de deposição de cristais. Por serem mais densos que o óleo, os cristais de parafina tenderiam a depositar-se no fundo das linhas de transporte. No entanto, testes feitos pelo método de centrifugação para amostras de óleo em experiências de longa duração determinaram que a deposição por gravidade não é um mecanismo relevante (BURGER, 1981). Um ponto de concordância entre os autores é precisamente que a deposição de parafinas por efeitos gravitacionais não é relevante em condições de escoamento. Recentemente, estudos detalhados realizados no Laboratório de Termociências da PUC-Rio mostraram, pela primeira vez, imagens do processo transiente da deposição de parafina em canais (LEIROZ, 2004). Nesse trabalho foi mostrado que a espessura de depósito nas paredes superior e inferior do canal eram iguais, o que descarta os efeitos gravitacionais como mecanismo relevante de deposição.

### **2. 4. Mecanismos da Cristalização**

À medida que o petróleo deixa o reservatório e escoar através das linhas, sua temperatura decresce devido à interação com o ambiente mais frio. Como a solubilidade das parafinas de alto peso molecular decresce drasticamente com a temperatura, cristais estáveis de parafina são formados. Os componentes polares e os asfaltenos podem também co-precipitar com os cristais de parafina (SINGH et al., 1999, SINGH, et al., 2000, MAJEED et al., 1990).

A taxa de cristalização é uma função complexa da temperatura, da taxa de resfriamento, do local onde ocorrem as supersaturações, das forças de cisalhamento geradas pelo escoamento, do tipo de solvente, do número de átomos nas parafinas, e impurezas modificadoras do cristal. A morfologia dos cristais de parafina depende fortemente da taxa de resfriamento e tensão cisalhante aplicada na mistura. Por um lado, cristais monoclinicos e triclinicos (forma de agulha) são observados quando a mistura parafina-petróleo é resfriada lentamente sob condições estáticas. Por outro lado, o

depósito de gel formado sob condições de escoamento é uma mistura de cristais ortorrômbicos (forma de plaquetas ou lamelas) com um sólido amorfo (SINGH, et al., 1999).

Duas questões são críticas nos problemas de parafinação, sendo a primeira o problema da formação do gel e a segunda o problema da deposição da parafina propriamente dita. Um óleo cru gelatinoso se forma quando a parafina precipita formando uma estrutura tridimensional no duto, o que não ocorre enquanto o petróleo estiver fluindo, pois a estrutura intermolecular pode ser destruída pela tensão de cisalhamento durante sua formação. Entretanto, quando o petróleo para de escoar, as partículas de parafina interagem, unindo-se e formando uma rede que resulta em uma estrutura gelatinosa, caso exista suficiente parafina na solução. Com a formação dos núcleos cristalinos, os cristais em crescimento podem se aglomerar dando origem a cristais maiores ou mesmo estruturas em forma de géis, que aprisionam a fase líquida em seu interior e impedem o escoamento do líquido (ELLISON et al., 2000, ROCHA, 1997, THOMASON, 2000).

ALVES (1999) estudou a cristalização de parafinas em solventes orgânicos utilizando o método de resfriamento, especificamente o n-docosano em n-heptano. Foi determinada a solubilidade do sistema com e sem ultra-som e detectou-se que o ultra-som não afeta significativamente a solubilidade. Foi obtida a correlação da solubilidade com a temperatura.

Foi concluído que o ultra-som afeta significativamente a cristalização em batelada por resfriamento do n-docosano a partir de soluções de n-heptano. A largura da zona metaestável sofreu redução quando utilizado o ultra-som com maior intensidade. A taxa de nucleação aumentou na presença de ultra-som e a taxa de crescimento diminuiu desprezivelmente, causando um decréscimo no tamanho médio do cristal. Além disso, concluiu-se que a aplicação do ultra-som durante a extração e o processamento do petróleo tem um impacto favorável uma vez que a redução de tamanho do cristal observada desfavorece a formação de depósitos que acabam incrustando as linhas de transporte.

Quando a temperatura decresce, as interações entre as moléculas de parafinas aumentam. Quando as forças intermoleculares de atração alcançam um ponto onde elas são maiores que as interações solvente-parafina, as moléculas de parafina se combinam entre si para formarem um núcleo cristalino (RANDOLPH e LARSON, 1971).



A formação de núcleos cristalinos, nucleação, é um processo que decide o tamanho dos cristais do produto. Ou seja, quando a nucleação ocorre, e a temperatura se mantém abaixo da temperatura de nucleação e dentro da zona metaestável, as partículas se tornam maiores do que o tamanho crítico, os núcleos começam a crescer formando uma estrutura lamelar de tamanho visível, este mecanismo se chama crescimento cristalino (NÝVLT et al., 2001, CARNAHAN, 1989, ALVES, 1999).

O transporte de petróleo parafinado em um ambiente frio pode resultar na parafinação, que são depósitos nas paredes da tubulação. Em uma produção submarina de petróleo é necessário que não ocorra nucleação descontrolada, ou seja, que não haja deposição para que não ocorra uma diminuição na produtividade dos poços.

Dessa forma, é necessário entender o fenômeno da nucleação, para tentar minimizar a formação de parafina nas paredes da tubulação.

Dependendo da composição do petróleo e das condições de temperatura e pressão, parte das parafinas nele contidas tende a cristalizar dando origem a uma fase sólida, que pode causar diversos problemas à produção de petróleo. A temperatura na qual ocorre a formação do primeiro cristal é chamada de ponto de névoa ou temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC). Uma vez atingida a TIAC, algumas parafinas presentes na meio darão início ao processo de formação de cristais. O fenômeno de cristalização de parafinas pode ser dividido em três etapas (COUTINHO et al, 1996):

- A primeira etapa seria a de nucleação. Nessa etapa surgem os primeiros núcleos a partir dos quais irão crescer os cristais de parafina.
- A segunda etapa é de crescimento, onde ocorre o transporte de massa da solução em direção aos núcleos que foram formados na etapa de nucleação.
- A terceira etapa é a aglomeração, onde ocorre a junção de cristais em crescimento, dando origem a cristais de dimensões maiores.

O crescimento do núcleo formado ocorre tão logo ele surja na solução (CHICHAKLI et al, 1967). A partir do núcleo formado, novas moléculas de parafinas incorporam-se ao cristal em locais denominados sítios de crescimento. Dependendo das condições sob as quais o cristal cresce, são possíveis variadas formas de célula unitária cristalina. As parafinas exibem normalmente as seguintes células unitárias: hexagonal, ortorrômbica, monoclnica e triclnica.

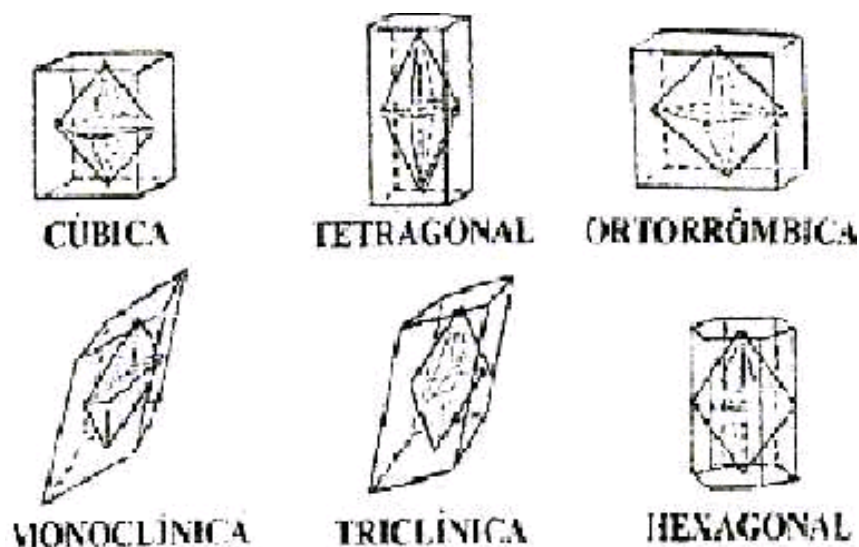


Figura 2.2: Células unitárias dos cristais de parafina (ROCHA, 1997).

#### 2. 4. 1. Crescimento de Cristais

O tamanho e a forma dos cristais parafínicos finais vão depender de vários fatores e, particularmente, da taxa de resfriamento. O local onde ocorre a incorporação preferencial das moléculas é denominado sítio de crescimento. No sítio de crescimento, a energia de coesão cristal-molécula é máxima (PETINELLI, 1991, WON, 1986).

#### 2. 4. 2. Aglomeração

A aglomeração é um dos fenômenos secundários que acompanham a cristalização e contribui para a definição do tamanho médio resultante do produto cristalino. Pode ser definida como a formação de agrupamentos dos cristais, primeiramente formados, em partículas secundárias mais ou menos estáveis, mantidas unidas por forças físicas ou pontes cristalinas (crescimento interpartícula) (NÝVLT et al., 1985).

A aglomeração é um fenômeno que ocorre na população de cristais num cristizador qualquer caracterizada quando dois ou mais cristais são unidos por alguma

força de coesão, permanecendo unidos por um período suficiente de tempo, quando crescem, formando entidades cristalinas de alta irregularidade de forma e propriedades (GROOTSCHOLTEN, 1984).

O grau de aglomeração é o parâmetro de quantificação do fenômeno. Ele indica o estado de agregação numa amostra em um dado tempo, normalmente expresso em base mássica ou pela razão entre o número de partículas aglomeradas e o total da amostra (ALVES, 1999).

O grau de aglomeração diminui com o aumento da intensidade de agitação, com o aumento do tamanho médio dos cristais primários e de suas quantidades, sendo bastante dependente do sistema de cristalização. Os resultados de suas medidas podem ser interpretados para indicar que altas supersaturações e movimentos suaves dos cristais atuam favoravelmente sobre a aglomeração (NÝVLT et al., 1985).

Segundo APTE et al. (1999), a parafina é depositada como um aglomerado de pequenos cristais que tem uma área superficial grande em relação ao seu volume.

## **2. 5. Modelagem de Escoamentos Multifásicos**

A maioria das operações de produção de petróleo no mar ocorrem sob condições de escoamento multifásico. Tem havido um grande esforço no entendimento dos mecanismos inerentes ao escoamento líquido-sólido, contudo o estado da arte do escoamento multifásico ainda está longe do conhecimento aprofundado. A princípio os primeiros modelos foram desenvolvidos considerando sistemas gás-líquido e a partir daí iniciou-se o estudo para escoamentos líquido-sólido. Por isso, inicia-se o texto utilizando o modelo gás-líquido e esse é estendido para outros modelos.

THANG e DAVIS (1979) apresentam um estudo da estrutura do escoamento bifásico, água - ar em tubos de Venturi com diferentes relações de área. A partir de uma agulha de prova, são medidos os perfis de velocidade das bolhas, fração de vazios, e distribuição de tamanho de bolhas. Esse dispositivo permite medir a resistividade do meio em que está imerso dando como resposta um sinal do tipo

$$\delta(x,t) = \begin{cases} 1 & \text{- Quando a agulha esta imersa na fase gasosa,} \\ 0 & \text{- Quando a agulha esta imersa na fase líquida} \end{cases}$$

A partir do processamento estático desse sinal é possível calcular as variáveis mencionadas acima. Um aspecto interessante do trabalho, e que é pouco abordado na literatura, para escoamentos em constrições, é a descrição da estrutura bidimensional do escoamento bifásico descrevendo os perfis transversais de fração de vazios e velocidade. Outro resultado interessante é a observação da coalescência das bolhas na parte convergente e a fragmentação ao longo da parte divergente.

DREW (1983) examina as características comuns dos modelos para escoamentos multifásicos dispersos considerando a fase dispersa como um meio contínuo (enfoque Euleriano - Euleriano). Nesse trabalho são deduzidas de forma detalhada as equações da conservação da massa e quantidade de movimento para sistemas multifásicos a partir da promediação das equações de Navier-Stokes e as condições de interface. Também são apresentadas relações constitutivas para as tensões viscosas e turbulentas das diferentes fases e para os termos de transferência de quantidade de movimento interfacial, mostrando na parte final do trabalho, a independência do sistema coordenado de referência, dessas relações.

LEWIS & DAVIDSON (1985) apresentam um estudo experimental do escoamento disperso água - ar em diferentes bocais e placas de orifício. A principal conclusão obtida a partir desses experimentos é que a pressão diferencial medida para um bocal convergente é bem maior daquela obtida para uma placa de orifício com a mesma fração de vazios, sendo que ambos dispositivos tem a mesma pressão diferencial para a mesma vazão no caso monofásico. Ou seja, a influência da presença de uma determinada quantidade de gás no escoamento é bem mais importante para um bocal do que para uma placa de orifício. Os valores de pressão diferencial diferem bastante dos preditos pelas correlações existentes, porém, esses resultados são comparados, apenas para o caso do bocal, já que o modelo é unidimensional, com resultados teóricos obtidos a partir de um modelo de dois fluidos simplificado. Esse modelo é deduzido a partir de um balanço de forças sobre uma bolha submersa em um escoamento acelerado de líquido. As menores pressões diferenciais para a placa de orifício são atribuídas ao aumento do coeficiente de contração no caso bifásico.

DREW & LAHEY (1987) abordam mais profundamente a questão da independência do sistema de referência das forças interfaciais, fundamentalmente das forças chamadas comumente na literatura de *non-drag forces*, isto é, as forças que aparecem sobre a fase dispersa diferentes da força de arrasto. Essa última, varia linearmente com a velocidade relativa e, portanto, é facilmente demonstrável a sua

objetividade. As outras forças tais como, massa virtual e sustentação dependem da aceleração relativa entre fases e a vorticidade da fase continua sendo assim difícil demonstrar a objetividade. Nesse trabalho, se propõe através de uma formulação potencial do escoamento não estacionário e com presença de vorticidade sobre uma esfera, descrever a forma matemática dessas forças e analisar sua objetividade. Posteriormente, DREW & LAHEY (1990) mostram um erro nas hipóteses colocadas no trabalho anterior concluindo que a demonstração é válida no caso em que a vorticidade da fase continua é pequena.

KOWE et al. (1988) apresentam uma análise detalhada das forças que aparecem sobre uma bolha num escoamento não uniforme e não estacionário, i.e., acelerado local e espacialmente. A partir dessa análise, é derivado um modelo de três campos. Esse modelo consiste em dividir o meio bifásico em três campos interatuantes; as bolhas ocupando o volume  $\epsilon V$  cuja velocidade é  $v$ , líquido deslocado pelas bolhas, ocupando o volume  $C_m \epsilon V$  e com velocidade  $v$ , e o “líquido intersticial” que escoia longe das bolhas, ocupando o volume  $V - \epsilon V - C_m \epsilon V$  escoando com velocidade  $u_0$ . Essa análise facilita a determinação das forças mencionadas e, dessa forma, das relações para transferência de quantidade de movimento interfacial. Segundo esse enfoque, é preciso introduzir uma pressão intersticial  $P_0$ , diferente da pressão média  $\langle P \rangle$ , sendo a diferença entre as duas proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre as fases,  $(u_G - u_L)^2$  (*Slip Velocity*). Por ser considerado de interesse para área é utilizado em vários trabalhos para cálculo de escoamentos multifásicos em dutos e constrições.

KUO & WALLIS (1988) fazem um estudo teórico e experimental de escoamentos de bolhas em bocais convergente-divergente utilizando um modelo de dois fluidos simplificado. É apresentada uma descrição das forças de arraste, massa virtual, empuxo e expansão da bolha (variação do diâmetro). Essa última força é geralmente desprezada em modelos para escoamentos multifásicos, por ser de menor ordem que as forças de massa virtual e arraste, de fato, os experimentos são dirigidos de forma a essa força não ser significativa. Também é apresentada uma seção dedicada a uma recompilação de correlação para coeficientes de arraste para diferentes condições de escoamento. A proposta desse trabalho é analisar experimentalmente as diferentes forças de interface a partir de um experimento que consiste em fazer um seguimento da posição de uma única bolha lançada dentro do bocal, no qual está escoando um líquido. O aparato experimental permite variar o diâmetro das bolhas e as velocidades médias do

líquido. A partir do conhecimento da posição da bolha em função do tempo, é possível conhecer a velocidade pontual da bolha. Os resultados são comparados com um modelo unidimensional de dois fluidos

COUËT et al. (1991) propõem um modelo unificado que contempla os casos limites de monofásico e homogêneo dentro do conjunto de equações proposto. O modelo também é baseado na velocidade intersticial (modelo de três campos apresentado por KOWE et al. (1988)) e é aplicado ao escoamento em uma contração, considerando escoamento de água e ar e óleo e água, podendo em ambos os casos qualquer uma das fases ser dispersa. Esse ponto é interessante já que considera o caso em que a fase dispersa é mais densa do que a contínua. Na literatura, é observado que, em geral, as aplicações são feitas considerando escoamentos de ar disperso em água, sendo a fase dispersa a de menor densidade.

ISHII et al. (1993) propõem um novo modelo obtido a partir da integração das forças de pressão que aparecem sobre uma bolha que se movimenta num escoamento irrotacional. Essa forma de deduzir as equações de conservação permite levar em consideração as forças que aparecem devido à deformação ou mudanças no tamanho das bolhas. Essa força, também considerada em outros trabalhos, é pequena quando comparada com outras forças de interface, para escoamentos em dutos. Os autores também demonstram a hiperbolicidade (relacionada à existência de contrações ou expansões exponenciais em determinadas direções) do sistema de equações governantes. Finalmente, os resultados são comparados com dados experimentais obtidos anteriormente pelos mesmos autores.

ENWALD et al. (1996) apresentam um estudo amplo do modelo de dois fluidos aplicado a leito fluidizado descrevendo o sistema bifásico do ponto de vista Euleriano - Euleriano, i.e., a fase sólida é considerada como um meio contínuo escoando e trocando calor, massa e quantidade de movimento com a fase fluida (gás). Assim, o trabalho resume de forma geral as técnicas de promediação das equações mais comumente empregadas e apresenta equações constitutivas para as tensões de cisalhamento e a pressão, principalmente na fase sólida onde esses conceitos, que surgem a partir da hipótese do contínuo, devem ser estendidos para a fase dispersa. Também são discutidas as leis de fechamento para as forças interfaciais e mostrado um estudo dos modelos mais comuns para a força de arrasto. Finalmente, são discutidos os modelos de turbulência para as fases gasosa e particulada.

ALAJVEGOVIC et al. (1998) mostram a modelagem de um duto de ebulição (*boiling channel*) utilizando o código CFX4. São apresentados diversos testes, tanto em termos de modelagem matemática quanto numérica. Nesse aspecto é apresentada uma modificação do algoritmo de interpolação de RHIE-CHOW RHIE & CHOW (1983) considerando o fato que em escoamentos multifásicos aparecem novos campos escalares, além da pressão, os quais são susceptíveis de oscilações devido ao arranjo co-localizado (*checkboard oscillations*) como são as frações volumétricas. Também é apresentado um método de sub-relaxação para melhorar as condições de convergência em escoamentos com transferência de calor e mudança de fase. Na mesma linha de pesquisa, sendo desenvolvida no Rensselaer Polytecnic Institute, que procura a modelagem multidimensional de escoamentos bifásicos em dutos em diferentes regimes de escoamento, PODOWSKI (1999) apresenta uma modelagem em CFX4 de um escoamento bifásico em um duto. São apresentados alguns modelos de transferência interfacial para regime *slug* (pistonado), anular e disperso (bolhas).

Um aspecto interessante desse trabalho é a comparação entre os termos de interface para os regimes pistonado e disperso, mostrando a similaridade do termo de arrasto, para os diferentes regimes de escoamento, quando é feita uma média na seção do duto.

DIAS et al. (1998) analisam a estrutura de um escoamento bifásico água – ar num bocal convergente utilizando uma agulha de prova, similar à descrita por THANG & DAVIS (1979). Através dessa metodologia são medidos os perfis transversais de velocidade da fase gasosa, fração de vazio e distribuições de diâmetros de bolhas. Também é descrito no trabalho um modelo numérico unidimensional. A partir desse modelo é apresentado um estudo da evolução dos valores das forças interfaciais e os balanços de quantidade de movimento na fase líquida, ao longo do bocal. Um aspecto que contrasta com o trabalho de THANG & DAVIS (1979) é a conclusão da não existência de fragmentação ou coalescência de bolhas ao longo do bocal.

KAREMA & LO (1999) realizam um estudo dos métodos de acoplamento para a interface, i.e., analisam os diferentes algoritmos utilizados para o tratamento numérico das forças interfaciais. Essas forças são, de forma geral, função das velocidades das diferentes fases, assim, aparecerão nas equações para a fase  $i$  velocidades da fase  $j$  e vice-versa. A forma mais simples de tratar esse problema é de maneira explícita, ou seja, utilizar valores disponíveis das velocidades para o cálculo

das forças interfaciais, porém, para alguns regimes de escoamento, esse acoplamento é forte gerando instabilidades numéricas quando tratado de forma explícita. Esse trabalho discute a aplicabilidade dos diferentes métodos de acoplamento e descreve de forma detalhada o algoritmo IPSA-C que resulta da combinação do método para tratamento de forças interfaciais SINCE com o método para o tratamento do acoplamento pressão - velocidade SIMPLE-C.

SOUBIRAN & SHERWOOD (2000) mostram um estudo teórico do escoamento de bolhas num tubo Venturi, considerando o escoamento potencial da fase contínua. São consideradas as forças de arraste, pressão e massa virtual, atuando sobre as bolhas. Essas bolhas são consideradas pequenas em relação ao diâmetro do tubo e de forma esférica (considerando-se a tensão superficial suficientemente grande). O campo de velocidades da fase contínua é avaliado de duas formas, inversamente proporcional à área do duto (perfil plano de velocidades) e escoamento irrotacional axi - simétrico. Considera ainda que as bolhas não influem no escoamento da fase contínua, i.e., os campos de velocidade são desacoplados com o objetivo de facilitar a avaliação das trajetórias e as forças que aparecem sobre as bolhas.

GEORG et al. (2003) desenvolveram um modelo computacional para captar as estruturas denominadas *clusters* de partículas. Foi desenvolvido um modelo matemático multifásico para descrever o escoamento gás-sólido, utilizando-se uma malha computacional tridimensional de alta resolução com a finalidade de captar as estruturas presentes na mesoescala. Essas estruturas influenciam os mecanismos de transferência de massa, quantidade de movimento, energia e velocidades de reação. A natureza das interações hidrodinâmicas nas várias escalas apresenta-se como um grande desafio no que se refere ao aspecto de modelagem matemática conforme pontuam ANDERSON e JACKSON (1967), THEOLOGOS et al. (1997), HARRIS et al. (2002). A prática mais comum é a utilização de equações médias de transporte para cada uma das fases com a finalidade de simular numericamente o comportamento fluido dinâmico. Tem havido um grande esforço no entendimento dos mecanismos inerentes ao escoamento gás sólido, contudo o estado da arte do escoamento multifásico ainda está longe do ideal, conforme pontuam ZHANG e VANDERHEYDEN (2001), van WACHEM (2003), ZHANG e PROSPERETTI (1994).

