

Jônata de Bem Biehl

**ESTUDO DA CAPTURA DE VAZAMENTOS DE ÓLEO POR
MEIO DE BALÕES EM AMBIENTES SUBAQUÁTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Química
Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos
Quadri

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Biehl, Jônata de Bem

Estudo da captura de vazamentos de óleo por meio de balões em ambientes subaquáticos / Jônata de Bem Biehl ; orientador, Marinho Bastos Quadri - Florianópolis, SC, 2013.

137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia Química. 2. Vazamento de petróleo. 3. Simulação / Modelagem computacional. 4. Offshore. 5. escoamento bifásico água/óleo. I. Quadri, Marinho Bastos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

Jônata de Bem Biehl

**ESTUDO DA CAPTURA DE VAZAMENTOS DE ÓLEO POR
MEIO DE BALÕES EM AMBIENTES SUBAQUÁTICOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Química”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 23 de Agosto de 2013.

Prof. Ricardo Antonio Francisco Machado, Dr.
Coordenador do CPGENQ

Prof. Marinho Bastos Quadri, Dr.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Toni Jefferson Lopes, Dr.
Membro

Prof. Agostinho Plucenio, Dr.
Membro

Prof.^a Mara Gabriela Novy Quadri, Dr.^a
Membro

Que seja o orgulho dos meus pais...

AGRADECIMENTOS

Agradecer se torna em alguns momentos uma tarefa difícil, por vezes podemos ser injustos esquecendo-se de alguém especial que nos foi crucial em algum momento.

Agradeço ao maior de todos os engenheiros, aquele que rege e é tudo aquilo que tentamos mensurar e entender por me permitir estar aqui.

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram no desenvolvimento do trabalho, tanto de forma científica, pessoal, financeira, profissional e de aconselhamento. Agradeço também aqueles que tentaram por vezes perturbar-me, tornaram-me mais forte e disposto a superá-los.

Agradeço a quem me dedicou amor nos momentos de confusão, me fez esquecer temporariamente da tempestade e me fez pisar sobre nuvens com os olhos fechados.

Aos colegas de trabalho, que ajudaram com vários parâmetros do trabalho e passaram junto comigo sempre tentando divertir a vida com as desgraças temporais.

Muito lhes sou grato e espero retribuir de alguma forma o favor a mim feito, se eu não puder, que eu passe adiante e ajude outras pessoas.

Ao CENPES/PESTROBRAS por financiar o trabalho e permitir que tudo fosse possível. A UFSC por fornecer o ensino e estrutura.

A todos... Sou grato...

Um dia eu acordei de um sonho onde eu era imortal.

Eu vivia num lugar onde o vento nunca era
frio, onde as folhas das árvores nunca caíam,
onde a comida não matava a fome, mas fome
também não se sentia.

Eu caminhava por ruas que não tinham fim e
não me cansava, suas curvas eram longas e
sempre davam no mesmo lugar.

(...)

Minha visão era como a da águia, eu
enxergava muito longe, mas não via nada que
meus olhos não quisessem ver, até mesmo os
limites das montanhas que me cercavam e me
prendiam eu podia não ver.

(...)

Por mais tempo que eu ficasse lá, nunca
anoitecia, mas por mais que eu procurasse, eu
não via um Sol pra iluminar.

Quando acordei vi que esse lugar não podia
existir.

Mas eu resolvi vagar dentro dos espaços
entre os meus passos e perceber o meu lugar
era ali.

O imortal que sou não sobrevive, não vive.
Ele é, faz parte do maior que é maior que o
maior que possa existir, pois quem vive está
vivo, mas eu não estou vivo, eu vivo em
mim...