Segundo GEORG, o movimento de partículas suspensas em um fluido é completamente determinado pelas equações de Navier-Stokes, tendo que ser satisfeitas em cada ponto do fluido, e as equações do movimento de Newton satisfeitas para cada



uma das partículas presentes no escoamento. Contudo, quando os sistemas de interesse compreendem um grande número de partículas, o problema torna-se complexo demais para permitir a solução quando colocado desta forma. Ou seja, haveria a necessidade de uma quantidade de partículas muito grande que represente o sistema, o que é impraticável com os recursos computacionais existentes. Desta forma, é utilizado o processo de média para cada uma das fases (gás e sólido) resultando no “modelo de dois fluidos”, inicialmente desenvolvido por ANDERSON e JACKSON (1967), que trata o fluido e o sólido no referencial Euleriano. Assim, o sólido é modelado como um contínuo, e os mecanismos de transferência de massa, quantidade de movimento e energia se dão na interface entre os “dois fluidos”.

As equações 2.3 a 2.6 são as equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento para a fase partícula e gás respectivamente, como apresentadas por ANDERSON e JACKSON (1967). Nas equações apresentadas,  $\phi$  é a fração volumétrica das partículas;  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{u}$  são as velocidades médias locais das partículas e do gás respectivamente;  $\rho_s$  e  $\rho_g$  são as densidades;  $\sigma_s$  e  $\sigma_g$  são os tensores tensão associados às duas fases, expressos no formato compressível;  $\mathbf{f}$  é a força de interação entre as fases por unidade de volume; e  $\mathbf{g}$  é a força da gravidade.

O fechamento das equações do movimento requer a descrição das tensões para a fase sólida. Quando o movimento das partículas é dominado por colisões, os conceitos advindos da teoria cinética (CHAPMAN e COWLING, 1970) podem ser utilizados, e comumente o são, para descrever as tensões na fase sólida. Relações constitutivas para as tensões da fase sólida baseadas nos conceitos da teoria cinética foram derivados por LUN et al. (1984), levando em conta a natureza inelástica das colisões entre partículas. O modelo de VAN WACHEM (2000) assume que a energia no estado estacionário é dissipada localmente e despreza os efeitos difusivos e convectivos, retendo apenas os termos de geração e dissipação.

A Equação 2.9 considera apenas a forma Newtoniana para as tensões na fase gás. Considera-se apenas a força de arraste para descrever as interações gás-partículas, Equação 2.10.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{v}) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial (1-\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\phi) \mathbf{u}] = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho_s \phi v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \phi v v) = -\nabla \cdot \sigma_s - \phi \nabla \cdot \sigma_g + f + \rho_s \phi g \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho_g(1-\phi)u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g(1-\phi)uu) = -\phi \nabla \cdot \sigma_g - f + \rho_g(1-\phi)g \quad (2.6)$$

Pseudo temperatura granular (VAN WACHEM 2003)

$$(\nabla P_s I + \sigma_s) : \nabla v - \gamma_s \theta = 0 \quad (2.7)$$

Tensor tensão para a fase gás

$$\sigma_g = p_g I - \mu_g \left[ \nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right] \quad (2.8)$$

Força de arraste (GIDASPOW 1994)

$$f = \beta(u - v), \quad \beta = \frac{2}{3} C_D \frac{\rho_g(1-\phi)\phi|u-v|}{d} F(\phi), \quad F(\phi) = (1-\phi)^{2.65} \quad (2.9)$$

$$C_D = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{24}{\text{Re}_g} \right) (1 + 0.15 \text{Re}_g^{0.687}), \quad \text{Re}_g < 1000 \\ 0.44, \quad \text{Re}_g \geq 1000 \end{array} \right\} \quad \text{Re}_g = \frac{(1-\phi)\rho_g d |u-v|}{\mu_g} \quad (2.10)$$

Tensor tensão para a fase sólido

$$\sigma_s = -p_s I + \left( \zeta_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot v I + \mu_s \left( \nabla v + (\nabla v)^T \right) \quad (2.11)$$

Pressão da fase sólido

$$p_s = \rho_s \phi \theta (1 + 2(1+e)g_0 \phi), \quad e = 0.95, \quad g_0 = 0.6 \left( 1 - \left( \frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-1}, \quad \phi_{\max} = 0.65 \quad (2.12)$$

Viscosidade cinemática e dinâmica para fase sólida

$$\zeta_s = \frac{4}{3} \phi \rho_s d g_0 (1+e) \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{0.65}, \quad \mu_s = \frac{10\sqrt{\pi} \rho_s d \theta^{0.5}}{96(1+e)g_0 \phi} \left( 1 + \frac{4}{5}(1+e)g_0 \phi \right)^2 + \frac{4}{5} \phi \rho d g_0 (1+e) \left( \frac{\theta}{\pi} \right) \quad (2.13)$$

Termo de dissipação da energia flutuante

$$\gamma \theta = 3(1-e^2)g_0 \phi^2 \rho_s \theta \left( \frac{4}{d} \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{0.5} - \nabla \cdot v \right) \quad (2.14)$$

Ainda segundo GEORG, existem na literatura várias tentativas de caracterizar a formação de *clusters* através de experimentos sofisticados, contudo sem grande sucesso, HARRIS et al. (2002), LACKERMEIER et al. (2001). Tendo em vista as dificuldades experimentais, as técnicas de fluidodinâmica computacional apresentam-se com um grande potencial, pois é possível realizar uma série de simulações

computacionais e assim utilizar técnicas de visualização e monitoramento com a finalidade de caracterizar estas estruturas.

Foram apresentadas no trabalho possíveis formas de formação de *clusters* através de análise dos aspectos físicos associados ao escoamento gás-sólido na tentativa de tornar mais claros os mecanismos encontrados neste tipo de escoamento. Os resultados apresentados, de acordo com Georg, são coerentes com o esperado no que se refere à concentração de sólidos junto à parede e aos aspectos relacionados à tridimensionalidade das estruturas da meso escala, corroborando qualitativamente os resultados encontrados por AGRAWAL et al. (2001) e ZHANG E VANDERHEYDEN (2001). O modelo proposto com suas relações de fechamento foi capaz de representar os fenômenos inerentes ao escoamento gás-sólido não necessitando de modificações.

VAN WACHEM e ALMSTEDT (2003) discutiram sobre os escoamentos multifásicos, onde relatam que são bastante encontrados na indústria. Numerosos exemplos podem ser encontrados nas indústrias química, farmacêutica, agrícola, bioquímica, petrolífera, de alimentos, eletrônica, etc. Devido à complexibilidade dos escoamentos multifásicos, do ponto de vista físico e numérico, os códigos aplicáveis à Fluidodinâmica Computacional (CFD) não existem.

As razões para a falta de conhecimento fundamental em escoamentos multifásicos são três: (1) o escoamento multifásico é um fenômeno complexo que pode ocorrer para gás-sólido, gás-líquido, líquido-líquido, líquido-sólido, etc. e dentro dos escoamentos pode existir escoamento anular, escoamento estratificado, escoamento pistonado, escoamento de bolha, etc. (2) as complexas leis físicas e difícil tratamento matemático dos fenômenos que ocorrem na presença das duas fases (dinâmica de interface, coalescência, separação, arraste) ainda são pouco desenvolvidos. (3) a solução numérica das equações governantes e as leis para fechamento nos fluxos multifásicos são extremamente complexas.

ALBUQUERQUE et al. (2007) simularam um modelo tridimensional de fluxo de duas fases (gás-óleo), em estado estacionário, em um tubo submersível, usando o método de volumes-finitos e o software CFX. As equações governantes em coordenadas generalizadas são resolvidas usando um sistema de arranjo de variáveis *co-located*, o esquema HIBRIDO como função da interpolação dos termos convectivos, o método SIMPLEC para junção da pressão-velocidade. Os resultados numéricos das distribuições de velocidade, pressão, temperatura e a fração nula das fases são apresentados e analisados. É feita uma discussão em termos da precipitação de parafina

ao logo do duto. Escoamento multifásico consiste em um fluido (contínuo) e uma ou mais fases particuladas (dispersas). A fase contínua pode ser líquida ou gás e a fase dispersa pode ser de partículas sólidas, bolhas de gás ou gotas de líquido. Uma definição mais habitual considera um sistema de multifásico como aquele onde os fluidos componentes são imiscíveis e ambos separados por interfaces.

Para simplificar o modelo e a solução das equações governantes, foram considerados: fluxo laminar, estado estacionário, escoamento tri-dimensional, fluido incompressível, fluxo não-isotérmico, fluido newtoniano; propriedades termofísicas constantes, sem força de arraste na interfase e força de corpo negligenciada. Foi considerado que o depósito só ocorreria sob o efeito da temperatura do fluido. Nenhum outro efeito, tal como, difusão molecular ou arraste de partículas de parafina foi considerado.

CORNELISSEN et al. (2007) usou um modelo de multifluido Euleriano no CFD (fluido dinâmica computacional) para simular o escoamento líquido-sólido. As simulações numéricas foram avaliadas qualitativamente através de dados experimentais da literatura e quantitativamente através de comparação com novos dados experimentais. O refinamento da malha, o passo de tempo e os critérios de convergência foram avaliados.

O estudo foi baseado na aplicação da CFD para fluidização de sólidos em líquido. O modelo foi feito através da aproximação Euleriana-Euleriana utilizando o pacote comercial FLUENT que é baseado no método de volumes finitos.

Conservação de massa e momento são as equações governantes para interpenetração das fases líquida e sólida. As equações relevantes são listadas abaixo. A transferência de massa entre as fases foi ignorada. A equação de momento para a fase sólida difere da fase líquida e a equação para fase sólida contém uma pressão de sólidos. A transferência de forças entre as fases líquida e sólida é descrita por leis empíricas de arraste baseadas em WEN e YU (1966) e GIDASPOW (1992).

Modelo de equação usada no código do Fluent 6.1.22:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (2.15)$$

Equação de momento:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l \bar{v}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{v}_l^2) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_l + \alpha_l \rho_l \bar{g} + k_{sl}(\bar{v}_s - \bar{v}_l) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s^2) = -\alpha_s \nabla p + \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} + k_{ls}(\bar{v}_l - \bar{v}_s) \quad (2.17)$$

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q \left( \nabla \cdot \bar{v}_q + \nabla \cdot \bar{v}_q^T \right) + \alpha_q \left( \lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \bar{v}_q \bar{I} \quad (2.18)$$

Arraste líquido-sólido:

$$k_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{d_s} \alpha_l^{-2.65} \quad (2.16)$$

$$k_{sl} = \begin{cases} \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{d_s} \alpha_l^{-2.65} & \alpha_l > 0.8 \\ 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_l) \mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_l \alpha_s |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{d_s} & \alpha_l \leq 0.8 \end{cases} \quad (2.17)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l \text{Re}_s} \left[ 1 + 0.15 (\alpha_l \text{Re}_s)^{0.687} \right] \quad (2.18)$$

$$\text{Re}_s = \frac{\rho_l d_s |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{\mu_l} \quad (2.19)$$

Pressão de sólido:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (2.20)$$

Função da distribuição radial:

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{a_s}{a_{s, \max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (2.21)$$

Tensão cisalhante dos sólidos:

$$\mu_s = \mu_{s, col} + \mu_{s, kin} + \mu_{s, fr} \quad (2.22)$$

$$\mu_{s, col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (2.23)$$

$$\mu_{s, kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{6(3 + e_{ss})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (2.24)$$

$$\mu_{s, fr} = \frac{p_s \sin \phi}{2 \sqrt{I_{2D}}} \quad (2.25)$$

Viscosidade *bulk*:

$$\lambda_s = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (2.26)$$

Temperatura granular:

$$\frac{2}{3} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \bar{v}_s \Theta_s) \right] = \left( -p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \cdot \bar{v}_s + \nabla \cdot (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \phi_{ls} \quad (2.27)$$

$$k_{\Theta_s} = \frac{15 d_s \rho_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{4(41 - 33\eta)} \left[ 1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) \alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (2.28)$$

$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{ss}) \quad (2.29)$$

$$\gamma_{\Theta_s} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \Theta_s^{3/2} \quad (2.30)$$

$$\phi_{ls} = -3k_s \Theta_s \quad (2.31)$$

Limite do empacotamento:

$$\alpha_{s, \max} = \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2.32)$$

A simulação Euleriana usando o software FLUENT para fluidização de água com esferas de vidros deu resultados que geralmente apresentam boa concordância qualitativamente e razoável concordância quantitativa de acordo com os dados experimentais. A variação do coeficiente de restituição apresentou resultados desprezíveis para as condições estudadas, considerando o arraste imposto pelo o fluido na partícula.

## 2. 6. Objetivo do Presente Trabalho

O entendimento do mecanismo de deposição de parafina é o passo fundamental para a prevenção do problema. Existe um grande esforço para desenvolver modelos teóricos para o cálculo da deposição de parafinas na parede interna de dutos.

A revisão bibliográfica realizada revelou o pouco conhecimento dos mecanismos básicos responsáveis pela deposição de parafina. Vários autores mostraram que a cristalização de parafinas em óleo leva à formação de gel com uma morfologia complexa. Um termo fonte de Darcy é adicionado na equação de momento para

descrever a desaceleração do escoamento na zona metaestável, onde começa a formação dos cristais e conseqüentemente o fluido se torna mais gelatinoso.

Esse termo fonte é função da porosidade da parafina formada (n-docosano) na zona metaestável. Na fase líquida essa função é zerada e a velocidade é calculada pela equação de quantidade de movimento. Na zona metaestável, o termo fonte aumenta gradualmente com a função tipo Carman–Koseny. Um aumento no termo fonte leva a uma diminuição do campo de velocidade.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar estudos numéricos em escoamento laminar desprezando a dispersão cisalhante, difusão Browniana e a gravidade. Assumindo que a desaceleração do escoamento e a grande troca térmica junto à parede na região metaestável são as grandes responsáveis pela deposição de parafina. O fluxo de massa convectiva das moléculas de parafina da fase *bulk* para a parede fria e um fluxo interno difusivo dentro da camada de gel são responsáveis pelo crescimento e envelhecimento dos depósitos.

### 3. O MODELO COMPUTACIONAL CFX 11.0

O programa computacional utilizado nesse trabalho é o CFX-11.0 que foi desenvolvido pela *AEA Technology – Engineering Software* dos Estados Unidos a partir dos anos 70. Em 2003, a CFX foi adquirida pela *Ansys Inc.*

O software possui interface direta aos arquivos de CAD e geração de malha automática. Esse pacote consiste em um software que resolve numericamente as equações governantes de problemas envolvendo mecânica de fluidos e transferência de calor. O programa emprega a metodologia de volumes finitos utilizando malhas estruturadas, porém com flexibilidade de adaptação a geometrias complexas através do uso de coordenadas curvilíneas generalizadas e a possibilidade de resolução com a metodologia de multidomínios. Além de resolver as equações e Navier-Stokes em três dimensões, o software possui uma enorme quantidade de modelos para diferentes aplicações que vão desde diferentes modelos para o fechamento da turbulência até modelos para escoamentos em meios porosos, combustão e escoamentos multifásicos, entre vários outros.

Uma característica interessante do pacote é que permite a inclusão de novos modelos ou modificação dos já implementados, sejam estes para a consideração de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos, através de rotinas em linguagem FORTRAN. Isso torna o *software* adequado para pesquisa científica, já que possibilita testar diferentes modelos matemáticos, analisar a influência de determinados parâmetros, sem ser necessário o árduo trabalho de implementação numérica de algoritmos para a resolução numérica das equações de Navier-Stokes ou outros modelos matemáticos conhecidos e validados na literatura.

O pacote CFX 11.0 é composto por três programas principais (*CFX PRE*, *CFX SOLVER* e *CFX POST*), um programa de geração de geometria (*WORKBENCH*) e de malha (*CFX-MESH*). A geometria e malha são geradas através de um programa CAD, que são importadas para o pré-processador (*CFX-PRE*) para que sejam fornecidas outras condições de contorno, como por exemplo, o fenômeno a ser simulado (físico ou químico), os fluidos envolvidos e suas propriedades físicas, características do escoamento (rugosidade, temperatura), características da simulação (transiente ou permanente, subsônico ou supersônico, multifásico ou monofásico etc.) e as condições de contorno. Todos os dados do pré-processador são transferidos para o processador que



irá resolver os problemas com base nas condições de contorno fornecidas chamado *CFX - SOLVER*. Os dados gerados pelo processador são encaminhados ao pós-processador que pode ser descrito como sendo uma ferramenta de visualização gráfica chamado *CFX- POST*.

O programa de resolução (*SOLVER*) recebe três tipos de arquivos, um contendo as informações geométricas do modelo (malha computacional), um arquivo com os comandos que definem o modelo a ser utilizado, condições de contorno, fenômenos a serem considerados etc. e, se forem utilizadas rotinas de usuário, um arquivo contendo as rotinas em linguagem FORTRAN.

O arquivo de comandos permite passar ao programa todas as informações, inclusive as geométricas quando se trata de geometrias simples. Essa característica será aqui utilizada para o estudo do escoamento em dutos de seção constante. Assim, a partir desse arquivo é possível estabelecer todas as condições e modelos a serem utilizados, sempre que estejam implementados no pacote. Nos casos em que é necessária a implementação de novos modelos ou modificação dos já implementados, isto deverá ser feito através das rotinas de usuário em linguagem FORTRAN ou comando *CCL (Command Language)*.

A solução do problema é obtida para cada centróide das células do domínio. A precisão dos resultados depende do refinamento da malha: quanto mais refinada a malha, mais precisos serão os resultados e maior será o esforço computacional (trabalho do processador e duração).

O método utilizado pelo modelo CFX é o de volumes finitos; este divide o domínio em volumes de controle e as equações de conservação são aplicadas a cada volume. O centróide de cada volume é o nó computacional onde cada variável é calculada. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada volume de controle, em função dos nós vizinhos. O método é ajustável a qualquer tipo de malha e assim não há restrições a geometrias complexas.

Essas rotinas são compiladas e acopladas ao código principal do programa de resolução. A implementação do modelo matemático é feita através do arquivo de comandos (*CCL*). O modelo será colocado da forma tradicional do modelo de vários fluidos, já implementado no pacote CFX 11.0.

A malha numérica é a discretização do domínio de interesse através de nós, onde serão calculadas as variáveis de interesse, para a simulação do escoamento. Ela pode ser estruturada, estruturada por blocos e não-estruturada.

As condições de contorno são as características do escoamento (velocidade, pressão, temperatura etc.) atribuídas aos limites do domínio de interesse. Elas são peças essenciais para o fechamento do sistema de equações e para a obtenção dos resultados corretos.

### **3. 1. Modelagem Matemática**

O propósito desta seção é descrever as diferentes abordagens utilizadas para a formulação matemática de escoamentos multifásicos. Serão descritos os modelos mais utilizados em aplicações acadêmicas e industriais, com destaque para a abordagem Euleriana-Euleriana que será a utilizada neste trabalho.

#### **3. 1. 1. Classificação de Modelos para Escoamentos Multifásicos**

Diversas classificações são apresentadas na literatura para modelos de escoamentos multifásicos. Uma das mais utilizadas na literatura classifica os modelos em duas grandes abordagens, Euleriana–Euleriana e Euleriana–Lagrangeana. Essa classificação diz sobre como são consideradas as fases dispersas. No primeiro caso, tanto a fase contínua quanto a dispersa são consideradas como meios contínuos, onde um sistema de referência Euleriano é utilizado para a dedução das equações governantes. Na abordagem Euleriana–Lagrangeana ou, simplesmente, Lagrangeana, como é chamada na literatura, é resolvida uma equação da conservação da quantidade de movimento para cada partícula, em um sistema de referência que se movimenta com a partícula (Lagrangeano). Evidentemente, essa abordagem restringe-se apenas a sistemas dispersos.

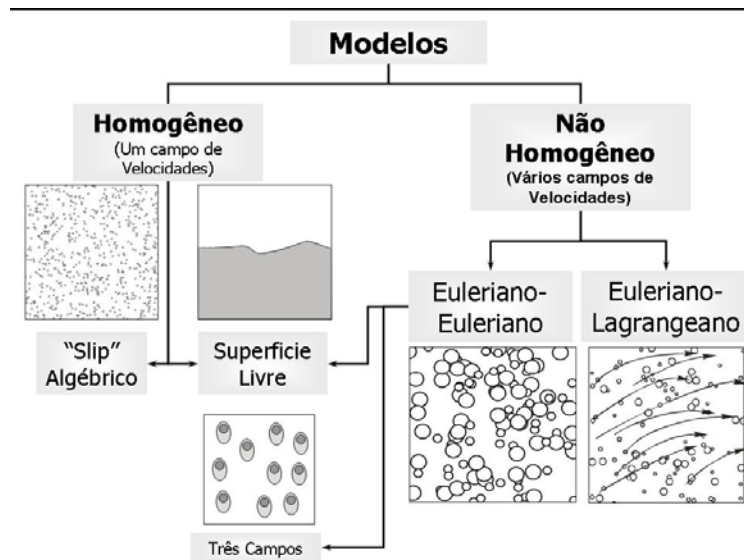


Figura 3.1: Classificação de modelos para escoamentos multifásicos (PALADINO, 2005).

A primeira divisão surge a partir da consideração de um único ou diferentes campos de velocidade para as fases que compõem a mistura multifásica. As abordagens Euleriana-Euleriana e Euleriana-Lagrangiana consideram velocidades diferentes para as fases, enquanto que o modelo homogêneo considera um campo de velocidades representativo da velocidade média da mistura multifásica. A abordagem Euleriana-Euleriana considera a massa de líquido arrastada pelas bolhas como uma “pseudo-fase” que se movimenta com a velocidade das bolhas, porém a sua massa é considerada no balanço de massa da fase líquida.

A abordagem Euleriana-Lagrangiana, resolve um sistema de equações de conservação (massa, quantidade de movimento, energia etc.) para a fase contínua e, com os campos de velocidades dessa fase, são calculadas as forças exercidas sobre as partículas dispersas (bolhas, gotas ou partículas sólidas), a partir das quais são calculadas as trajetórias dessas partículas. A principal limitação desse modelo é que é restrito a escoamentos dispersos, e com baixas frações volumétricas das fases dispersas, já que serão necessárias tantas equações quanto o número de partículas presentes no domínio. Quando as partículas são pequenas, ainda para baixas frações volumétricas, o número de partículas será muito grande, inviabilizando a utilização desse modelo.

Uma importante vantagem desse modelo é o fácil tratamento para sistemas polidispersos, isto é, sistemas nos quais as partículas possuem uma distribuição de tamanho relativamente larga e não pode ser considerado um único tamanho de partícula.

No modelo Euleriano-Euleriano, para cada faixa de diâmetro considerada, devem ser consideradas diferentes “pseudo-fases” com diferentes tamanhos de partículas, requerendo a solução de um sistema de equações de conservação (massa e quantidade de movimento) adicional para cada faixa de diâmetros de partícula considerado. Nesses casos podem ainda ser utilizados tratamentos especiais para sistemas polidispersos como modelos de balanço populacional (MUSIG - *MUltiple SIze Group*). Contudo esses modelos normalmente consideram que as partículas de todos os tamanhos se movimentam com a mesma velocidade.

Uma alternativa, quando se deseja calcular diferentes campos de velocidade para diferentes diâmetros de partícula, é o modelo “Slip” Algébrico (ASM – Algebraic Slip Model), também chamado na literatura de *Drift Flux Model*. Esse modelo calcula uma velocidade relativa entre fases a partir de uma equação algébrica. Embora esse modelo seja baseado numa abordagem Euleriana-Euleriana, o fato de se utilizarem equações algébricas para o cálculo das velocidades relativas faz com que possam ser considerados vários tamanhos de partículas sem aumentar consideravelmente o esforço computacional. Essas equações algébricas calcularão a velocidade terminal das partículas para as condições de escoamento em cada ponto do domínio. Dessa forma, o modelo será válido para casos em que os tempos de relaxação das partículas, *i.e.*, os tempos em que as partículas atingem a sua velocidade terminal, são muito menores que os tempos característicos do escoamento.

O modelo homogêneo considera apenas um único campo de velocidade para todas as fases. Essa hipótese é válida apenas para dispersões muito finas de partículas, nas quais, a fase dispersa é arrastada com a mesma velocidade que a fase contínua. Esse modelo resolve uma equação da quantidade de movimento para a mistura multifásica e  $N-1$  equações da conservação da massa, de forma a se obter a distribuição de fase no domínio de cálculo, onde  $N$  é o número de fases. A distribuição da fração volumétrica da fase restante é calculada através da equação de “conservação volumétrica” que considera que a soma das frações volumétricas de todas as fases é igual a um.

PALADINO (2005) considera que o modelo homogêneo foi bastante utilizado no passado para modelagem de escoamentos dispersos, quando a disponibilidade de recursos computacionais era menor. Na atualidade, escoamentos dispersos são resolvidos a partir do modelo de dois fluidos, salvo em casos de dispersões extremamente finas ou em escoamentos dominados pela força de arraste, onde a hipótese de homogeneidade de velocidades é válida.

É importante destacar, que o conceito de “homogeneidade” refere-se à quantidade de movimento, porém pode ser aplicado, de forma geral, a qualquer fenômeno de transporte entre fases. Por exemplo, num escoamento num evaporador, onde existem importantes velocidades relativas entre as fases, mas com temperaturas iguais, uma abordagem não-homogênea deverá ser utilizada para a quantidade de movimento, porém pode ser considerado um único campo de temperaturas para ambas as fases.

### 3. 1. 2. Abordagem Euleriana – Euleriana

Essa metodologia constitui-se, na atualidade, na abordagem mais utilizada para resolução de escoamentos multifásicos. É adequada para escoamentos onde as fases estão misturadas e as velocidades relativas entre fases são consideráveis. A dedução matemática desse modelo é baseada no enfoque Euleriano-Euleriano da mistura bifásica, onde as fases, mesmo as dispersas, são consideradas como meios contínuos.

A principal hipótese assumida para a dedução desse modelo refere-se ao volume ocupado pelas bolhas, partículas ou gotas da fase dispersa. A “visão Euleriana” da fase dispersa é similar à visão Euleriana de um sistema de moléculas de gás, onde a hipótese do contínuo deve ser satisfeita para que tal sistema possa ser representado pelas equações da mecânica dos meios contínuos. Nesses sistemas, um ponto material deve ser na realidade um volume tal que contenha uma quantidade de moléculas suficientes para que a média (temporal ou volumétrica) da massa específica seja invariante no tempo. Para se ter uma idéia da ordem de grandeza desse volume, considere-se um mol de gás em condições normais de pressão e temperatura. O volume ocupado pelas  $6,023 \cdot 10^{23}$  moléculas que o compõem é, nessas condições, de 22,4 litros. Do ponto de vista estatístico, para que a massa específica média se mantenha invariante, o “ponto material” considerado deve conter pelo menos  $10^4$  moléculas (CROWE et al., 1998) assim:

$$\text{Volume Elementar} \sim \frac{22,04 \times 10^{-3} \times 10^4}{6,023 \times 10^{23}} = 3,66 \times 10^{-22} \text{ m}^3 \quad (3.1)$$

Ainda afastando-se consideravelmente das condições normais de pressão e temperatura, a hipótese do contínuo é normalmente observada na maioria das aplicações, salvo em condições extremas (por exemplo, aplicações em pressões muito baixas ou micro aplicações), e distribuições locais das variáveis como velocidade ou temperatura podem ser calculadas a partir de um modelo baseado na mecânica dos meios contínuos.

De forma similar, em escoamentos dispersos o número de partículas por unidade de volume ou *densidade numérica* deve ter uma média estacionária. Para isso uma quantidade apreciável de partículas deve ser considerada dentro de um volume elementar que representa um “ponto material”. Suponha-se, por exemplo, um escoamento em padrão de bolhas com diâmetros da ordem de 2-4 mm. O volume ocupado por  $10^4$  bolhas seria da ordem de,

$$\text{Volume Elementar} \sim 10^4 \times FE \times \frac{4}{3} \pi (3 \times 10^{-3})^3 \sim 6,8 \text{ cm}^3 \quad (3.2)$$

onde  $FE \approx 0,65$  é o fator de empacotamento de esferas.

Essa visão “Euleriana” da fase dispersa é também chamada de difusa ou *fuzzy*. Isto é, pelo fato de se enxergar a mistura bifásica, não como dois fluidos separados por uma interface, mas como fluidos interpenetrantes, onde, em um ponto material, podem coexistir duas ou mais fases e a quantidade relativa presente de cada um é dada pelo valor da fração volumétrica nesse ponto.

### 3. 2. Equações Governantes

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) se baseia nas equações fundamentais da dinâmica dos fluidos: equação da continuidade, energia e momento. Essas equações representam três princípios fundamentais da física em que todos os fluidos estão baseados:

- Conservação de massa;
- Conservação da quantidade de movimento linear (Segunda Lei de Newton);
- Conservação da energia (Primeira Lei da Termodinâmica).

Neste trabalho será utilizado o modelo de dois fluidos. Para o estudo numérico será empregado o pacote comercial CFX 11.0 no qual serão avaliados os modelos já formulados e serão implementadas algumas modificações desses modelos, para as forças de interface, de forma a obter resultados mais apurados para escoamentos em constrições.

Baseando-se em alguns aspectos teóricos revistos na literatura e comentados nas seções anteriores, referentes à modelagem matemática de escoamentos multifásicos dispersos, propõe-se um modelo matemático com algumas simplificações baseadas nas seguintes hipóteses:

1. As tensões viscosas ou turbulentas internas da fase dispersa podem ser desconsideradas, ou seja, serão desconsiderados os termos viscosos na equação da quantidade de movimento da fase dispersa;
2. O campo de pressão será compartilhado por todas as fases, ou seja, a pressão em cada ponto será igual para todas as fases;
3. Não existe transferência de calor ou massa através da interface;

Dessa forma as equações da conservação da massa e quantidade de movimento para a fase contínua são,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c U_c) = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c U_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c U_c U_c) + r_c \nabla p - \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla U_c + \nabla U_c^T)) - \alpha_c \rho_c g = M_{cl} \quad (3.4)$$

Para a fase dispersa, são desconsideradas as tensões cisalhantes, viscosas e turbulentas. Desta maneira, a conservação da massa e quantidade de movimento para a fase dispersa serão,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_d \rho_d) + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d U_d) = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_d \rho_d U_d) + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d U_d U_d) - \alpha_d \rho_d g = M_{dl} \quad (3.6)$$

Assim, a equação da conservação da quantidade de movimento para a fase dispersa é dada por um balanço entre forças inerciais, forças de pressão, de campo e forças interfaciais provenientes das interações com outras fases.

De forma geral os problemas envolvendo mecânica dos fluidos e transferência de calor requerem a solução de sistemas de equações acoplados, pois as variáveis principais das equações aparecem em outras equações. Em particular, no caso

das equações de Navier-Stokes, as equações estão acopladas pelo fato que as diferentes incógnitas,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $p$  aparecem em diferentes equações. Mesmo quando nas equações da conservação da quantidade de movimento linearizadas aparece apenas uma componente da velocidade, já que as outras componentes foram colocadas na matriz de coeficientes, todas as equações, incluindo a conservação da massa, estarão fortemente acopladas fisicamente pela variável pressão. O gradiente de pressão influenciará de forma importante no balanço de quantidade de movimento e, portanto, o campo de velocidades que definirá o balanço de massa. Entretanto, esse fato não aparece de forma clara nas equações, já que a pressão não aparece explicitamente na equação de conservação da massa, porém, fisicamente, o balanço de massa é definido pelo gradiente de pressão.

Existem inúmeras metodologias numéricas para resolver esse acoplamento. Essas metodologias podem ser basicamente divididas em dois tipos de abordagens: **solução segregada** e **solução acoplada ou simultânea** das equações de conservação.

Entende-se por **solução segregada** de um sistema de equações diferenciais parciais ao método de solução que consiste na resolução de cada equação em forma separada e sequencial. Nessa abordagem, cada equação é resolvida para a sua variável principal e as outras variáveis são tratadas como conhecidas, utilizando-se o “melhor” valor disponível, ou seja, o valor obtido na iteração anterior.

A **solução acoplada** das equações consiste em resolver todas as equações em forma conjunta a partir do mesmo sistema linear. Dessa forma, qualquer acoplamento entre as variáveis estará automaticamente resolvido, restando apenas as não linearidades, para as quais será necessária a solução iterativa. Entretanto, tal solução será sempre mais robusta que no caso segregado.

Em se tratando da solução das equações governantes de escoamentos multifásicos, existem dois acoplamentos que devem ser considerados, o acoplamento entre a pressão e velocidade e o acoplamento entre as equações governantes das diferentes fases. O problema do acoplamento pressão-velocidade é um clássico na solução de problemas envolvendo escoamentos incompressíveis ou fracamente compressíveis.

Geralmente, os códigos comerciais (CFX) utilizam a metodologia da solução segregada, utilizando coordenadas curvilíneas generalizadas, pois tem mais tempo de mercado e, portanto, estão melhor validados.



### 3. 3. Modelo Numérico

O escoamento interno é resolvido com a utilização de um software comercial, o CFX (*Ansys Inc.*), na sua versão 11.0. A geração da geometria é feita pelo ANSYS *Workbench* que possui todo ambiente para modelar a geometria, do tipo CAD, a malha é gerada através do *CFX-MESH* que discretiza o domínio representado pela geometria gerada para ser usada no *CFX-PRE*. Esse pacote, assim como o *CFX-SOLVER*, é muito utilizado pela indústria e tem se mostrado uma ferramenta bastante confiável.

Nesse gerador de malhas, vários tipos de elementos podem ser utilizados para discretizar a geometria, tais como pirâmides, tetraedros, prismas, hexaedros, triângulos, quadriláteros, etc. A opção neste trabalho é a de utilizar uma malha composta de prismas.

#### 3. 3. 1. Características do Método Numérico

Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no método dos volumes finitos. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa. Forma conservativa, ou forma divergente, é aquela em que na equação diferencial os fluxos estão dentro do sinal da derivada e, na primeira integração, aparecem os fluxos nas fronteiras do volume elementar, equivalente, portanto, ao balanço.

O software CFX utiliza o método dos Volumes Finitos Baseado em Elementos (EbFVM) para a discretização das equações de transporte, que é um método de volumes finitos aplicado às malhas não estruturadas. Por ser um programa comercial, não serão mostrados os detalhes do método numérico, que podem ser encontrados em (ANSYS, 2006; MALISKA, 1995; MALISKA, 2004; RAW, 1985).

Este pacote consiste em um software que resolve numericamente as equações governantes de problemas envolvendo mecânica de fluidos e transferência de calor. O programa emprega a metodologia de **Volumes Finitos** utilizando malhas

estruturadas, porém com flexibilidade de adaptação a geometrias complexas através do uso de **coordenadas curvilíneas generalizadas** e a possibilidade de resolução com a metodologia de **multidomínios**. Além de resolver as equações e Navier-Stokes em três dimensões, o software possui uma enorme quantidade de modelos para diferentes aplicações que vão desde diferentes modelos para o fechamento da turbulência até modelos para escoamentos em meios porosos, combustão e escoamentos multifásicos, entre vários outros.

Uma característica interessante do pacote é que permite a inclusão de novos modelos ou modificação dos já implementados, sejam estes para a consideração de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos, através de rotinas em linguagem FORTRAN ou implementação através da seção de “expressões CCL”. Isto torna o software adequado para pesquisa científica, já que possibilita testar diferentes modelos matemáticos, analisar influência de determinados parâmetros etc., sem ser necessário o árduo trabalho de implementação numérica de algoritmos para a resolução numérica das equações de Navier-Stokes ou outros modelos matemáticos amplamente conhecidos e validados na literatura.

## 4. MODELO FÍSICO DO ESTUDO NUMÉRICO

### 4. 1. Introdução

O propósito deste capítulo é apresentar as principais características da metodologia física do estudo numérico utilizado para a solução das equações governantes dos escoamentos multifásicos. O modelo usado foi o de multicomponente do Manual CFX 11.0.

O modelo matemático é baseado no modelo fluido-múltiplo com aproximação Euleriana-Euleriana das equações de massa, momento e energia. O modelo inicial do sistema foi tratado como monofásico com três componentes misturados como fluido na entrada: solvente (n-heptano), soluto líquido (n-docosano líquido) e soluto sólido (n-docosano sólido). A composição do fluido é ajustada algebricamente de acordo com a temperatura local e a solubilidade dependente da temperatura.

Os efeitos do calor latente são incluídos automaticamente devido aos diferentes valores utilizados para os componentes na fase sólida e na fase líquida do n-docosano.

A geometria e a malha para essa simulação foram criadas no programa *WORKBENCH*, no qual a malha foi criada utilizando o *CFX-MESH*.

### 4. 2. Modelo Físico

O fenômeno de deposição de parafina é desenvolvido utilizando subdomínios na implementação do CFX. Para escrever as equações de conservação governam este fenômeno, diversas hipóteses foram utilizadas de forma a facilitar a obtenção da solução.

- Dispersão Cisalhante, Difusão Browniana e Gravidade são negligenciadas;
- Difusão térmica e molecular são consideradas;

- escoamento em estado estacionário;
- fluido Newtoniano, mesmo para o sistema multifásico;
- fluido incompressível, com viscosidade constante;
- condutividade térmica e calor específico constantes;
- solubilidade da parafina dependente da temperatura;
- processo de deposição de parafina ocorre para temperaturas inferiores a TIAC;
- escoamento laminar unidimensional.

#### 4. 2. 1. Modelagem do crescimento do depósito de parafina

Quando a temperatura local do duto estiver abaixo da temperatura de início de cristalização (TIAC) do óleo, alguns componentes passarão para a fase sólida, o gradiente de temperatura estabelecido na parede interna do duto provocará a transferência de massa desses componentes precipitados, ocorrendo a deposição.

O primeiro passo no desenvolvimento do estudo numérico foi definir o domínio em que as equações deverão ser aplicadas.

A geometria, como foi dito anteriormente, foi desenvolvida no *WORKBENCH*, onde foi considerado um canal retangular com dimensões internas de 8 x 20 x 1300 (largura x altura x comprimento), ou seja, o comprimento considerado foi de 1000, pois 300 são da entrada (200) e saída (100) do canal em acrílico e por isso não foram considerados. A perda de calor nessa região é somente para o meio ambiente, sendo relativamente pequena, devido ao pequeno comprimento (200 mm) do canal e à baixa condutividade térmica do acrílico ( $\lambda_{ac} = 0,184 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), conforme Figura 6.1.

Para que ocorra o escoamento no canal é necessário que exista uma diferença de pressão entre a entrada e a saída do canal. Devido à condição de não-deslizamento, sabe-se que a velocidade na parede é zero ao longo de todo o trajeto. Assim, as condições de contorno foram definidas no *CFX-PRE* como sendo a pressão na entrada  $p = 1 \text{ atm}$  e na saída  $p = 0 \text{ atm}$ .

Uma solução, definida como sendo uma mistura de n-docosano solubilizado em n-heptano, com as propriedades físico-químicas definidas, é inserido no domínio computacional com uma velocidade de 0,08308 m/s e temperatura de 40°C, ou seja,

temperatura acima da TIAC que é de 34,1°C. As paredes laterais do canal retangular foram definidas como simétricas (não-escorregamento nas paredes), a parede superior definida como parede quente (T = 40°C) e inferior como parede fria (T = 20°C).

O conjunto de equações resolvidas numericamente pelo código computacional CFX 11.0, para o escoamento laminar, são equações de conservação de massa e momento e transferência de calor que estão definidas no Manual do CFX 11.0 e, além disso, foram implementadas, através de arquivos CCL, as equações necessárias para descrever a deposição de parafina enquanto a solução está em escoando dentro do duto.

A formação dos cristais de parafina no escoamento da solução consiste em uma fase líquida e uma fase sólida fixa, com isso, é usada a equação do movimento de Navier-Stokes juntamente com a Lei de Darcy.

Ao ocorrer a formação de cristais na zona metaestável, é criada a resistência ao escoamento, e com isso, ocorre uma desaceleração na região de parafinação. Esses dois efeitos são incorporados através do termo fonte de Darcy para descrever a desaceleração da velocidade de escoamento na região metaestável na Equação de Momento.

Da equação geral de momento para o domínio fluido:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + S_i^M \quad (4.1)$$

O termo fonte na equação de momento pode ser representado como:

$$S_i^M = \frac{\mu}{K} U_i \quad (4.2)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do solvente, e a permeabilidade  $K$ , pode ser expressa em termos da fração volumétrica líquida,  $f_L$  ( $f_L = \text{LiqFrac}$  usado no CFX), através da equação de Kozeny-Carman:

$$K = K_{perm} = K_{star} \frac{f_L^3}{(1-f_L)^2} \quad (4.3)$$

Onde  $K_{star}$  é o coeficiente morfológico.

O termo fonte pode ser escrito como:

$$S_i^M = \frac{\mu}{K_{star}} \frac{(1-f_L)^2}{f_L^3} U_i \quad (4.4)$$

Na região líquida, o termo de fonte se torna zero. Na região sólida, o termo fonte tende a infinito, forçando a velocidade a se igualar nas duas regiões. Para evitar divisão por zero, foi necessário colocar contorno nas variáveis, impedindo indefinições durante a computação, garantindo que o valor não se torne negativo.

$$S_i^M = \min\left(\hat{C}, \frac{\mu}{K_{star}} \frac{(1-f_L)^2}{f_L^3}\right) U_i \quad (4.5)$$

Logo, na região em que se inicia a formação de cristais (zona metaestável), a Equação de Momento se aproxima da Lei de Darcy. Sendo assim, com o aumento da quantidade de sólido saturado, o termo fonte domina todos os outros termos na equação de momento, e como foi dito anteriormente, força a velocidade na região líquida para zero.

A Lei de Darcy pode se aproximada como:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} U_i \approx -\frac{\mu}{K_{star}} \frac{(1-f_L)^2}{f_L^3} U_i \quad (4.6)$$

O valor de  $K_{star}$  depende da morfologia média dos poros. Esse valor foi determinado através dos dados obtidos por ALVES (1999) onde, o diâmetro médio da partícula de docosano foi determinado como sendo  $D_p = 1,0 \cdot 10^{-4}$  m. Assim, o coeficiente morfológico é:

$$K_{star} = \frac{150}{D_p^2} = 1,5 \times 10^{+10} \quad (4.7)$$

$Rperm$  está implementado no CFX no subdomínio e é chamado de Coeficiente Linear de Resistência, e é implementado de forma a garantir que a fração de líquido não assuma valores negativos.

$$Rperm = \max(0, \min(RpermMax, Kperm))$$

$$RpermMax = \frac{\mu}{K_{perm}} = 1,9 \times 10^{+07} \quad (4.8)$$

Uma equação específica é usada para calcular a fração de massa ao longo do canal em estudo definido no CFX como *Algebraic Equation* e dado como *YsoluteSOL* para o docosano sólido. As expressões utilizadas como *Algebraic Equation* avaliam os valores entre 0 e 1 ao longo do domínio. A fração mássica dos componentes sempre tem que somar 1. A diferença entre a unidade e a soma dos outros componentes é utilizada como *Constraint*:

$$Y_{soluteSOL} = 1 - Y_{soluteLIQ} - Y_{solvent} \quad (4.9)$$

A existência da supersaturação no meio é um requisito essencial para que ocorra o processo de cristalização. A curva de solubilidade utilizada foi determinada por ALVES (1999) e significa que em determinada temperatura (T1), a concentração de equilíbrio é x1. Na temperatura (T2), a concentração de equilíbrio é x2. A T2<T1 a diferença x1-x2 é o que precipitou na forma sólida.

A solubilidade do docosano no heptano foi determinada por ALVES (1999) como sendo:

$$X_{sat} = 10^{(19.02 - (3980.17/T)) * (1/T^{2.57})} \quad (4.10)$$

A fração de solvente utilizada como dado de entrada de acordo com a curva de solubilidade e chamada de *Algebraic Equation* no CFX foi de:

$$Y_{solvent} = 0.081 \quad (4.11)$$

Fração de soluto na solução, restringindo para que não seja maior que a solubilidade:

$$Y_{soluteLIQ} = \min(1 - Y_{solvent}, X_{sat}) \quad (4.12)$$

O docosano líquido é usado no subdomínio do CFX como *Constraint*.

### 4. 3. Estudo de Malhas

As malhas estudadas possuem números de células descritos na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Número de células das malhas:

Malha	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Número de elementos	18900	37800	189000	282376	378000
Número de nós	19176	37976	188376	283500	376376

Foram construídos quatro tipos de malhas, na intenção de avaliar qual refino que melhor representa o fenômeno em questão. As malhas simuladas possuem 18900, 37800, 189000, 282376 e 378000 elementos. Para o refino das mesmas, levou-se em

consideração, que os volumes de controle permaneçam sempre os mesmos. Em todos os casos foram utilizados os mesmos parâmetros de simulação.

### 4.3.1. Comparação de Malhas

A seguir, são apresentadas as comparações entre as espessuras de depósito de parafina do estudo experimental e estudo numérico.

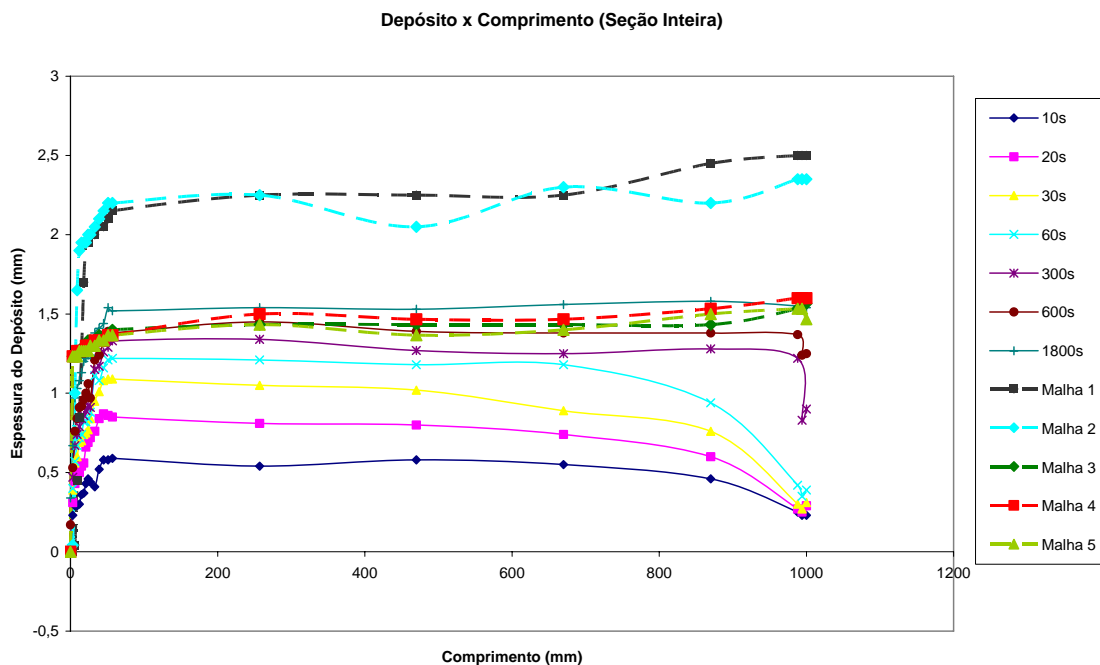


Figura 4. 1: Comparação do teste de malha entre as espessuras de depósito de parafina do estudo experimental e estudo numérico.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que as malha 1 e malha 2 apresentaram uma solução numérica para deposição de parafina com grande diferença com relação ao depósito de parafina experimental. O uso das malha 4 e malha 5, no entanto, exigiu um esforço computacional demasiadamente maior comparado com as outras malhas, como era de se esperar, pois é muito mais refinada. Porém a redução do erro aparentemente não justifica a sua utilização. Finalmente a malha 3 apresenta-se como a melhor alternativa, pois exige um esforço computacional intermediário e um resultado muito próximo ao estudo experimental para deposição de parafina.