Lugar do imortal (Jônata Biehl, 2012)

Vazamentos de petróleo no fundo do mar, tanto em situações de exploração como de transporte provocam perdas de natureza econômica, ambiental e social. Para minimizar esses impactos, o desenvolvimento de soluções inovadoras é necessário e devem priorizar a captura do óleo antes da sua ascensão e espalhamento na superfície. Estudos experimentais e de simulação dos fenômenos envolvidos são imprescindíveis até que se possa chegar ao projeto de um equipamento de captura apto a operar em condições de campo. Foram realizados experimentos laboratoriais com balões ou sacos de captura de diferentes materiais inicialmente dobrados, para observá-los ao se abrir e coletando óleo ascendente. Ao se testar diferentes velocidades de injeção do óleo, bem como diferentes diâmetros do bocal de captura, foi constatada a viabilidade da operação, além de se perceber que é possível minimizar a quantidade de água arrastada pelo jato de óleo que entra no balão. A geometria do balão e seu sistema de dobradura, além do diâmetro do bocal de captura do óleo são fatores determinantes para a minimização de correntes em contra fluxo de água que surgirão após a abertura do balão quando o óleo que é capturado começa a desalojar a água que entrou no início da operação.

Palavras-chave: vazamentos, petróleo, *offshore*, balões, água/óleo.

ABSTRACT

Oil leaks on the seabed, both in situations of exploitation and transport causes loss of economic, environmental and social. To minimize these impacts, the development of innovative solutions is necessary and should prioritize the capture oil before its rise and spreading on the surface. Experimental studies and simulation of the phenomena involved are essential until you can get to the design of a capture equipment able to operate in field conditions. Were conducted laboratory experiments with balloons or bags capture different materials initially bent to watch them to open up and collecting oil upward. When testing different injection rates of the oil, as well as different diameters of the nozzle capture was observed viability of the operation, in addition to realize that it is possible to minimize the amount of water entrained by the oil jet that enters the balloon. The geometry of the balloon and folding system, and the diameter of the nozzle captures the oil are determining factors for minimizing counter-current flow of water that will arise after opening the bag when the oil that is captured begins to displace water entered at the beginning of the operation.

Keywords: spills, ocean, capture, simulation, oil.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Forças atuantes em escoamentos multifásicos e suas respectivas magnitudes.....	31
Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos com os diferentes tipos de balões testados.....	84
Tabela 3: Força de flutuação do balão de óleo modelado.	86
Tabela 4: Comparação dos volumes acumulados de água e óleo nos modelos esférico e elíptico.	87
Tabela 5: Condições operacionais <i>COMSOL</i>	90
Tabela 6: Diâmetro do jato de óleo ao longo do perfil dentro do tubo de recepção em cada velocidade de injeção e diâmetro do tubo na entrada e saída do tubo de recepção.....	103
Tabela 7: Diferença de pressão (Pa) ao longo do tubo para cada velocidade e diâmetro estudados.....	116
Tabela 8: Vazões (Q) de água e óleo através do tubo para as diferentes velocidades de injeção de óleo no <i>Mathematica</i>	126
Tabela 9: Vazões (Q) de água e óleo através do tubo para as diferentes velocidades de injeção de óleo no <i>COMSOL</i>	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bolhas em ascensão em função do Número de Reynolds, Eötvös e Morton.....	34
Figura 2: Representação esquemática de interface.....	35
Figura 3: Fenômeno da digitação viscosa em um reservatório de petróleo.....	38
Figura 4: Esquema simplificado da interface de escoamento em um duto quando dois líquidos imiscíveis são submetidos a um escoamento: (a) interface plana (situação ideal); (b) interface convexa (situação real); (c) interface côncava (situação real).	40
Figura 6: Padrões de escoamento horizontal em dutos.....	46
Figura 7: Processos que acontecem durante um derramamento.....	48
Figura 8: Esquema de Funil invertido duplo para a Intervenção em naufrágios.....	49
Figura 9: Simulação mostrando os contra fluxos no bocal do balão e o enchimento do balão.....	50
Figura 10: Domínio bidimensional representado com um conjunto de elementos finitos triangulares.....	52
Figura 11: Conduto delimitado por uma malha estruturada.....	53
Figura 12: Sistema de coordenada local e global para (a) elemento triangular com três nós e (b) elemento retangular com quatro nós.	54
Figura 13: Bancada experimental.....	59
Figura 14: Esquema de dobradura de balões flexíveis.	62
Figura 15: Coordenadas, medidas e ângulos da gota utilizados para o cálculo da tensão interfacial.	64
Figura 16: Esquema em corte de um jato de óleo ascendendo pelo interior de um tubo.	67
Figura 17: Perfil da barragem com diferentes preenchimentos (a). Imagem aérea da barragem de toras (b).	73
Figura 18: Gota muito grande dividindo-se em gotas menores.....	75
Figura 19: Enchimento do balão de látex. Tubo de recepção preenchido com óleo (a) e (b); Balão desdobrado preenchido com óleo.	77
Figura 20: Ponto de injeção de óleo dentro do bocal de recepção.	78
Figura 21: Etapas do enchimento do balão flexível de plástico (espessura 9,0 μm).	79
Figura 22: Etapas do enchimento do balão flexível de plástico com óleo de soja (espessura 31,0 μm).	80
Figura 23: Etapas do enchimento do balão flexível de plástico com óleo lubrificante de motores (espessura 144,0 μm).....	81