## **5. MÉTODOS E MONTAGEM EXPERIMENTAL**

### **5. 1. Introdução**

O propósito deste capítulo é descrever a bancada experimental utilizada neste trabalho com os seus detalhes e características. O trabalho de tese está focado no estudo numérico do escoamento de n-docosano dissolvido em n-heptano e sua cristalização nas paredes frias do duto.

A bancada experimental utilizada para a visualização do estudo experimental do escoamento foi desenvolvida por LEIROZ (2004) e melhorada pelo Engenheiro Daniel Prata da PUC-RIO.

Em todos os ensaios utilizou-se como fluido de trabalho soluções de parafina comercial em querosene. Porém, por causa do desconhecimento da concentração e composição da parafina e do querosene, suas propriedades físico-químicas foram aproximadas às propriedades do n-docosano e n-heptano na simulação numérica.

A metodologia experimental utilizada nos ensaios e a descrição dos equipamentos utilizados, assim como os reagentes empregados serão descritos a seguir.

### **5. 2. Metodologia**

A metodologia empregada para realização do presente estudo constitui na combinação do estudo experimental e estudo numérico através de um código comercial de CFD, chamado CFX.

O estudo experimental do trabalho envolveu a monitoração do campo de temperatura em uma amostra de parafina comercial em querosene, onde a temperatura de entrada e as condições de contorno eram controladas.

Esta etapa do trabalho teve por objetivo validar o estudo numérico desenvolvido.

### 5.3. Descrição dos Equipamentos

De uma maneira geral, a seção de teste foi projetada e construída para realizar ensaios até sob regime turbulento, porém o objetivo do trabalho é simplificar o problema investigado, ou seja, o estudo da deposição de parafina foi realizado no caso mais simples de escoamento laminar em canal retangular.

O aparato experimental principal utilizado (Figura 5.1) era constituído por uma seção de testes (Figura 5.2), de seção retangular, construído em acrílico, cobre e vidro para facilitar medidas visuais, sendo o canal a parte principal do aparato. Nele foram realizados os experimentos de deposição de parafina com o acompanhamento visual do comportamento transiente do fenômeno.

O aparato era composto por um reservatório de alimentação, uma bomba de cavidades progressivas e um canal retangular de dimensões internas 8 x 20 x 1300 mm (largura x altura x comprimento), que é o coração da seção de testes (região de visualização). A Figura 5.1 mostra esquematicamente o detalhe da disposição de cada um dos elementos da seção de teste.

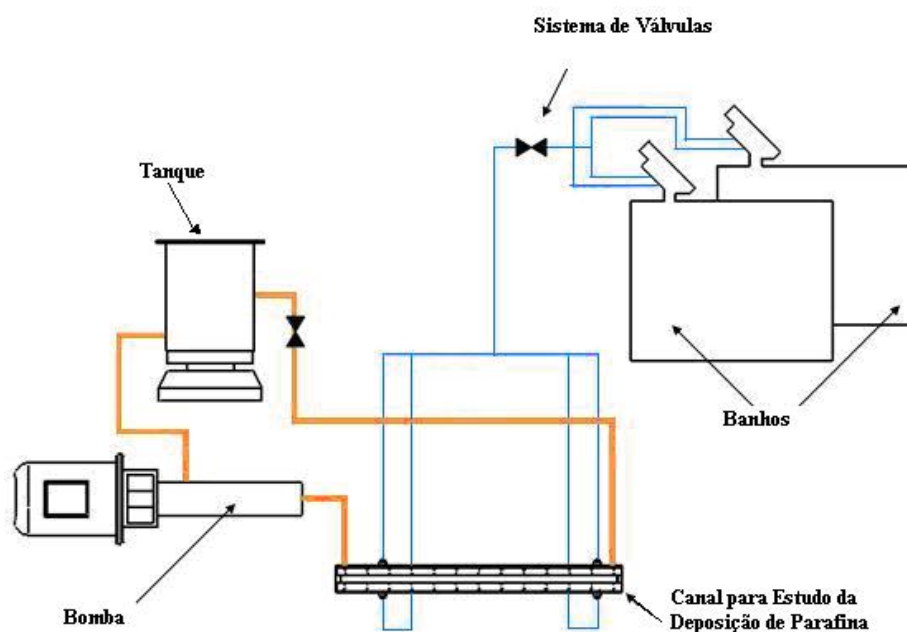


Figura 5.1: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina em condições de escoamento.

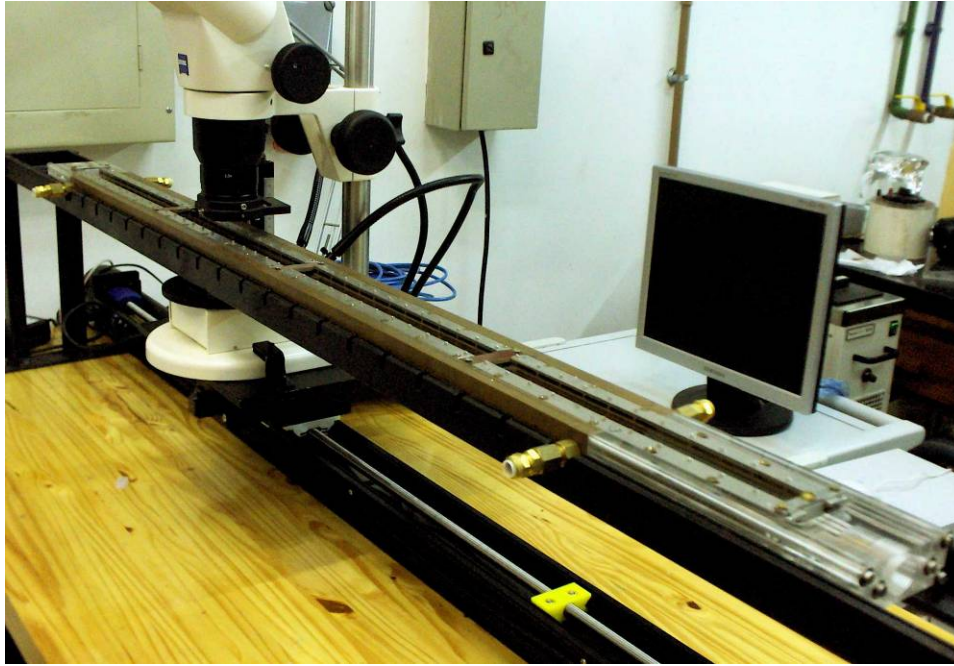


Figura 5.2: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina.

O canal é constituído por duas paredes de cobre que atuam como espaçadores das duas paredes de vidro. As paredes laterais que eram de vidro, com 20 x 1000 mm (largura x comprimento) foram projetadas de modo a permitir a visualização do processo de deposição. As outras duas paredes de cobre, de 8 mm (espaço entre os vidros), foram usinadas a partir de blocos que contendo um furo axial por onde era circulada água proveniente de banhos termostáticos, podiam controlar a temperatura. Assim, essas paredes de cobre atuavam como aletas condutoras que garantiam a homogeneidade da temperatura imposta como condição de contorno para as diferentes condições de deposição estudadas.

A temperatura das duas paredes de cobre era controlada por dois banhos termostáticos *Haake* modelo *Phoenix C25P* com capacidade de geração de rampas de aquecimento e resfriamento. Adicionalmente, duas peças de acrílico a jusante e a montante das paredes de cobre, davam rigidez ao canal e garantiam a visualização do escoamento antes e depois da região de deposição.

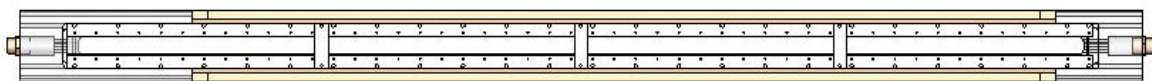


Figura 5.3: Vistas da seção teste

A Figura 5.3 mostra a montagem do canal com as duas peças de acrílico na entrada e saída. Um detalhe da construção do canal é mostrado na Figura 5.4. Nessa figura podem ser observadas as paredes de cobre e vidro que formavam a seção transversal retangular. Nas Figuras 5.5 e 5.6 é mostrada com mais detalhes a entrada e a saída do canal.

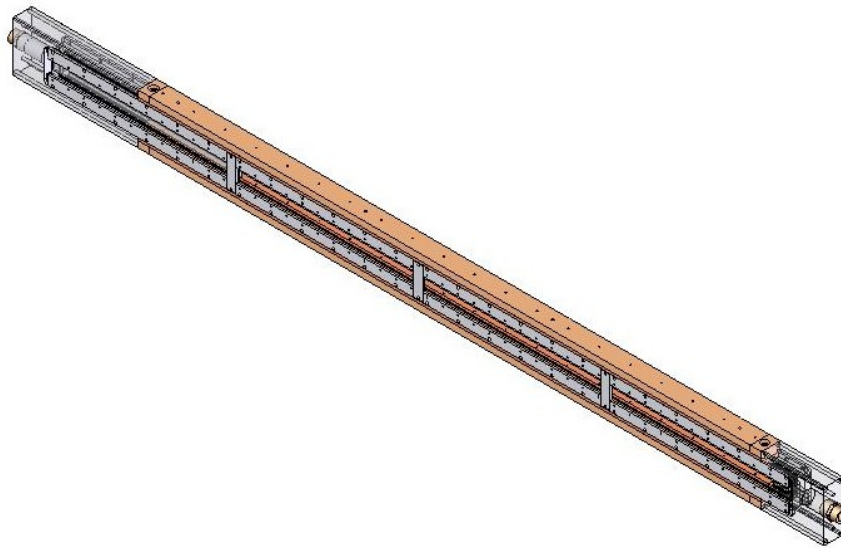


Figura 5.4: Vista da seção de teste com detalhe do cobre.

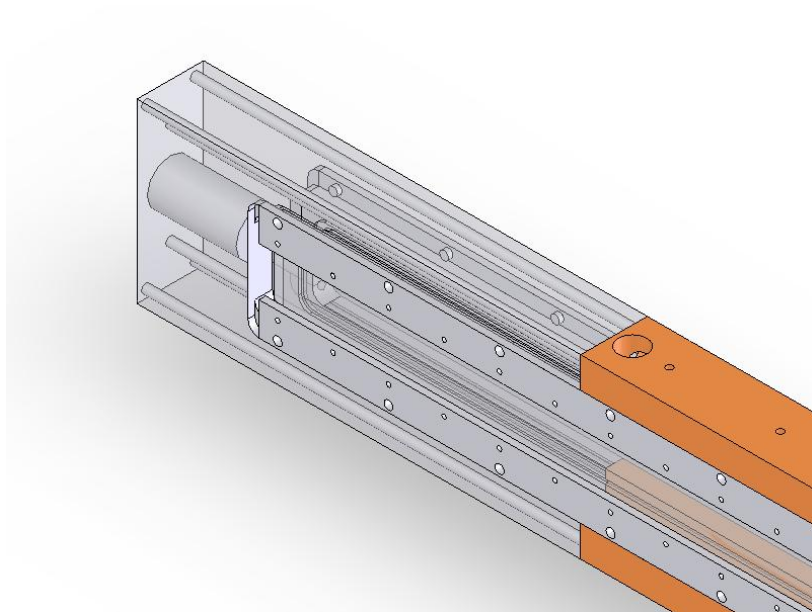


Figura 5.5: Vista detalhada da entrada do canal.

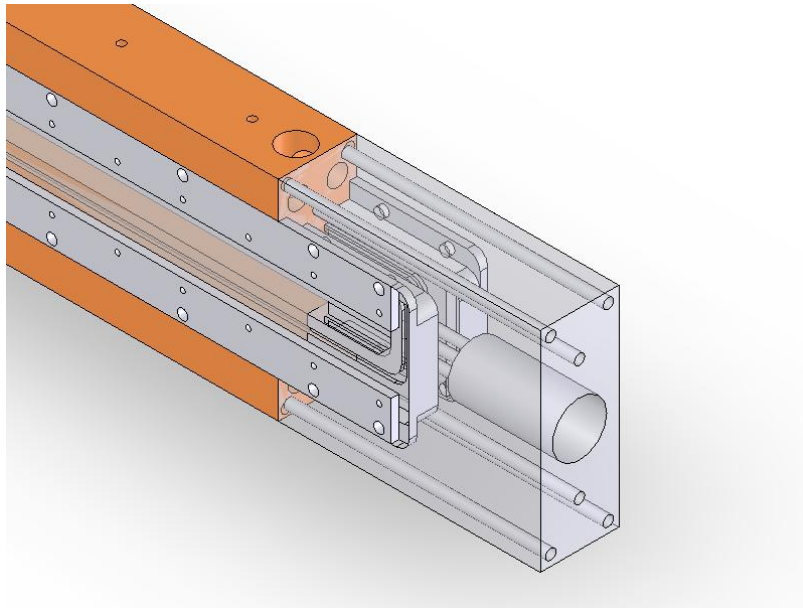


Figura 5.6: Vista detalhada da saída do canal.

O reservatório era outro elemento importante da seção de testes. Este alimentava e armazenava a solução parafina/querosene utilizada nas diferentes experiências e foi fabricado de forma cilíndrica em aço inoxidável. Uma serpentina de cobre, ligada a um banho termostático, envolvia o reservatório mantendo a temperatura da mistura controlada. A solução parafina/solvente querosene contida no cilindro era homogeneizada por um agitador de marca Fisatom modelo 713. A visualização da construção do tanque de armazenamento é mostrada na Figura 5.7.

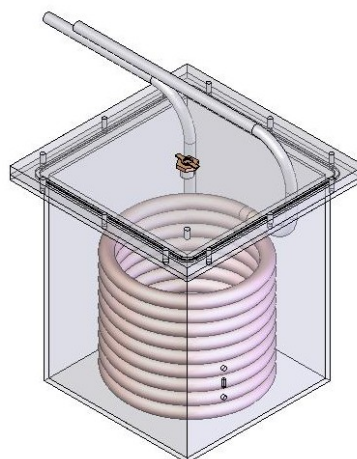


Figura 5.7: Vista do reservatório de armazenamento.

A seção de testes era alimentada por uma bomba de cavidades progressivas modelo NM015BY01L06B da marca Netzsch. Esse tipo de bomba foi escolhido devido

à sua característica de gerar vazões volumétricas constantes. Adicionalmente, foi utilizado um inversor de frequência da série CFW-08 da Weg, para controlar a rotação da bomba e em consequência facilitar o controle de sua vazão. O inversor de frequência utilizado tinha a capacidade de variar de 0 a 60 Hz com uma resolução mínima de 0,01 Hz. Foi obtida a curva de vazão da bomba em função da frequência do inversor, que pode ser encontrada no Apêndice A.4.

Mangueiras de 3/4" foram utilizadas como linhas de transporte entre o canal, o tanque de alimentação e a bomba.

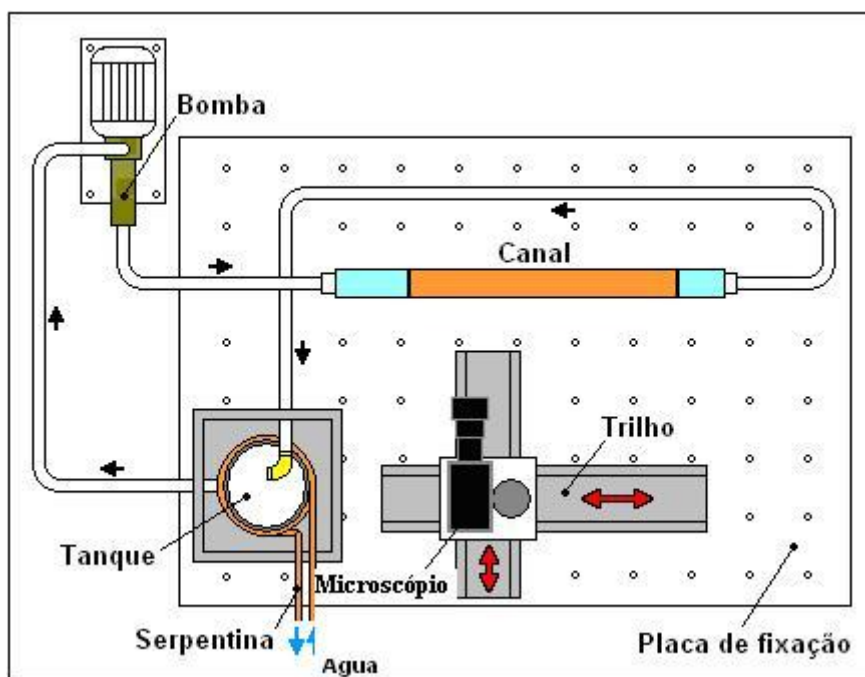


Figura 5.8: Vista superior da seção de testes que mostra o posicionamento do microscópio.

Com a finalidade de minimizar as vibrações geradas durante o funcionamento da bomba, o tanque de alimentação e o canal foram montados sobre uma placa de alumínio com bases de borracha. Essa placa de alumínio permitia a fixação dos elementos mediante uma matriz de furos roscados.

Foi instrumentada uma região do canal com 40 termopares tipo E com diâmetro de 0,12 mm, sendo 20 termopares de um lado e 20 do outro. Um dos termopares, introduzido numa agulha hipodérmica, controlava a temperatura da solução parafina/querossene na entrada do canal. Os termopares foram colados junto ao cobre com a finalidade de conhecer a distribuição espacial da temperatura ao longo do canal.

Os termopares utilizados foram conectados a um sistema de aquisição de dados AGILENT modelo 34970A. A temperatura era armazenada em intervalos de tempo de 6 segundos.

Para acompanhar e visualizar o fenômeno de deposição de cristais durante a realização das experiências foi usado um microscópio ótico ZEISS AxioCam MRc. O microscópio estava ligado a um microcomputador e a aquisição dos dados era feita através de fotos tomadas de 5 em 5 segundos. O microscópio foi montado sobre trilhos de forma a permitir a movimentação axial e acompanhar visualmente toda a seção de teste para deposição de parafina.

A temperatura do sistema e as fotos eram monitoradas através do programa LabVIEW, por um período de 30 minutos, gerando arquivos com sequências de imagens e distribuição de temperatura.



Figura 5.9: Vista do microscópio ótico ZEISS.

#### **5. 4. Solução Parafina/Querosene**

Para os experimentos realizados, foi usada uma solução de 20% em peso de parafina em querosene. A parafina utilizada nas experiências foi da marca Vetec com um ponto de fusão na faixa de 56 a 58°C. O querosene utilizado como solvente,

também foi da Vetec. Para o preparo da solução, fundiu-se totalmente 2 kg de parafina sendo posteriormente misturado com 8 kg de querosene. A TIAC dessa solução medida por viscosimetria resultou ser de 34,1°C. No CFX foram utilizadas as propriedades do n-docosano e do n-heptano e nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 encontram-se essas propriedades do n-docosano e do n-heptano.

Tabela 5.1: Propriedades gerais do n-docosano:

FÓRMULA	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
Peso Molecular	310,61
Temperatura de ebulição	641,15K (365,8°C)
Temperatura de fusão	317,15K (44°C)
Massa específica	0,7944 g/mL
C <sub>p</sub>	598,1 J/mol.K (sólido a 25°C)
	739,0 J/mol.K (líquido a 80°C)
$\Delta H_{\text{sub}}$	172,6±2,0 kJ/mol (391K)
$\Delta H_{\text{d}}$	78,500 kJ/mol (316,9K)
$\Delta S_{\text{d}}$	246,52 J/mol.K (316,9K)
Calor latente	252 kJ/kg

Tabela 5.2: Entalpia de mudança de fase do n-docosano

$\Delta H_{\text{fase}}$ (kJ/mol)	Temperatura (K)	Fase Inicial	Fase Final
$\Delta H_{\text{tr}}$ (28,870)	316,15	Cristalina, II	Cristalina, I
$\Delta H_{\text{fus}}$ (48,953)	317,15	Cristalina, I	Líquida

Tabela 5.3: Entropia de mudança de fase do n-docosano

$\Delta S_{\text{fase}}$ (kJ/mol)	Temperatura (K)	Fase Inicial	Fase Final
$\Delta S_{\text{tr}}$ (92,12)	316,15	Cristalina, II	Cristalina, I
$\Delta S_{\text{fus}}$ (154,4)	317,15	Cristalina, I	Líquida



Tabela 5.4: Propriedades gerais do n-heptano:

FÓRMULA	$C_7H_{16}$
Peso Molecular	100,20
Temperatura de ebulição	371,45 K (98,3°C)
Temperatura de fusão	182,6 K (-90,55°C)
Massa específica	0,700 g/mL (25°C)
$C_p$	-
	225,0 J/mol.K (líquido a 80°C)
$\Delta H_{sub}$	57,9 (183K)
$\Delta H_{fus}$	14,053 kJ/mol (182,59 K)
$S_{fus}$	76,96 J/mol.K (182,59K)
$\Delta H^{vap}$	31,77 kJ/mol.K (371,6K)
Calor latente	141 kJ/kg
$T_c$	540,2 K

## 5. 5. Procedimento Experimental

Todo o procedimento experimental desenvolvido no trabalho foi feito em condições de escoamento laminar.

A preparação do aparato experimental era iniciada com a solubilização da parafina no querosene dentro do tanque de armazenamento mediante o aquecimento da solução a uma temperatura de 40°C (acima da TIAC). Depois de solubilizada a parafina no tanque, a solução era homogeneizada fazendo uso do agitador. Somente depois de garantir que a parafina do tanque de armazenamento estivesse completamente dissolvida, era acionada a bomba na vazão requerida.

Ao mesmo tempo em que a parafina era solubilizada era feito o monitoramento da temperatura dos banhos termostatizados, que circulavam com água pelas paredes de cobre.

Assim que a temperatura das paredes de cobre atingisse o estado estacionário, de um lado com 20°C e do outro com 40°C, iniciava-se o experimento,

mediante o acionamento do sistema de válvulas que controlava a passagem da solução pelo canal.

Durante 30 minutos era feita a aquisição dos dados através de fotos de 5 em 5 segundos e a leitura da temperatura de 6 em 6 segundos.

## 6. RESULTADOS

O sistema em estudo é uma mistura de hidrocarbonetos inicialmente homogeneamente misturados formando uma só fase líquida, um sistema homogêneo. Tão logo se forme uma fase sólida com cristais de alguma parafina, o sistema passa a ter mais de uma fase, um sistema multifásico.

A mistura (parafina/querosene) homogênea entra no duto de seção retangular a uma temperatura aproximadamente uniforme e com fluxo de massa constante.

O duto é formado por duas regiões denominadas região de entrada e região de teste. Na região de entrada o duto retangular é de acrílico e encontra-se entre o reservatório e a região de teste.

Na região de teste as paredes do canal são de vidro e de cobre, por onde há circulação da água proveniente de um banho termostático. Nessas superfícies, a perda de calor é alta devido à condutividade térmica do cobre ( $\lambda_{Cu} = 385,9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) e a grande diferença de temperatura entre o fluido e a superfície externa do cobre. A Figura 5.1 apresenta um esboço do sistema.

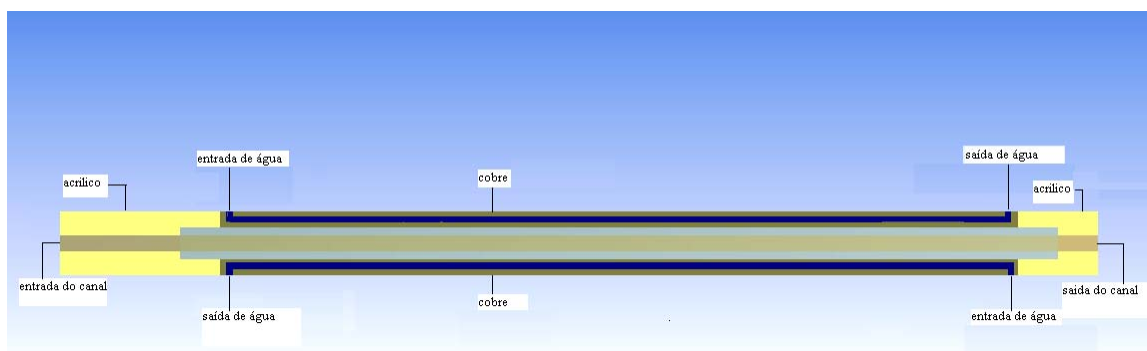


Figura 6.1: Vista frontal do duto retangular.

O processo de formação e deposição de parafina somente ocorre para temperaturas inferiores ao ponto de névoa (TIAC) ou de nucleação.

Inicialmente, foram feitas várias considerações a cerca do fenômeno de deposição de parafina. O fenômeno depende dos campos de velocidade, temperatura e concentração do n-docosano no n-heptano.

O objetivo deste Capítulo é apresentar os resultados do estudo da simulação numérica para deposição de parafina, assim como, comparar com o resultado do estudo experimental do escoamento laminar.

## 6. 1. Visualização Experimental do Escoamento e Comparação com Resultados Numéricos

A sessão de fotos apresentada a seguir mostra imagens do escoamento obtidas para diferentes tempos e comprimento da seção, as quais são especificadas nas legendas de cada figura. O intuito é mostrar o comportamento da deposição de acordo com o tempo e a posição no duto.

Os resultados foram obtidos a partir da seção de teste construída na PUC-RIO elaborada por LEIROZ (2004) e aperfeiçoada pelo Engenheiro Daniel Prata, da PUC-RIO. As condições de escoamento estabelecidas foram para regime laminar e as fotos geradas foram feitas na entrada da seção, ou seja, na interseção acrílico/cobre, a 9 mm, a 15 mm e a 1000 mm dessa interseção.

Considerou-se para o experimento uma mistura de parafina/querosene com uma fração volumétrica de 20% a uma temperatura de entrada  $T_e = 40^\circ\text{C}$ ,  $Re = 896$  e temperatura de parede a  $20^\circ\text{C}$  e a  $40^\circ\text{C}$ . O processo foi em regime permanente e a TIAC da solução foi de  $34,1^\circ\text{C}$ , sendo feito por viscosimetria. O Reynolds calculado encontra-se no Apêndice A.6.

As Figuras 6.2 a 6.5 representam a evolução do escoamento, em regime permanente, de acordo com o tempo e em determinado trecho da seção. Observa-se ainda, devido à dificuldade de vedação, a presença de cola e borracha de vedação na interseção acrílico/cobre em todos os tempos da Figura 6.2.





Figura 6.2: Interseção acrílico/cobre para  $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$  e  $30min$ .

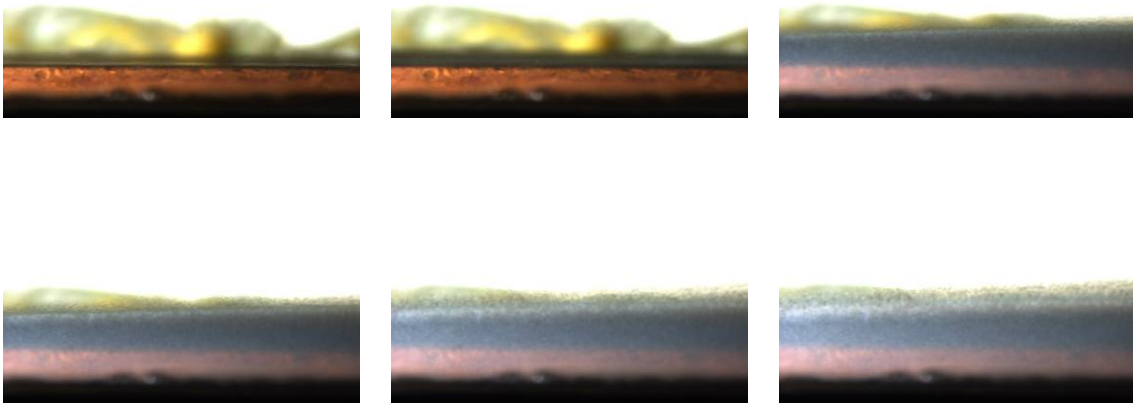


Figura 6.3: A 9 mm da entrada para  $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$  e  $30min$ .

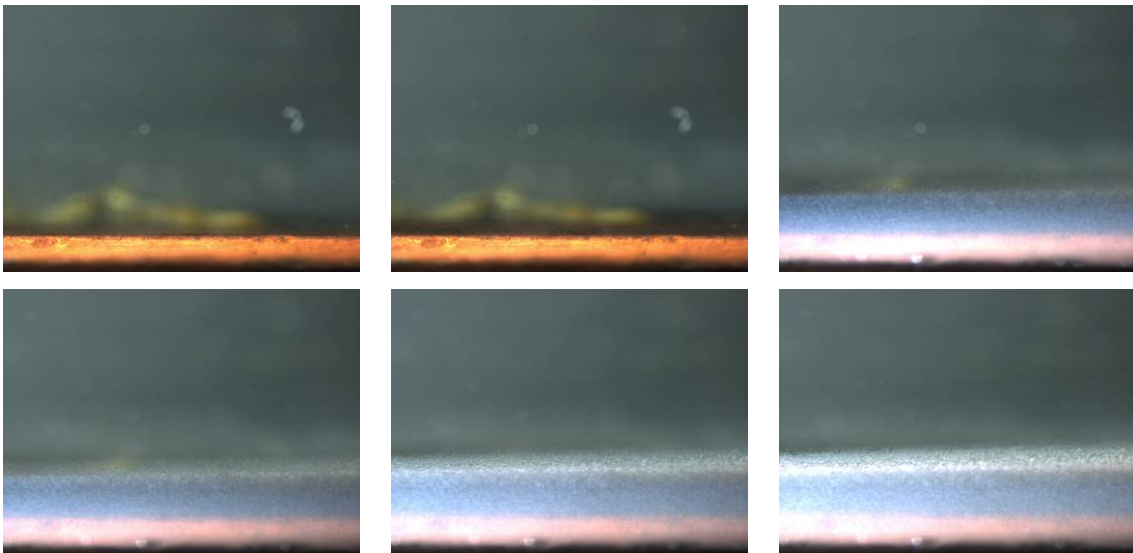


Figura 6.4: A 15 mm da entrada para  $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$  e  $30min$ .

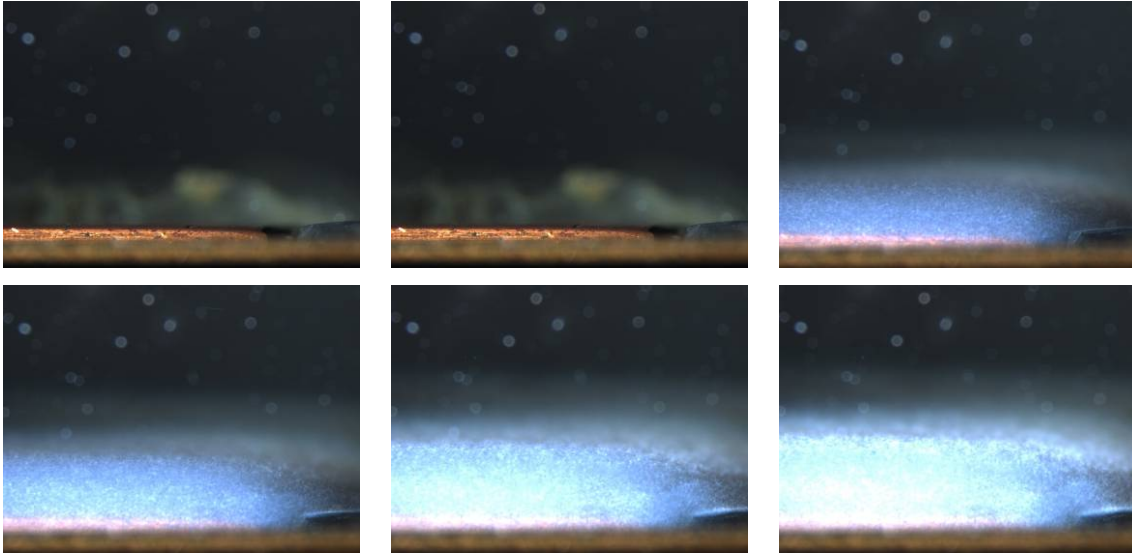


Figura 6.5: A 1000 mm da entrada para  $t = 0s, 5s, 5min, 10min, 20min$  e  $30min$ .

Segundo LEIROZ (2004), existe uma simetria nos depósitos, indicando que os efeitos gravitacionais não são um mecanismo relevante no processo de formação do depósito de parafina, com isso, foi adotado o critério de visualização para somente um dos lados do experimento.

Um segundo critério adotado por LEIROZ (2004) foi relativo à temperatura de parede, onde foi adotada a temperatura na parede fria de  $20^{\circ}C$  para não produzir o bloqueio total da seção de teste.

A Figura 6.6 apresenta os resultados experimentais da espessura do depósito obtidos de acordo com a variação do tempo em toda a extensão do canal. O valor de  $Re$  foi de 896. O tempo de duração do experimento foi de 30 minutos e a cada 5 segundos era feito o registro das fotos do experimento para posterior medição da espessura do depósito.

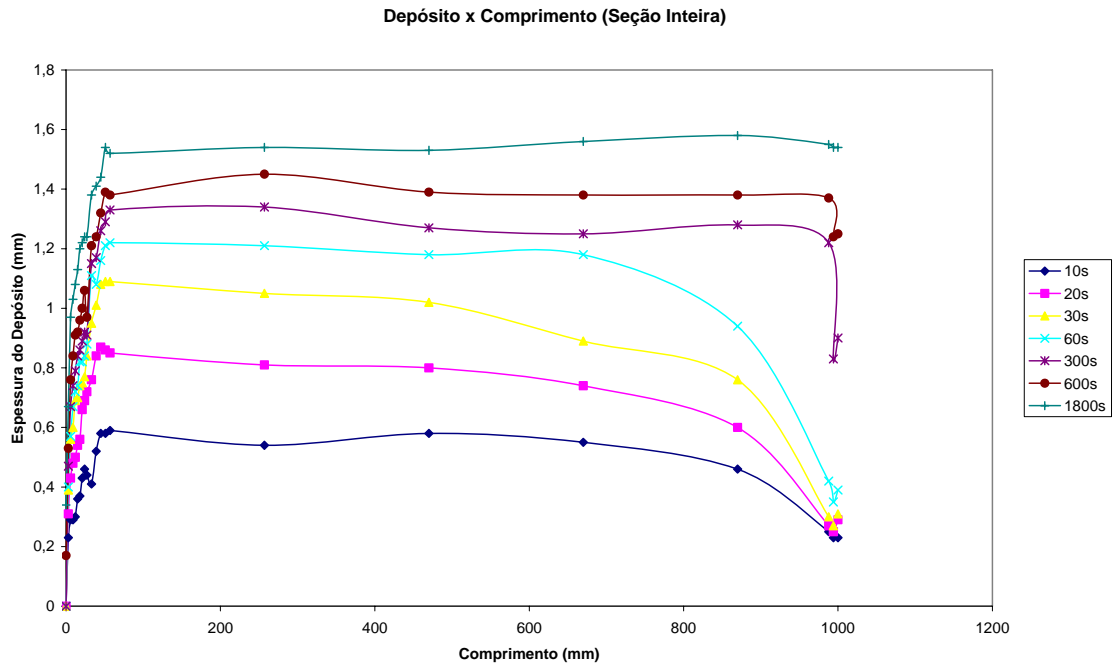


Figura 6.6: Espessura do depósito em função do comprimento do canal ao longo do tempo utilizando a mistura querosene/parafina em um escoamento laminar no estudo experimental.

A Figura 6.7 apresenta os resultados experimentais da espessura do depósito obtidos de acordo com a variação do tempo em um determinado trecho do canal. O valor de  $Re$  foi de 896. O tempo de duração do experimento foi de 30 minutos e a cada 5 segundos era feito o registro das fotos do experimento para posterior medição da espessura do depósito.

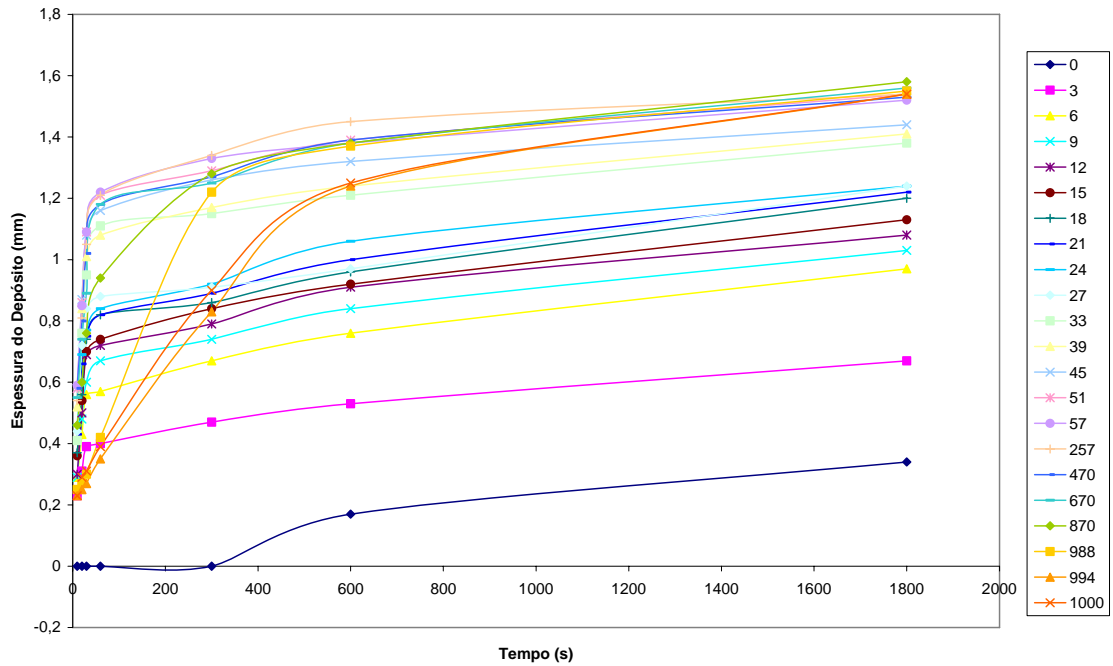


Figura 6.7: Espessura do depósito ao longo do canal e do tempo utilizando a mistura parafina/querosene em um escoamento laminar no estudo experimental.

De acordo com os gráficos das Figuras 6.6 e 6.7 há duas regiões de interesse. A primeira onde há um crescimento do depósito ao longo do comprimento até certo valor e outra que permanece constante para todos os tempos. Pode-se observar um comportamento logarítmico (Figura 6.8) do crescimento, ou seja, diminui a velocidade do depósito, porém é sempre crescente. Teoricamente, para tempo grande o duto vai entupir nessa primeira região, onde há o crescimento do depósito.



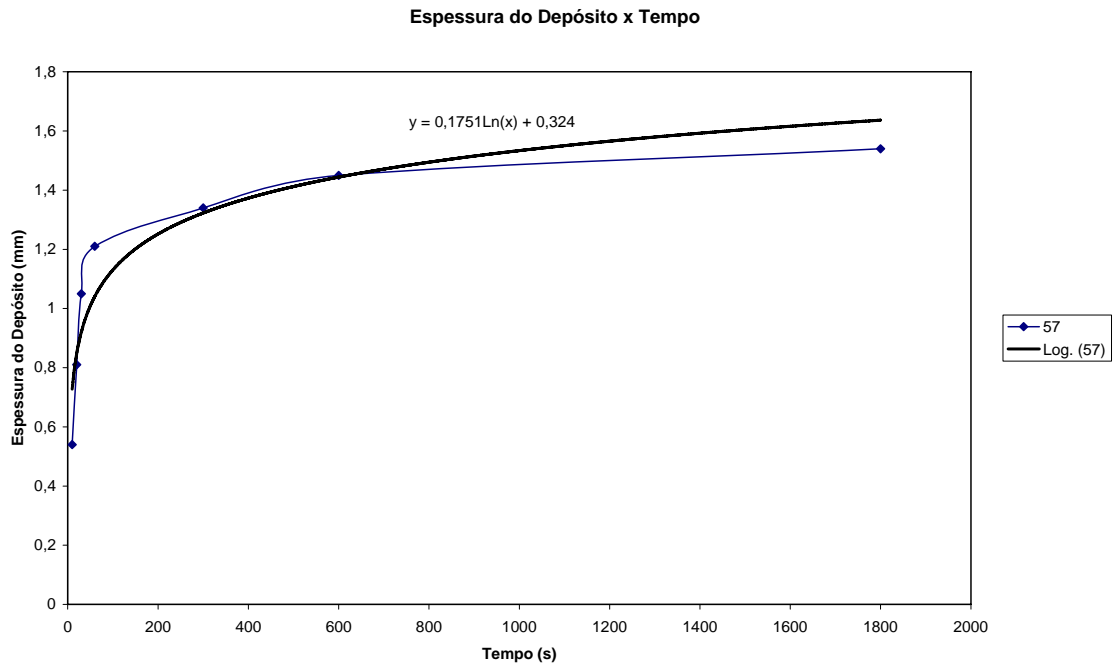


Figura 6.8: Comportamento do crescimento logarítmico do depósito no trecho de 57 mm da interseção acrílico/cobre do estudo experimental.

Considerando a geometria utilizada na experiência desenvolvida por LEIROZ (2004), foi implementado no CFX um modelo de deposição de acordo com a geometria desenvolvida.

A geometria e a malha para essa simulação foram criadas no programa *WORKBENCH*, no qual a malha foi criada utilizando o *CFX-MESH*. A malha possui 188.376 nós e 189.000 elementos. (Figura 6.11).

Após a criação da geometria, foi feita a geração da malha, onde na árvore de geração de malha (“*Tree View*”) foram definidas as regiões de interesse que são: *INLET*, *OUTLET*, *SYMM TOP*, *SYMM HIGH Z*, *SYMM LOW Z* e *COLD WALL*.

As dimensões utilizadas foram de 1000 x 20 x 8 mm (comprimento x altura x largura) e para a construção da malha utilizou-se o comando *inflation* no qual foram criadas 30 camadas para obter maior qualidade nos resultados próximos às paredes.

Devido às dificuldades na obtenção das propriedades físico-químicas da parafina e do querosene, foram utilizadas como modelo, substâncias conhecidas na composição obtendo-se assim essas propriedades. Essas substâncias foram o n-docosano e o n-heptano.

A Figura 6.9 mostra a geometria criada de acordo com o experimento.

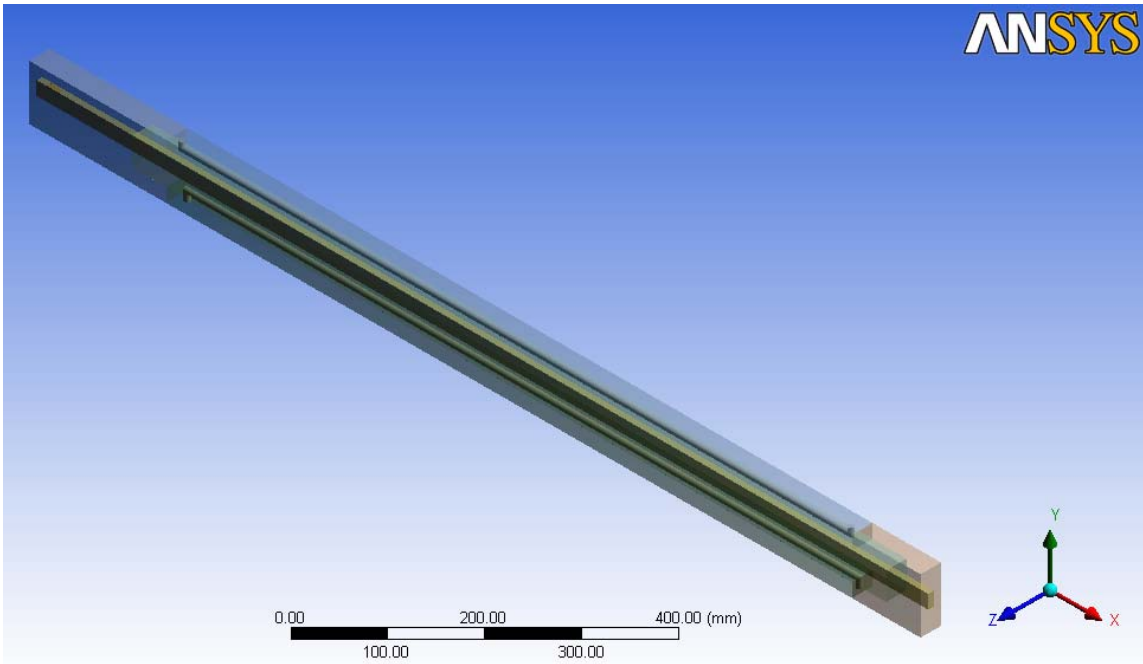


Figura 6.9: Geometria criada a partir do canal experimental

Para a simulação do escoamento foi considerado que apenas o canal retangular era relevante, e com isso, a geometria foi simplificada para a simulação, conforme Figura 6.10.

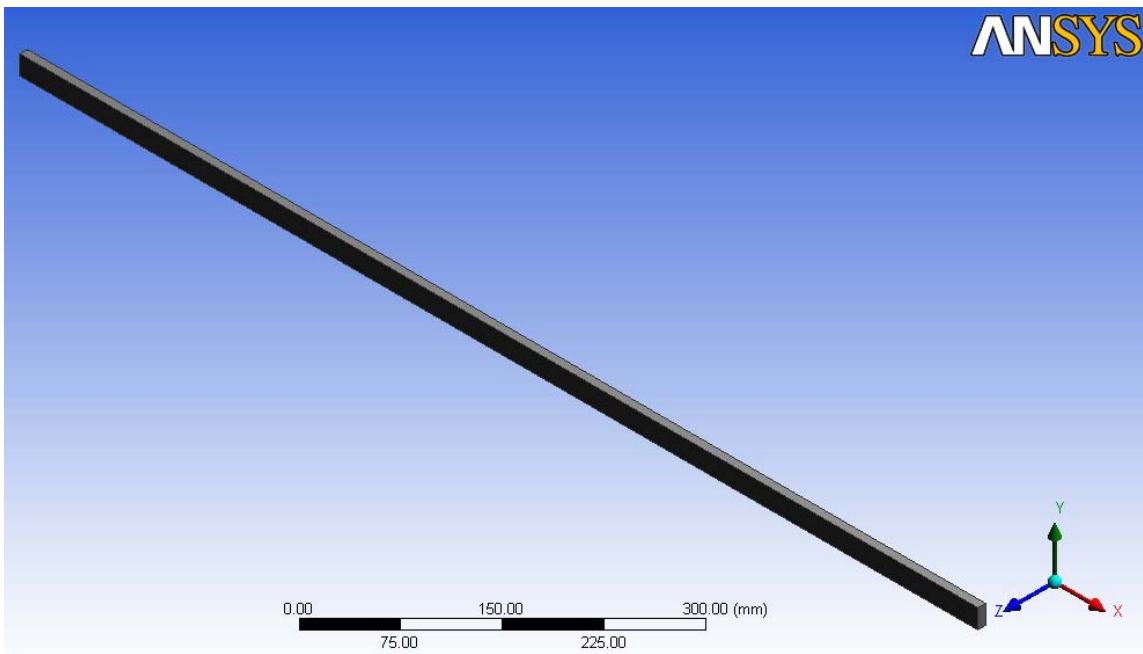


Figura 6.10: Geometria para simulação numérica do escoamento da solução.

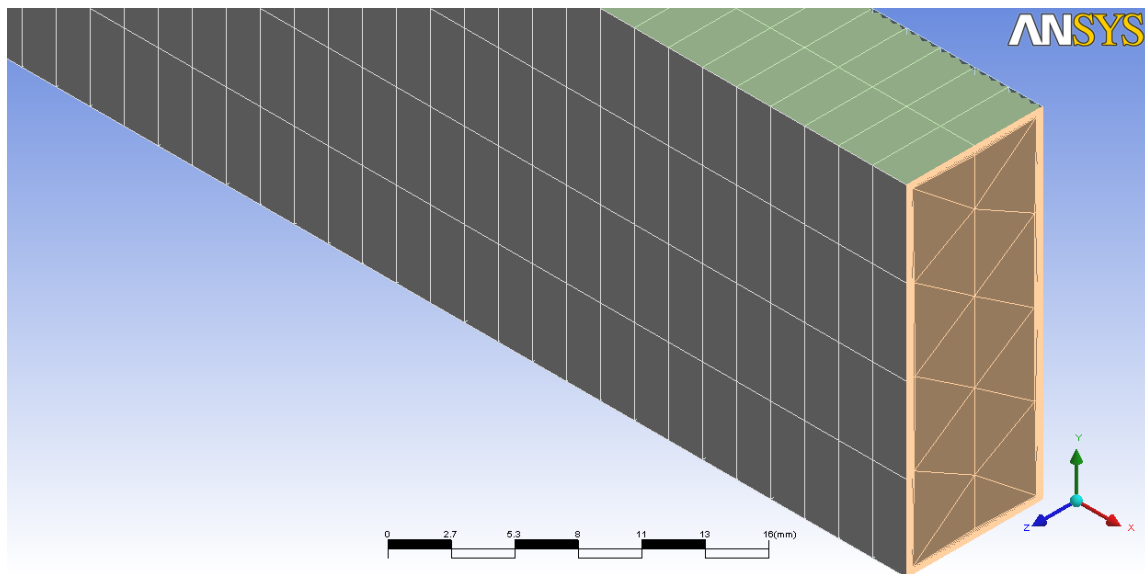


Figura 6.11: Malha gerada através do CFX-Mesh.

As condições de contorno utilizadas nessa simulação foram: velocidade do fluido na entrada de 0,08308 m/s, com temperatura de 40°C (*INLET*). Parede fria a 20°C (*COLD WALL*) e parede quente a 40°C (*SYMM TOP*).

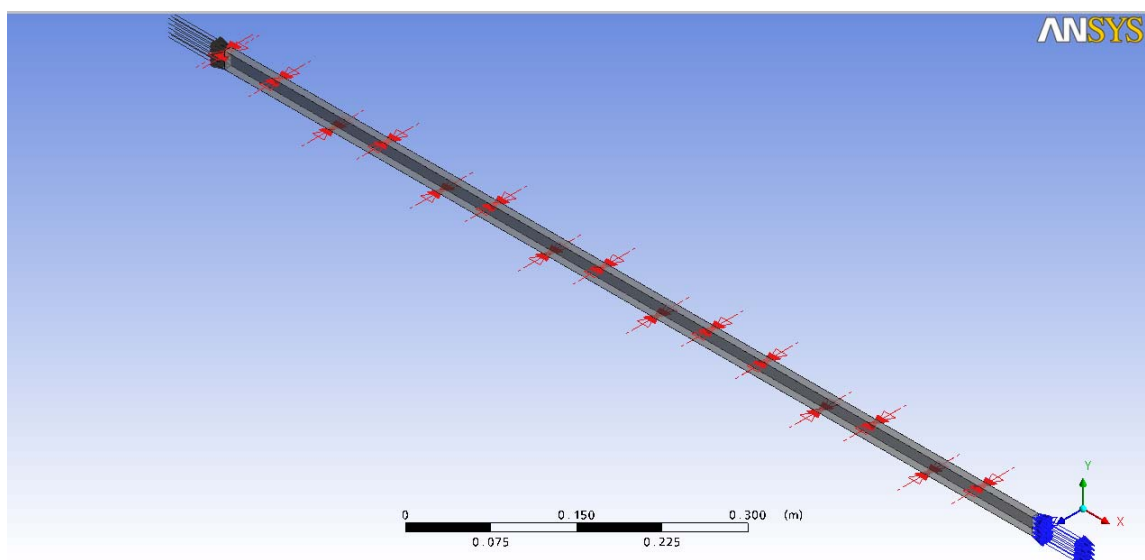


Figura 6.12: Condições de contorno da simulação.

A Tabela 6.1 apresenta as propriedades físico-químicas utilizadas na simulação.

Tabela 6.1: Propriedades físico-químicas da mistura n-docosano/n-heptano:

Propriedade	n-docosano líquido	n-docosano sólido	n-heptano
MM (g/mol)	310,607	310,607	100,204
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	785	772,25	679,6
$\lambda$ (W/m.K)	0,22	0,22	0,13125
$\mu$ (cP)	4,13	4,13	0,38849
$C_p$ (J/kg.K)	2380	1930	2,2405
$\Delta H$ (J/kg)	194600	0	0

O resultado numérico da variação da espessura para a parafina deposita ao longo do canal de seção retangular é mostrado nas Figuras 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16.

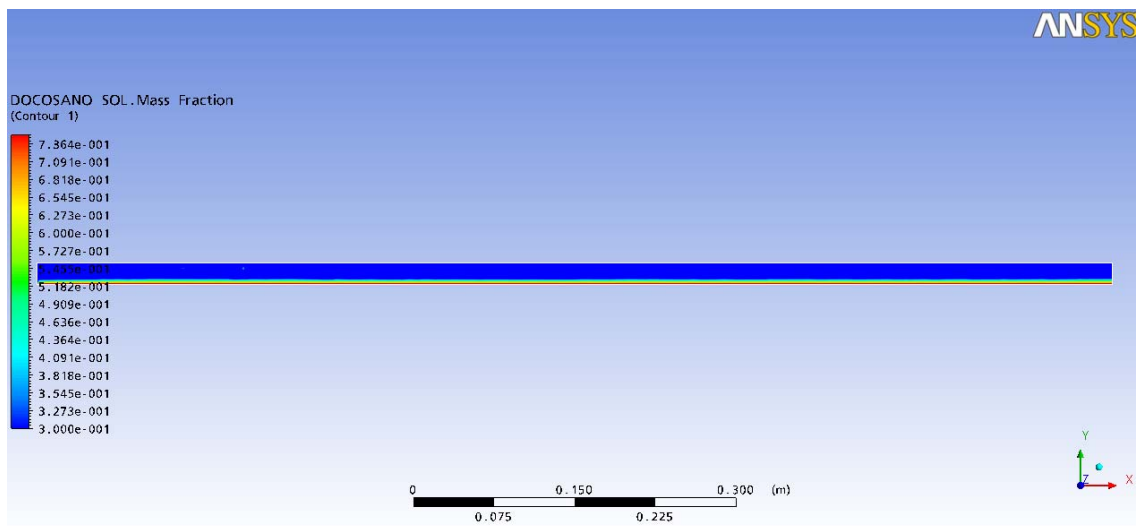


Figura 6.13: Vista do canal com deposição de parafina para o escoamento no estado estacionário.

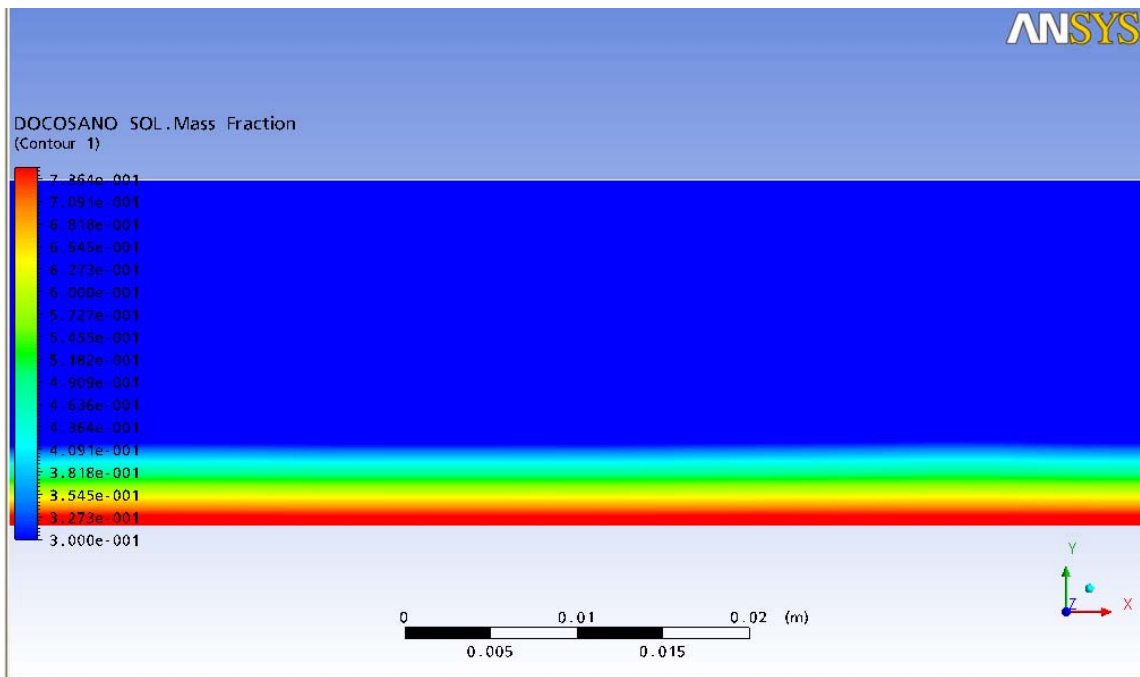


Figura 6.14: Vista ampliada da seção retangular com depósito de parafina na posição de  $x = 0,50$  a  $0,57$  m no regime estacionário.

A comparação do resultado numérico com os experimentos é apresentada na Figura 6.15. Observa-se que no trecho inicial do canal houve um crescimento do depósito similar ao crescimento do depósito do estudo experimental. Para traçar a curva obtida numericamente utilizaram-se os mesmos valores da curva axial.

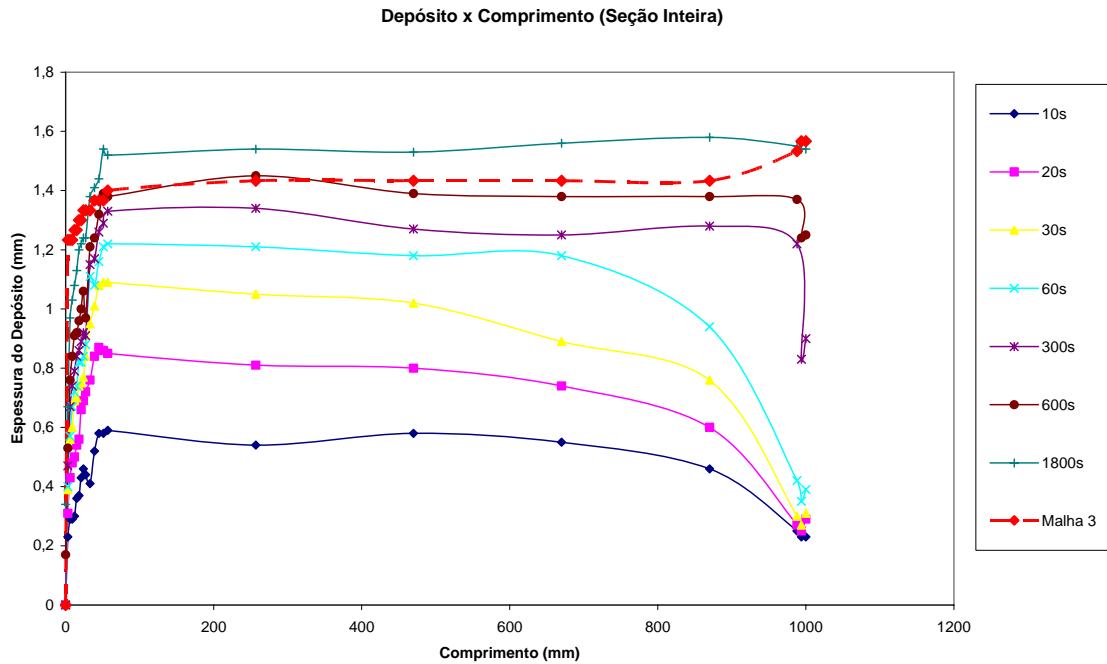


Figura 6.15: Comparação da espessura do depósito numérico com a espessura do depósito experimental.

Para definir a espessura do depósito no CFX, foi traçado uma “*polyline*” a partir do contorno, ou seja, os dados da “*polyline*” criada são exportados para um arquivo no *Excel* e calculado a altura de acordo com a posição de parede.

Essa “*polyline*” é mostrada na Figura 6.16.

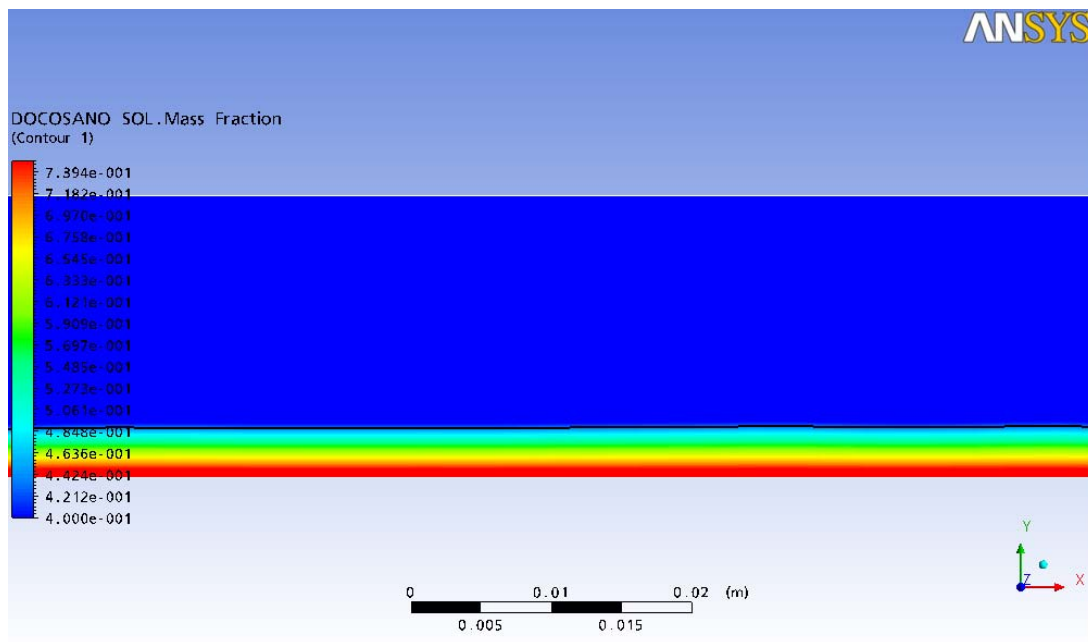


Figura 6.16: Vista da “*polyline*” na posição axial variando de 0,50 a 0,57 m.

## 6. 2. Perfil de Temperatura

Para determinação do perfil de temperatura no escoamento, foram colocados 40 termopares, sendo 20 na parede fria e 20 na parede quente. Com isso, foi possível determinar a distribuição axial de temperatura ao longo do canal.

As Figuras 6.17 e 6.18 apresentam os resultados da distribuição de temperatura ao longo do canal para parede fria e para parede quente do estudo experimental e para o estudo numérico.

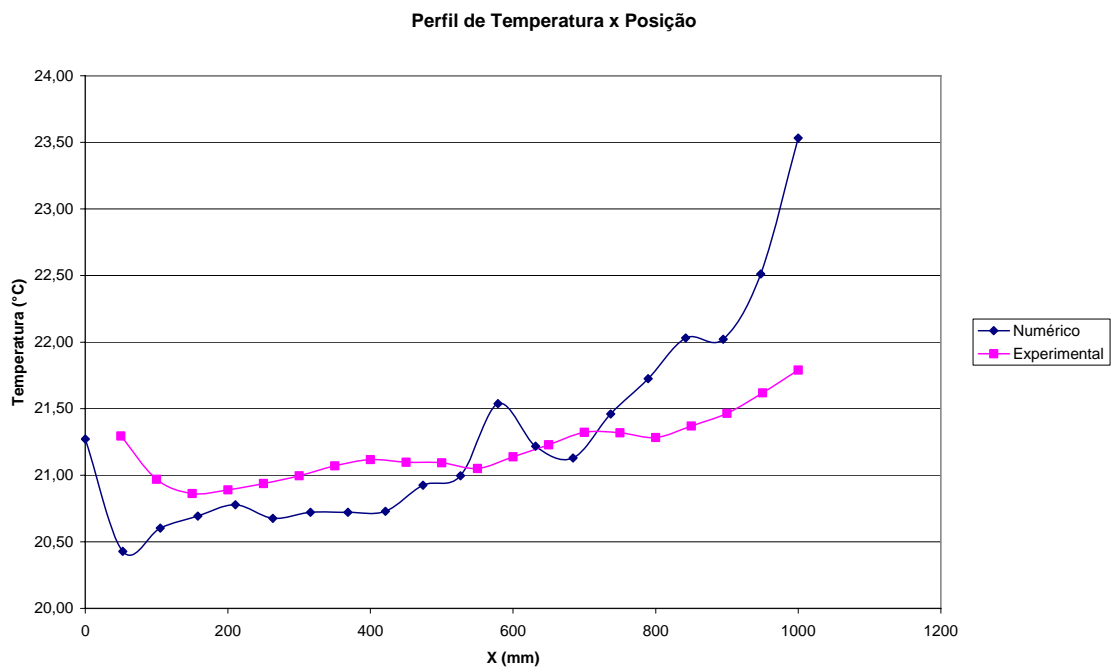


Figura 6.17: Perfil de temperatura na parede fria ao longo do canal.

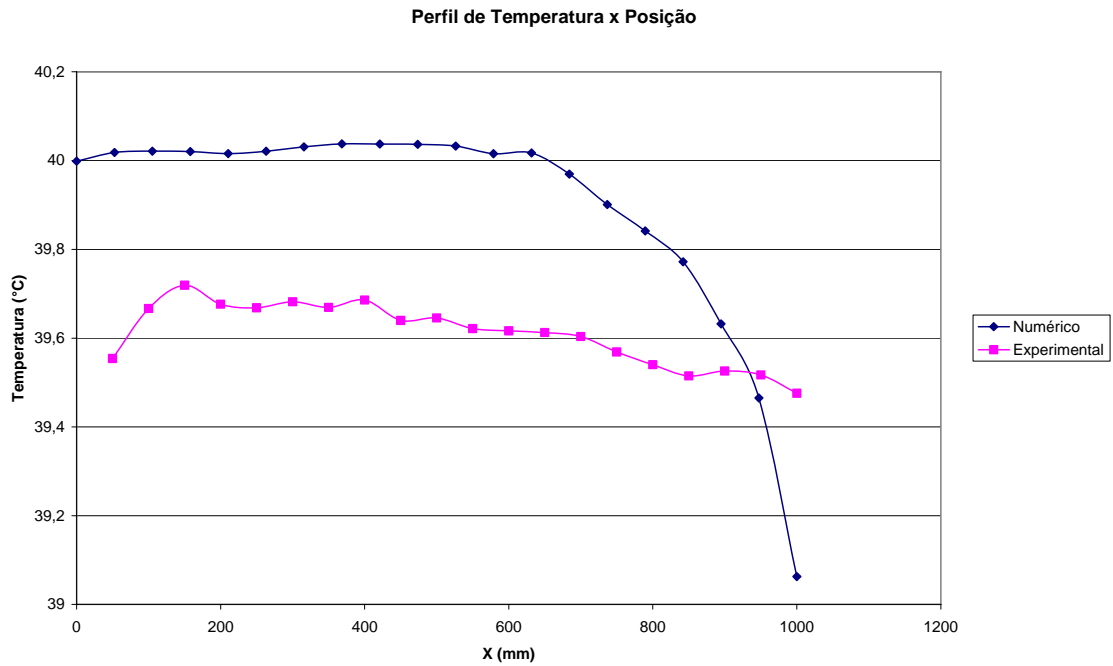


Figura 6.18: Perfil de temperatura na parede quente ao longo do canal.

Pode-se observar na Figura 6.17 que a temperatura de parede vai diminuindo até certo ponto e a seguir ocorre um aumento. Esse aumento ocorre devido ao início da nucleação da parafina na superfície resfriada, ou seja, pela liberação da entalpia de cristalização a temperatura sofre uma inversão. Nota-se que esse aumento é muito pequeno, pois essa entalpia também é discreta, da ordem de 1 kJ/kg.

Esse aumento da temperatura é caracterizado pela formação das partículas de parafina que começam a incrustar na parede liberando calor de cristalização ocorrendo conseqüentemente o aumento muito discreto da temperatura do seio do fluido.

No resultado numérico, também se pode observar a mudança na temperatura conforme o experimento, porém, essa inversão é em um ponto mais próximo com relação à entrada do canal. Esse fato ocorre devido à temperatura de entrada do processo ser de 40°C no seio do fluido, enquanto o termopar do experimento está fixado junto à parede de cobre e não no seio do fluido.



## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 7. 1. Conclusões

O objetivo principal do trabalho foi simular o depósito de parafina em uma seção retangular. Nesse trabalho estudou-se a modelagem computacional da deposição de parafina utilizando o *software* CFX. A simulação foi feita em regime estacionário para uma geometria retangular de acordo com o modelo do estudo experimental desenvolvido na Pontifícia Universidade Católica (PUC-RIO) para deposição de parafina no interior de dutos, desenvolvido por LEIROZ.

A deposição de parafinas em linhas de transporte e produção tem criado diversos problemas na produção de petróleo em diversas partes do mundo. Frequentemente os problemas são mais severos nos campos *offshore*, onde suas soluções podem custar muito. Devido à relativa dificuldade e ao custo associado com a operação nos reservatórios de petróleo, especialmente *offshore*, é necessário entender a natureza da parafinação no petróleo e algumas variáveis fundamentais que afetam a deposição durante a produção e o processamento.

A implementação do modelo foi trabalhosa, pois o trabalho foi feito para um sistema multicomponente (o líquido é composto por diversos componentes) e multifásico (coexistem as fases líquida e sólida). Para modelar o sistema foi necessário descrever termos fonte para deposição de acordo com a curva de solubilidade desenvolvida por ALVES (1999) para n-docosano em n-heptano, colocando a temperatura dependente da solubilidade, e definir as propriedades do n-docosano para os estados líquido e sólido e fazer a mistura com n-heptano a fim de entrar no domínio computacional. Além disso, foi necessário implementar um termo fonte para resistência, o qual se fez necessário para forçar a velocidade tender a zero e conseqüentemente ocorrer o aumento da fração mássica do soluto (n-docosano sólido) na parede da troca térmica ao longo do canal.

Os resultados obtidos mostram que o modelo numérico empregado em comparação com o estudo experimental está coerente. O perfil de temperatura no estudo numérico apresenta a mesma tendência do estudo experimental, mas devido a alguns

fatores, tais como, a perda de calor para o meio ambiente, a posição do termopar, as propriedades físico-químicas utilizadas no estudo numérico mostram que a inversão na curva de temperatura apresenta uma maior proximidade com relação à entrada do canal.

Comparando o resultado numérico com os experimentos, foi observado que no trecho inicial do canal houve um crescimento do depósito similar ao crescimento do depósito do estudo experimental.

Por toda dificuldade na implementação, pode-se considerar que o objetivo qualitativo da deposição de parafina utilizando um modelo numérico foi atingido. Não se encontrou na literatura nenhum trabalho iniciado nesse sentido, utilizando o *software* CFX. Além disso, apresentou-se através do estudo numérico o crescimento de depósito de parafina tal qual o ocorrido na seção experimental desenvolvida por LEIROZ e nos experimentos conduzidos naquele aparato experimental modificado.

A precisão dos resultados pode ser melhorada com a utilização de um outro modelo termodinâmico e ajustes de ordem numérica, como um maior refinamento e a implementação de outros termos fontes, mesmo sabendo do custo computacional que isso deve proporcionar.

Pode-se concluir que a hidrodinâmica no fluido pode apresentar dois efeitos diferentes na formação do depósito de parafinas:

- a) maiores impactos de partículas no depósito de parafina podem aumentar o crescimento desse depósito, e
- b) o escoamento rápido do fluido pode remover as partículas não firmemente aderidas à camada superficial do depósito.

## **7. 2. Sugestões**

A seguir serão mostradas sugestões de continuidade deste trabalho para futuramente termos um programa robusto, podendo ser usado pela indústria de petróleo:

- Adicionar modelos de cristalização, considerando nucleação primária e secundária e o crescimento de cristais, pois o processo de cristalização é muito desafiador para a CFD.

- Implementar a seção de escoamento ajustando a novos tipos de escoamentos hidrodinâmicos, adicionando algum perfil.
- Aplicação dos modelos aqui apresentados para aprimoramento de novas tecnologias para o estudo da deposição de parafina na indústria de petróleo.
- Estender o problema a três dimensões e a regime transiente.
- Adicionar dispositivos hidrodinâmicos ao estudo numérico do tipo seção cilíndrica no escoamento.
- Confirmar experimentalmente o estudo numérico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, K., LOEZOS, P. N., SYAMLAL, M., SUNDARESAN, S., 2001, “The role of meso-scale structures in rapid gas-solid flows”, *J. Fluid Mech.*, v. 445, pp. 151-185.

ALBUQUERQUE, S. F., NETO, S. R. F., LIMA, A. G. B., BARBOSA, E. S., 2007, “Steady non-isothermal two-phase flow of oil and gas in subsea flexible pipe”, *International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry*, v. 1, pp. 41-54.

ALVES, K. C. M., 1999, *Intensificação do Processo de Cristalização de Parafina por Ultra-Som*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

ANDERSON, T. B., JACKSON, R., 1967, “A fluid mechanical description of fluidized beds”, *Ind. Eng. Chem. Fundamentals.*, v. 6, n. 4, pp. 527-539.

Ansys Inc., 2006, “CFX 10.0 User’s Manual”.

APTE, M., MATZAIN, B., VOLK, M., et al., 1999, “Investigation of multiphase flow paraffin deposition”, *BHRG Multiphase Technology Conference*, Cannes, France, June.

APTE, M. S., MATZAIN, A., VOLK, M., et al., 2000, “Investigation of paraffin deposition during multiphase flow in pipelines and well bores – part 2 – modeling”. *Proceedings of ETCE/OMAE2000 Joint Conference Energy for the New Millenium, 10081*, New Orleans, LA, USA, 14-17 February.

AZEVEDO, L.F.A., TEIXEIRA, A.M., 2003, “A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms”, *Petroleum Science and Technology*, v. 21, n. 3 e 4 (Jan), pp. 393-408.

BANKI, R., HOTEIT, H., FIROOZABADI, A., 2008, “Mathematical formulation and numerical modeling of wax deposition in pipelines from enthalpy–porosity approach and irreversible thermodynamics”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 51, pp. 3387–3398.

BERN, P. A., WITHERS, V. R., CIRNS, R. J. R., 1980, “Wax deposition in crude oil pipelines”, *European Offshore Petroleum Conference & Exhibition*, EUR 206.

BIDMUS, H. O., MEHROTRA, A. K., 2004, “Heat - transfer analogy for wax deposition from paraffinic mixtures”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 43, pp. 791 – 803.

BROWN, T. S., NIESEN, V. G., ERICKSON, D. D., 1993, “Measurement and prediction of the kinetics of paraffin deposition”, *SPE 26548*.

BUCHLER, C. C., GRAVES, G. D., 1927, “The petroleum waxes”, *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 19, pp. 718-724.

BURGER, E. D., PERKINS, T. K., ERICKSON, D. D., 1981, “Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline”, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 1075-1086.

BUTLER, R. M., MacLEOD, D. M., 1961, “Solid-liquid equilibria in wax crystallization”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, PP. 53-63.

CARNAHAN, N. F., 1989, “Paraffin deposition in petroleum production”, *Journal of Petroleum Technology*, v. 41, n. 10, (Oct.), pp. 1024-1025.

CHAPMAN, S., COWLNG, T. G., 1970, “The mathematical theory of non-uniform gases”, *Cambridge University Press*, 3<sup>rd</sup> edition.

CHEN, W., ZHAO, Z., 2006, “Thermodynamic modeling of wax precipitation in crude oils”, *Chinese J. Chem. Eng.*, v. 14 (5), pp. 685 – 689.

CHEN, W., ZHAO, Z., ZHANG, X., WANG, L., 2007, “Thermodynamic phase equilibria of wax precipitation in crude oils”, *Fluid Phase Equilibria*, v. 225, pp. 31-36.

CHICHAKLI, M., JANSEN, F. W., 1967, “Physical morphology in hydrocarbons systems”, *Ind. Eng. Chem.*, v. 59, n. 5, pp. 86-98.

CLARKE, E. W., 1951, “Crystal types of pure hydrocarbons in the paraffin wax range”, *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 43, pp. 2526.

CORNELISSEN J. T., TAGHIPOUR, F., ESCUDIÉ, R., ELLIS, N., GRACE, J. G., 2007, “CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed”, *Chemical Engineering Science*, v. 62, pp. 6334-6348.

CORRERA, S., FASANO, A., FUSI, L., MERINO-GARCIA, D., 2007a, “Calculating deposit formation in the pipelining of waxy crude oils”, *Meccanica*, v. 42, pp. 149-165.

CORRERA, S., FASANO, A., FUSI, A., PRIMICERIO, M., 2007b, “Modelling wax diffusion in crude oils: The cold finger device”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 31, pp. 2286 – 2298.

COUTINHO, J. A. P., ANDERSEN, S. I., STENBY, E. H., 1995, “Evaluation of activity coefficient models in prediction of alkane solid-liquid equilibria”, *Fluid Phase Equilibria*, v. 103, pp. 23-29.

COUTINHO, J. A. P., KNUDSEN, K., ANDERSEN, S. I., STENBY, E. H., 1996, “A local composition model for paraffinic solid solutions”, *Chemical Engineering Science*, v. 51, n. 12, pp. 3273-3282.

COUTINHO, J.A. P., 1999, “Predictive local composition models: NRTL and UNIQUAC and their application to model solid–liquid equilibrium of *n*-alkanes”, *Fluid Phase Equilibria*, v. 158-160, pp. 447-457.

COUTINHO, J. A. P., et. al., 2000, “Measurements and modelling of wax formation in diesel fuels”, *Fuel*, v. 79, pp. 607-616.

COUTINHO, J. A. P., PAULY, P., DARIDON, J. L., 2001, "A thermodynamic model to predict wax formation in petroleum fluids", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 18, n. 4, pp. 411-422.

COUTINHO, J. A. P., DARIDON, J. L., 2001, "Low-pressure modeling of wax formation in crude oils", *Energy and Fuel*, v. 15, pp. 1454-1460.

COUTINHO, J. A. P., EDMONDS B., MOORWOOD T., SZCZEPANSKI R., ZHANG X., 2002, "Reliable wax predictions of flow assurance", *SPE 78324*.

CREEK, J. L., LUND, H. J., BRILL, J. P., 1999, "Wax deposition in single phase flow", *Fluid Phase Equilibria*, v. 158-160, (Jun.), pp. 801-811.

CROWE, C., SOMMERFELD, M., TSUJI, Y., 1998, "Multiphase flows with droplet sand particles", CRC Press LCC.

DARIDON, J. L., PAULY J., COUTINHO J.A.P., MONTEL F., 2001, "Solid-liquid-vapor phase boundary of a North Sea waxy crude: measurement and modeling", *Energy and Fuel*, v. 15, pp. 730-735.

DALIRSEFAT, R., FEYZI, F., 2007, "A thermodynamic model for wax deposition phenomena", *Fuel*, v. 86, pp. 1402-1408.

EDWARDS, R. T., 1957, "Cristal habit of paraffin wax", *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 49, (Apr.), pp. 750-757.

ELLISON, B. T., GALLAGHER, C. T., LORIMER, S. E., 2000, "The physical chemistry of wax, hydrates, and asphaltene", *Offshore Technology Conference, OTC 11963*, Houston, Texas, USA, 1-4 May.

ERICKSON, D. D., NIESEN, V. G., BROWN, T.S., 1993, "Thermodynamic measurement and prediction of paraffin precipitation in crude oil", *SPE 26604*, pp. 601-607.

FERRIS, S. W., COWLES JR., H. C., 1945, “Crystal behavior of paraffin wax”, *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 37, n. 11, (Nov.), pp. 1054-1061.

GEORG, I. C., MALISKA, C. R., PORTO, L. M., 2003, “Modelagem e simulação tridimensional de um reator de craqueamento catalítico em leito fluidizado – formação de clusters”, *2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 15-18 Jun.

GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., DING, J., 1992, *Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach*. In: PORTTER, O. E., NICKLIN, D. J., (Eds.), *Fluidization VII*. Engineering Foundation, New York, pp. 75–82.

GIDASPOW, D., 1994, *Multiphase flow and fluidization*, Academic Press, pp. 31-58, 197-238.

GROOTSCHOLTEN, P. A. M., JANCIC, S. J., 1984, *Industrial Crystallization*. 1 ed. Delft, Reidel Publishing Company.

HAMOUDA, A. A., RAVNOY, J. M., 1992, “Prediction of wax deposition in pipelines and field experience on the influence of wax on drag-reducer performance”, *OTC 7060*.

HAMOUDA, A. A., VIKEN, B. K., 1993, “Wax deposition mechanism under high-pressure and in presence of light hydrocarbons”, *SPE 25189*, pp. 385-396.

HAMOUDA, A., DAVIDSEN, S., 1995, “An approach for simulation of paraffin deposition in pipelines as a function of flow characteristics with a reference to Teesside oil pipeline”, *Society of Petroleum Engineers, SPE 28966*, San Antonio, Texas, USA, 14-17 February.

HAMMAMI, A., RAINES, M. A., 1997, “Paraffin deposition from crude oils: comparison of laboratory results to field data”, *Society of Petroleum Engineers, SPE 38776*, San Antonio, Texas, USA, 5-8 October.



HANSEN, J. H., FREDENSLUND, A., PEDERSEN, K. S., RØNNINGSEN, H. P., 1988, "A Thermodynamic model for predicting wax formation in crude oils", *AIChE Journal*, v. 34, pp. 1937-1942.

HARRIS, A. T., DAVIDSON, J. F., THORPE, R. B., 2002, "The prediction of particle cluster properties in the near wall region of a vertical riser" *Powder Technology.*, v. 127, pp. 128-143.

HARTLEY, R.; BIN JADID, M., 1989, "Use of laboratory and field testing to identify potential production problems in the Troll field", *SPE (Feb) 34; Trans., AIME*, 287.

HOWELL, J. N., JESSEN, F. W., 1956, "Determination of viscosity temperature relationship for crude oils with ultraviscoson", *Petroleum transactions*, v. 297, pp. 330-332.

HSU, J. J. C., SAMARITANA, M. M., BRUBAKER, J. P., 1994, "Wax deposition of waxy live crudes under turbulent flow conditions", *SPE 28480*, pp. 179-192.

HUNT Jr., E. B., 1962, "Laboratory study of paraffin deposition", *Journal of Petroleum Technology SPE 279*, pp. 1259-1269.

IRIGON, D. I., 2002, *Estudo da Deposição de Parafina em Dutos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ISMAIL, L., WESTACOTT, R. E., NI, X., 2008, "On the effect of wax content on paraffin wax deposition in a batch oscillatory baffled tube apparatus", *Chemical Engineering Journal*, v. 137, pp. 205-213.

JENNINGS, D. W., WEISPFENNIG, K., 2005, "Effects of shear and temperature on wax deposition: cold finger investigation with a Gulf of Mexico crude oil", *Energy and Fuels*, v. 19, pp. 1376-1386.

KHALIL, C. N., MINAMI K., 1999, *Sistemas Marítimos de Produção*, CENPES/DIPILOT/SEPROT.

KINSEL, A., PHILLIPS, J., 1945, “Method for classification of petroleum waxes”, *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 17, n. 3 (Mar.), pp. 152-156.

KOK, M., LÉTOFFÉ, J. M., et. al., 1996, “Comparison of wax appearance temperatures of crude oils by differential scanning calorimetry, thermomicroscopy and viscometry”, *Fuel*, v. 75, n. 7, pp. 787-790.

KYOTOKU, G. B. C., ARAÚJO, J. C. D., LUCENA, S., 2006, “Modelagem matemática e simulação computacional da deposição de parafina no transporte de óleos pesados através de dutos”, *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 11 – 14 Sep.

LACKERMEIER, U., RUDNICK, C., WERTHER, J., BREDEBUSCH, A., BURKHARDT, H., 2001, “Visualization of flow structures inside a circulating fluidized bed by means of laser sheet and image processing”, *Powder Technology*, v. 114, pp. 71-83.

LEIROZ, A. T., 2004, *Estudo sobre a Deposição de Parafina em Linhas de Petróleo*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LEONTARITIS, K. J., 2003, “Cloud point and wax deposition measurement techniques” *SPE 80267*, Houston, Texas. 5-7 February.

LUN, C. K. K., SAVAGE, S. B., JEFFEREY, D. J., CHEPURNIY, N., 1984, “Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield”, *J. Fluid Mech.*, v. 140, pp. 223-256.

MAJEED, A., BRINGEDAL B., OVERA, S., 1990, “Model calculates wax deposition for N. Sea oils”, *Oil and Gas Journal*, pp. 63-69.

MALISKA C. R., 2002, “A general view of constructing finite volume methodologies for fluid flow simulations”, *Mini-curso da III Escola de Primavera de Transição e Turbulência*. Florianópolis, SC, Brasil.

MALISKA, C. R., 2004, *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. 2ª ed. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.

McCLAFIN, G. C., WHITFILL, D. L., 1984, “control of paraffin deposition in production operations”, *Journal of Petroleum Technology SPE 12204*, (Nov.), pp. 1965-1972.

MERINO-GARCIA, D., MARGARONE, M., CORRERA, S., 2007, “Kinetics of waxy gel formation from batch experiments”, *Energy & Fuels*, V. 21, PP. 1287-1295.

MISRA, S., BARUAH, S., SINGH, K., 1995, “Paraffin problems in crude oil production and transportation – a review”, *SPE Production & Facilities*, (Feb.), pp. 50-54.

NÝVLT, J., HOSTOMSKÝ, J., GIULIETTI, M., 2001, *Cristalização*, São Paulo, EdUFSCar/IPT.

OLIVEIRA, R. C. G., LOUVISSE, A. T., 1991, “Deposição de parafina para petróleos dos campos de albacora e marlim e sua inibição mediante o uso de aditivos químicos.” In: *Anais do III Encontro Técnico Interdepartamental sobre Exploração em Águas Profundas*, pp. 137-150, Rio de Janeiro.

PALADINO, E. E., 2005, *Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

PAN, H., FIROOZABADI A., FOTLAND P., 1997, “Pressure and composition effect on wax precipitation: experimental data and model results”, *SPE36740*, pp. 579-592.

PATTON, C. C., CASAD, B. M., 1970, "Parafin deposition from refined wax-solvent system", *Soc. Pet. Eng. J.*, (Mar.), pp. 17.

PEDERSEN, K. S., SKOVBOG P., RONNINGSEN H.P., 1991, "Wax precipitation from North Sea crude oils. 4. thermodynamic modeling", *Energy and Fuels*, v. 5, pp. 924-932.

PEDERSEN, K. S., 1995, "Prediction of cloud point temperatures and amount of wax precipitation", *SPE Production and Facilities* 27627, pp. 46-49.

PETINELLI, J. C., 1991, "Influence des additifs sur la cristallization des n-paraffines en milieu hydrocarbure", *Ver. Inst. Français du Pétrole*, v. 46, n. 5, pp. 638-649.

PLASENCIA, J. L. C., 2006, *Deposição de Parafina em Escoamento Laminar na Presença de Cristais em Suspensão*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RANDOLPH, A. D., LARSON, M. A., 1971, *Theory of Particulate Process*, London, Academic Press.

RAW, M. J., 1985, *A New Control Volume Finite Element Procedure for the Numerical Solution of the Fluid Flow and Scalar Transport Equations*. Ph. D. Thesis, University of Waterloo, Canada.

RIBEIRO, F. S., 1996, *Deposição de Parafina em Linha de Produção de Petróleo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RIBEIRO, F. S., MENDES, P. R. S., et. al., 1997, "Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils", *Int. J. Heat Mass Transfer*, v. 40 n. 18, pp. 4319-4328.

ROCHA, N. O., 1997, *Efeito do Campo Magnético na Deposição de Parafinas Durante a Exploração de Petróleo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROMERO, M. I. V., 2005, *Avaliação do Mecanismo de Difusão Molecular para a Modelagem da Deposição de Parafinas em Dutos de Petróleo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RØNNINGSEN, H. P., et al., 1991, “Wax precipitation from North Sea Crude oils. 1. Crystallization and dissolution temperatures, and newtonian and non-newtonian flow properties”, *Energy & Fuels*, v. 5, n. 6, pp. 895-908.

SANTOS, J. S. T., 2002, *Parafinação de Petróleos Nacionais do Ponto de Vista da Cristalização*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, P. C. S., 1994, *Precipitação de parafina em misturas de petróleo: medidas experimentais e modelagem termodinâmica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

SARMENTO, R. C., 2002, *Análise Térmica da Remoção do Bloqueio de Parafina em Linhas Submarinas de Petróleo Utilizando Aquecimento Induzido*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SINGH, P., FOGLER, H. S., NAGARAJAN, N., 1999, “Prediction of the wax content of the incipient wax-oil gel in a pipeline: An application of the controlled-stress remoter”, *Journal of Rheology*, v. 43, n. 6 (Nov./Dec.), pp. 1437-1459.

SINGH, P., VENKATESAN, et. al., 2000, “Formation and aging of incipient thin film wax-oil gels”, *AIChE Journal*, v. 46, n. 5, (May), pp. 1059-1074.

SINGH, P., YOUYEN, A., FOGLER, H. S., 2001, "Existence of a critical carbon number in the aging of a wax-oil gel", *AIChE JOURNAL*, v. 47, n. 9, (Sep.) pp. 2111-2124.

SOO, S. L., 1995, "Multiphase Fluid Dynamics", *Science Press*, Beijing.

SVENDSEN, J. A., 1993, "Mathematical modeling of wax deposition in oil pipeline systems", *AIChE Journal*, v. 39, pp. 1377-1388.

THEOLOGOS, K. N., NIKOU, I. D., LYGEROS, A. I., MARKATOS, N. C., 1997, "Simulation and design of fluid catalytic cracking riser-type reactors", *AIChE Journal*, v. 43, n. 2, pp. 486-494.

THOMAS, J. E., TRIGGIA, A. A., VEROTTI, C., et al., 1996, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, PETROBRAS/SEREC/CEN-NOR.

THOMASON, W., H., 2000, "Start-up and shut-in issues for subsea production of high paraffinic crudes", *Offshore Technology Conference, OTC 11967*, Houston, Texas, USA, 1-4 May.

TODI, S., 2005, *Experimental and Modeling Studies of Wax Deposition in Crude Oil Carrying Pipelines*, Ph. D. Thesis, University of Utah, Utah, USA.

TURNER, W. R., 1971, "Normal alkanes", *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop.*, v. 10, n. 3, pp. 238-256.

VAN WACHEM, B.G.M., ALMSTEDT, A.E., 2003, "Methods for multiphase computational fluid dynamics", *Chemical Engineering Journal*, v. 96, pp. 81-88.

VENKATESAN, R., et al., 2005, "The Strength of paraffin gels formed under static and flow conditions", *Chemical Engineering Science*, v. 60, pp. 3587-3598.

WEN, C. Y., YU, Y. H., 1966, "Mechanics of fluidization", *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, v. 62, pp. 100-111.

WEINGARTEN, J. S., EUCHNER, J.A., 1986, "Methods for predicting wax precipitation and deposition", *SPE 15654*.

WHITE, F. M., 1999, *Fluid Mechanics*, 4 ed., New York, McGraw-Hill.

WILKE, C. R., CHANG, P., 1955, "Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions", *AIChE. Journal*, v. 1, n. 2 (Jun.), pp. 264-270.

WON, K. W., 1986, "Thermodynamics for solid solution-liquid-vapor equilibria: wax phase formation from heavy hydrocarbon mixtures", *Fluid Phase Equilibria*, v. 30, pp. 265-279.

WON, K.W., 1989, "Thermodynamic calculation of cloud point temperatures and wax phase compositions of refined hydrocarbon mixtures", *Fluid Phase Equilibria*, v. 53, n. 6, pp. 377-396.

ZHANG, D. Z., PROSPERETTI, A., 1994, "Averaged equations for inviscid disperse two-phase flow", *J. Fluid Mech*, v. 267, pp. 185-219.

ZHANG, D. Z., VANDERHEYDEN, W. B., 2001, "High-resolution three-dimensional numerical simulation of a circulating fluidized bed", *Powder Technology*, v. 116, pp. 133-141.

## APÊNDICES

Apêndice 1 – Arquivo de Comando do Solver do CFX 11.0 para o Escoamento no Estado Estacionário

LIBRARY:

CEL:

EXPRESSIONS:

$$Kstar = 1.5E+10 [m^{-2}]$$

Fração volumétrica líquida de um componente em um fluido multicomponente

$$LiqFrac = 1 - DOCOSANO SOL.mf$$

Termo de resistência em função da fração volumétrica líquida

$$Kperm = \text{Dynamic Viscosity} * \backslash$$

$$Kstar*(1.0-LiqFrac)^2/(\max(6.7E-11,LiqFrac^3))$$

Termo de resistência limitando que a fração líquida tenda a zero

$$RpermMax = 1.9E+07 [kg s^{-1} m^{-3}]$$

Termo de resistência limitado pelo valor máximo

$$Rperm = \max(0 [kg s^{-1} m^{-3}], \min(RpermMax, Kperm))$$

Equação de saturação do n-docosano em n-heptano

$$Xsat = 10^{(19.02-(3980.17[K]/T))*(1[K^{2.57}]/T^{2.57})}$$

$$Ysolvent = 0.081 [ ]$$

$$YsoluteLIQ = \min(1-Ysolvent, Xsat)$$

$$YsoluteSOL = 1 - YsoluteLIQ - Ysolvent$$

END

END

MATERIAL: DOCOSANO LIQ

Material Group = User

Option = Pure Substance

PROPERTIES:

Option = General Material

DYNAMIC VISCOSITY:

$$\text{Dynamic Viscosity} = 4.13 [\text{centipoise}]$$



Option = Value  
 END  
 EQUATION OF STATE:  
 Density = 785 [kg m<sup>-3</sup>]  
 Molar Mass = 310.607 [g mol<sup>-1</sup>]  
 Option = Value  
 END  
 REFERENCE STATE:  
 Option = Specified Point  
 Reference Pressure = 1 [atm]  
 Reference Specific Enthalpy = 194600 [J kg<sup>-1</sup>]  
 Reference Temperature = 25 [C]  
 END  
 SPECIFIC HEAT CAPACITY:  
 Option = Value  
 Specific Heat Capacity = 2380 [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 Specific Heat Type = Constant Pressure  
 END  
 THERMAL CONDUCTIVITY: Option = Value  
 Thermal Conductivity = 0.22 [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 END  
 END  
 END  
 MATERIAL: DOCOSANO SOL  
 Material Group = User  
 Option = Pure Substance  
 PROPERTIES:  
 Option = General Material  
 DYNAMIC VISCOSITY:  
 Dynamic Viscosity = 4.13 [centipoise]  
 Option = Value  
 END  
 EQUATION OF STATE:  
 Density = 772.25 [kg m<sup>-3</sup>]

Molar Mass = 310.607 [g mol<sup>-1</sup>]

Option = Value

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0 [J kg<sup>-1</sup>]

Reference Temperature = 25 [C]

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 1930 [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 0.22 [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

END

END

END

MATERIAL: HEPTANO

Material Group = User

Option = Pure Substance

PROPERTIES:

Option = General Material

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 0.38849 [centipoise]

Option = Value END

EQUATION OF STATE:

Density = 679.6 [kg m<sup>-3</sup>]

Molar Mass = 100.204 [kg kmol<sup>-1</sup>]

Option = Value

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point  
 Reference Pressure = 1 [atm]  
 Reference Specific Enthalpy = 0 [J kg<sup>-1</sup>]  
 Reference Temperature = 25 [C]  
 END  
 SPECIFIC HEAT CAPACITY:  
 Option = Value  
 Specific Heat Capacity = 2.2405 [J g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 Specific Heat Type = Constant Pressure  
 END  
 THERMAL CONDUCTIVITY:  
 Option = Value  
 Thermal Conductivity = 0.13125 [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 END  
 END  
 END  
 MATERIAL: MISTURA  
 Constitutive Relation Iteration Limit = 500  
 Constitutive Relation Temperature Criterion = 1.0E-4 [K]  
 Constitutive Relation Under Relaxation = 0.25  
 Material Group = User  
 Materials List = DOCOSANO LIQ,DOCOSANO SOL,HEPTANO  
 Option = Variable Composition Mixture  
 END  
 END  
 FLOW:  
 SOLUTION UNITS:  
 Angle Units = [rad]  
 Length Units = [m]  
 Mass Units = [kg]  
 Solid Angle Units = [sr]  
 Temperature Units = [K]  
 Time Units = [s]  
 END

SIMULATION TYPE:

Option = Steady State

EXTERNAL SOLVER COUPLING: Option = None

END

END

DOMAIN: Domain 1

Coord Frame = Coord 0

Domain Type = Fluid

Fluids List = MISTURA

Location = Assembly

BOUNDARY: COLD WALL

Boundary Type = WALL

Location = COLD WALL

BOUNDARY CONDITIONS:

HEAT TRANSFER:

Fixed Temperature = 20 [C]

Option = Fixed Temperature

END

WALL INFLUENCE ON FLOW:

Option = No Slip

END

END

END

BOUNDARY: INLET

Boundary Type = INLET

Location = INLET

BOUNDARY CONDITIONS:

FLOW REGIME:

Option = Subsonic

END

HEAT TRANSFER:

Option = Static Temperature

Static Temperature = 40 [C]

END

MASS AND MOMENTUM:  
Normal Speed = 0.08308 [m s<sup>-1</sup>]  
Option = Normal Speed  
END  
END  
END  
BOUNDARY: OUTLET  
Boundary Type = OPENING  
Location = OUTLET  
BOUNDARY CONDITIONS:  
FLOW DIRECTION:  
Option = Normal to Boundary Condition END  
FLOW REGIME:  
Option = Subsonic  
END  
HEAT TRANSFER:  
Option = Static Temperature  
Static Temperature = 20 [C]  
END  
MASS AND MOMENTUM:  
Option = Static Pressure and Direction  
Relative Pressure = 0 [Pa]  
END  
END  
END  
BOUNDARY: SYMM HIGH Z  
Boundary Type = SYMMETRY  
Location = SYMM HIGH Z  
END  
BOUNDARY: SYMM LOW Z  
Boundary Type = SYMMETRY  
Location = SYMM LOW Z  
END  
BOUNDARY: SYMM TOP

Boundary Type = WALL  
Location = SYMM TOP  
BOUNDARY CONDITIONS:  
HEAT TRANSFER:  
Fixed Temperature = 40 [C]  
Option = Fixed Temperature  
END  
WALL INFLUENCE ON FLOW:  
Option = No Slip  
END  
END  
END  
DOMAIN MODELS:  
BUOYANCY MODEL:  
Option = Non Buoyant  
END  
DOMAIN MOTION:  
Option = Stationary  
END  
MESH DEFORMATION:  
Option = None END  
REFERENCE PRESSURE:  
Reference Pressure = 1 [atm]  
END  
END  
FLUID MODELS:  
COMBUSTION MODEL:  
Option = None  
END  
COMPONENT: DOCOSANO LIQ  
Option = Constraint  
END  
COMPONENT: DOCOSANO SOL  
Mass Fraction = YsoluteSOL

```

    Option = Algebraic Equation
END
COMPONENT: HEPTANO
    Mass Fraction = Ysolvent
    Option = Algebraic Equation
END
HEAT TRANSFER MODEL:
    Option = Thermal Energy
END
THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = None
END
TURBULENCE MODEL:
    Option = Laminar
END
END
SUBDOMAIN: Subdomain 1
    Coord Frame = Coord 0
    Location = Assembly
SOURCES:
    MOMENTUM SOURCE:
        ISOTROPIC LOSS MODEL:
            Linear Resistance Coefficient = Rperm
            Option = Linear and Quadratic Resistance Coefficients
        END
    END
END
END
INITIALISATION: Option = Automatic
INITIAL CONDITIONS:
    Velocity Type = Cartesian
CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
    Option = Automatic with Value

```

```
U = 0.08308 [m s^-1]
V = 0 [m s^-1]
W = 0 [m s^-1]
END
STATIC PRESSURE:
  Option = Automatic
END
TEMPERATURE:
  Option = Automatic with Value
  Temperature = 40 [C]
END
END
END
OUTPUT CONTROL:
RESULTS:
  File Compression Level = Default
  Option = Standard
END
END
SOLVER CONTROL:
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Maximum Number of Iterations = 1800
  Physical Timescale = 0.1 [s]
  Timescale Control = Physical Timescale
END
CONVERGENCE CRITERIA:
  Residual Target = 1e-05
  Residual Type = RMS
END
DYNAMIC MODEL CONTROL:
  Global Dynamic Model Control = On
```



```
END EQUATION CLASS: energy
  CONVERGENCE CONTROL:
    Physical Timescale = 1000 [s]
    Timescale Control = Physical Timescale
  END
END
END
EXPERT PARAMETERS:
  output eq residuals = t
  solver target reduction fluids = 1e-3
  solver target reduction scalar = 1e-3
END
END
COMMAND FILE:
  Version = 11.0
  Results Version = 11.0
END
EXECUTION CONTROL:
  INTERPOLATOR STEP CONTROL:
    Runtime Priority = Standard
  EXECUTABLE SELECTION:
    Double Precision = Off
  END
  MEMORY CONTROL:
    Memory Allocation Factor = 1.0
  END
END
PARALLEL HOST LIBRARY:
  HOST DEFINITION: josue2
    Installation Root = C:\Archivos de programas\ANSYS Inc\v%\v\CFX
    Host Architecture String = intel_xeon64.sse2_winnt5.1
  END END
PARTITIONER STEP CONTROL:
  Multidomain Option = Independent Partitioning
```

```

Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION:
  Use Large Problem Partitioner = Off
END
MEMORY CONTROL:
  Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARTITIONING TYPE:
  MeTiS Type = k-way
  Option = MeTiS
  Partition Size Rule = Automatic
END
END
RUN DEFINITION:
  Definition File = D:/JOSUE/DOCTORADO/TESE \
  JOSUE/CFX/TESTE_MALHA/EX500_006/Teste de Malha500_006.def
  Interpolate Initial Values = Off
  Run Mode = Full
END
SOLVER STEP CONTROL:
  Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION:
  Double Precision = Off
END
MEMORY CONTROL:
  Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARALLEL ENVIRONMENT:
  Number of Processes = 1 Start Method = Serial
END
END
END

```

Apêndice 2 – Tabela com os Valores Utilizados para Traçar as Curvas Espessura do Depósito x Comprimento

Tabela A.2: Valores utilizados para plotar as curvas experimental e numérica.

<b>Posição (mm)</b>	<b>10 (s)</b>	<b>20 (s)</b>	<b>30 (s)</b>	<b>60 (s)</b>	<b>300 (s)</b>	<b>600 (s)</b>	<b>1800 (s)</b>	<b>CFX (Estacionário)</b>
0	0	0	0	0	0	0,17	0,34	0,0000
3	0,23	0,31	0,39	0,4	0,47	0,53	0,67	1,2333
6	0,29	0,43	0,56	0,57	0,67	0,76	0,97	1,2333
9	0,29	0,48	0,6	0,67	0,74	0,84	1,03	1,2333
12	0,3	0,5	0,69	0,72	0,79	0,91	1,08	1,2667
15	0,36	0,54	0,7	0,74	0,84	0,92	1,13	1,2667
18	0,37	0,56	0,74	0,82	0,86	0,96	1,2	1,3000
21	0,43	0,66	0,75	0,82	0,89	1	1,22	1,3000
24	0,46	0,69	0,77	0,84	0,92	1,06	1,24	1,3333
27	0,44	0,72	0,84	0,88	0,91	0,97	1,24	1,3333
33	0,41	0,76	0,95	1,11	1,15	1,21	1,38	1,3333
39	0,52	0,84	1,01	1,08	1,17	1,24	1,41	1,3667

45	0,58	0,87	1,08	1,16	1,26	1,32	1,44	1,3667
51	0,58	0,86	1,09	1,21	1,29	1,39	1,54	1,3667
57	0,59	0,85	1,09	1,22	1,33	1,38	1,52	1,4000
257	0,54	0,81	1,05	1,21	1,34	1,45	1,54	1,4333
470	0,58	0,8	1,02	1,18	1,27	1,39	1,53	1,4333
670	0,55	0,74	0,89	1,18	1,25	1,38	1,56	1,4333
870	0,46	0,6	0,76	0,94	1,28	1,38	1,58	1,4333
988	0,25	0,27	0,3	0,42	1,22	1,37	1,55	1,5333
994	0,23	0,25	0,27	0,35	0,83	1,24	1,54	1,5667
1000	0,23	0,29	0,31	0,39	0,9	1,25	1,54	1,5667

### Apêndice 3 – Curva de Solubilidade da Solução n-Heptano/n-Docosano

A curva de saturação utilizada no CFX foi determinada por ALVES (1999) para o intervalo de temperatura de 273,15 a 313,15 K. Os resultados encontrados por ALVES (1999) são mostrados na Tabela A.3 e Figura A.3, onde  $T_{eq}$  representa a temperatura de saturação da solução na qual o n-docosano tem a fração molar  $x_2$ .

Tabela A.3: Solubilidade do n-docosano em n-heptano.

$T_{eq}$ (K)	$X_2$	gsoluto/8000gsolvente
277,25	0,0225	557,9820
283,15	0,0440	1091,1649
286,25	0,0647	1604,5083
289,30	0,0844	2093,0526
290,95	0,1033	2561,7575
295,35	0,1556	3858,7558
297,35	0,1873	4644,8905
298,75	0,2166	5371,5071
301,45	0,2694	6680,9049
302,35	0,2932	7271,1259
304,75	0,3561	8830,9957
305,55	0,3922	9726,2469
307,65	0,4668	11576,2673

ALVES determinou a curva de solubilidade e a correlação da curva com o auxílio do *software INTERSOL*. A correlação foi dada por:

$$\log x = 19,02 - \frac{3980,17}{T} - 2,57 \log T \quad (\text{A.2.1})$$

A curva de solubilidade obtida por Alves foi usada no programa de CFX para simular a deposição de parafina.

O valor da fração molar utilizada corresponde à massa de 2000 g de parafina solubilizado em 8000 g de querosene, ou seja,  $y_{solvent} = 0,081$ .

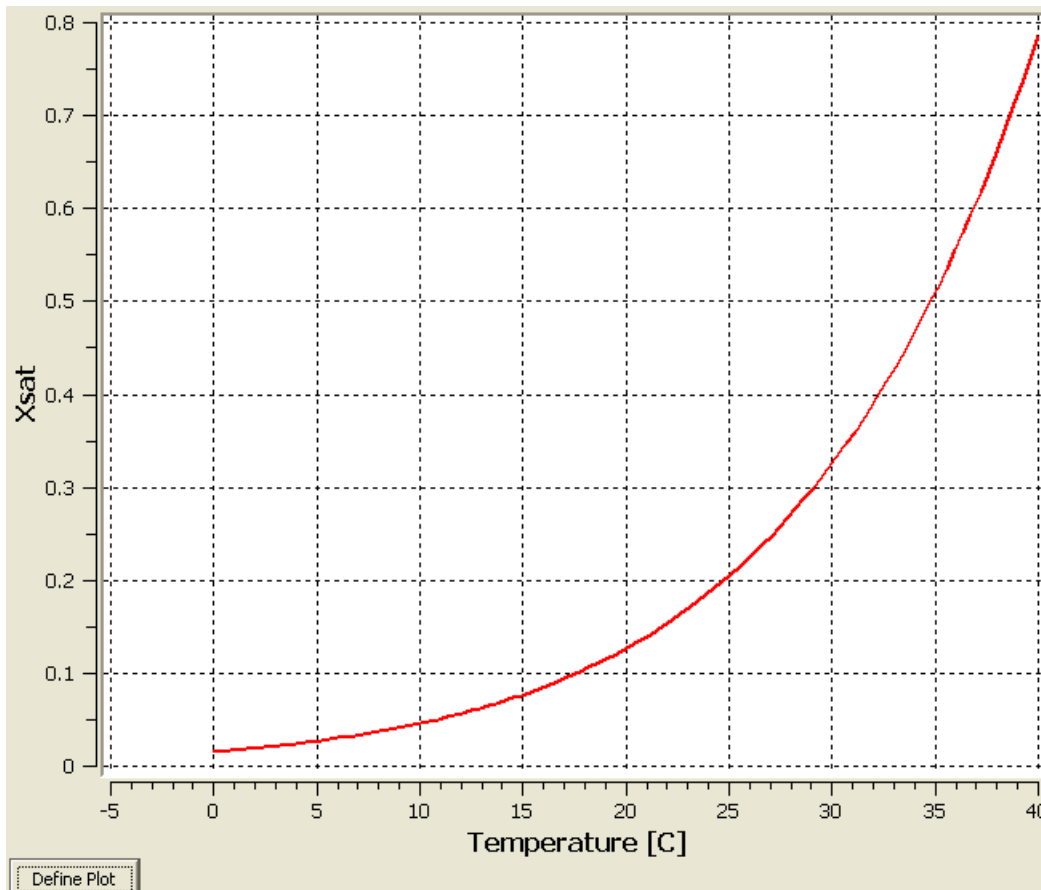


Figura A.3: Curva de saturação utilizada no CFX.

#### Apêndice 4 – Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva

A bomba de cavidade progressiva nos experimentos foi calibrada utilizando água como fluido. A calibração foi realizada utilizando um recipiente de volume conhecido e um cronômetro. A curva obtida é apresentada na Figura A.4.

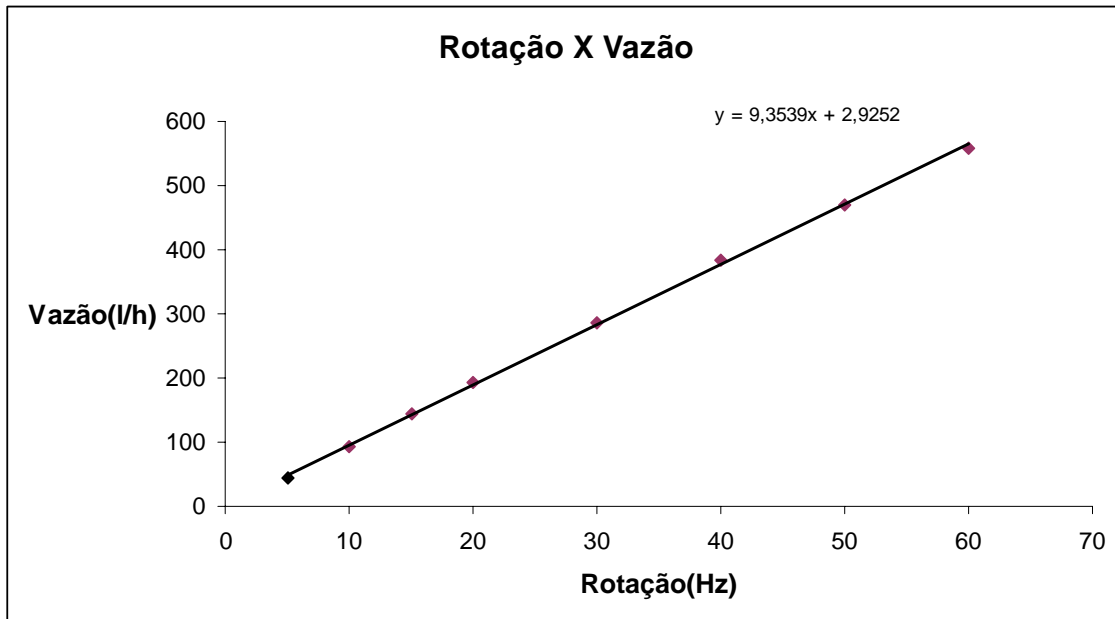


Figura A.4: Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva.

#### Apêndice 5 – Determinação da Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais (TIAC).

A temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) foi determinada por viscosimetria pelo Engenheiro Daniel Prata da PUC-RIO. Essa técnica é baseada na mudança das propriedades reológicas do óleo causada pela precipitação de cristais de parafina. Para a obtenção da curva de viscosidade, cada amostra foi colocada em um reômetro *Physica UDS 200 Paar Physica Universal Dynamic Spectrometer*. As amostras eram aquecidas até 50°C e resfriada até 25°C por meio de uma placa *Peltier* a uma taxa de 1°C/min. A temperatura inicial de aparecimento de cristais é detectada por um súbito aumento da viscosidade. E o valor encontrado foi de 34,1°C.

#### Apêndice 6 – Determinação do Número de Reynolds para Mistura Parafina /Querosene.

A medida da densidade relativa dos óleos utilizados no estudo foi determinada através do densímetro digital, marca *Anton Paar*, modelo DMA 48.

Após a calibragem do equipamento, coloca-se a amostra em uma seringa e com a mesma introduz o petróleo no equipamento. A densidade relativa é calculada a partir do período de oscilação e possui incerteza de medida de  $\pm 0,0001 \text{ g/cm}^3$  e seringas de vidro de 5 ml.

Para avaliar a variação da viscosidade, foi empregado nas análises um viscosímetro rotativo da *Brookfield*, modelo DV III, tipo *Searle*, equipado com adaptador para pequenos volumes de amostra acoplados a um banho criostático marca *Bookfield* controlável a décimo de grau Celsius.

A determinação da massa específica e da viscosidade da mistura parafina/querosene foi realizada experimentalmente conforme é mostrado nas tabelas A.6.1 e A.6.2.

Tabela A.6.1: Massa Específica da Mistura Parafina/Querosene.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
15	802,3
20	799,1
50	780,1

Tabela A.6.2: Viscosidade da Mistura Parafina/Querosene.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Viscosidade Dinâmica (kg/m.s)</b>
20	0,002685
40	0,001308
50	0,001133

Acima da TIAC, em geral, os petróleos apresentam um comportamento newtoniano, isto é, a viscosidade é somente função da temperatura, em fluxo laminar, podendo ser expresso pela equação de Arrhenius ou equação do tipo Guzman-Andrade, que exige o conhecimento de dois ou mais valores de  $\mu$  para se determinar as constantes A e B (SANTOS, 2002).

$$\mu = A \cdot \exp(B / T) \quad \text{A.6.1}$$



A e B podem ser consideradas constantes na faixa limitada de temperatura.

Então para  $T = 38^{\circ}\text{C}$ , a viscosidade é  $\mu = 0,01359 \text{ g/cm.s}$ .

O número de Reynolds é dado por.

$$\text{Re} = \frac{udh\rho}{\mu} \quad \text{A.6.2}$$

Onde:  $L = 2 \text{ (cm)}$  – Largura do canal;

$e = 0,8 \text{ (cm)}$  – Espessura do canal;

$$dh = \frac{4.(L.e)}{2.(L+e)} = 1,1429 \text{ - diâmetro hidráulico;}$$

A velocidade de escoamento é dado através do cálculo da vazão da bomba, sendo assim, para uma vazão correspondente à frequência de 8Hz a velocidade é  $u = 1,35 \text{ cm/s}$ .

Assim  $\text{Re} = 896$ .

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)