Figura 24: Etapas do enchimento do balão flexível de nylon.	83
Figura 25: Vista superior das etapas do enchimento de balão flexível com dobradura em gomos enrolados.....	85
Figura 26: Comparação do modelo integral elíptico com o modelo esférico.....	86
Figura 27: Comparação dos volumes acumulados de água e óleo nos modelos esférico e elíptico.....	88
Figura 28: Modelo elíptico do enchimento balão flexível plástico com 900,0 mL (a), 1800,0 mL (b), 3600,0 mL (c) e 5400,0 mL (d).....	89
Figura 29: Domínio de cálculo e condições do modelo com um detalhe de uma região da malha correspondente a saída tubo de recepção.	91
Figura 30: Lançamento de uma coluna de óleo em um tubo aberto de 10,0 cm de diâmetro.....	92
Figura 31: Simulação do lançamento de uma coluna de óleo em um tubo aberto de 40,0 cm de diâmetro.	93
Figura 32: Domínio de cálculo (a); (b), e exemplo (c) de fração de volume de jato de óleo aos 40 segundos de simulação.	95
Figura 33: Região refinada da malha do ponto de injeção de óleo até a entrada do tubo de recepção.....	96
Figura 34: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,35m/s para o diâmetro de 5,7 cm.	97
Figura 35: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,35m/s para o diâmetro de 7,7 cm.	97
Figura 36: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,35m/s para o diâmetro de 9,7 cm.	98
Figura 37: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,7m/s para o diâmetro de 5,7 cm.	99
Figura 38: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,7m/s para o diâmetro de 7,7 cm.	99
Figura 39: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,7m/s para o diâmetro de 9,7 cm.	100
Figura 40: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 1,05m/s para o diâmetro de 5,7 cm.	101
Figura 41: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 1,05m/s para o diâmetro de 7,7 cm.	101
Figura 42: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 1,05m/s para o diâmetro de 9,7 cm.	102
Figura 43: Espalhamento no ponto de injeção de óleo.....	104
Figura 44: Escoamento de ‘S’ próximo ao ponto de injeção de óleo para a velocidade de 0,35 m/s.	105
Figura 45: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de	

0,35m/s no tubo de diâmetro 5,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	106
Figura 46: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,35m/s no tubo de diâmetro 7,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	106
Figura 47: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,35m/s no tubo de diâmetro 9,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	107
Figura 48: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,7 m/s no tubo de diâmetro 5,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	109
Figura 49: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,7 m/s no tubo de diâmetro 7,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	109
Figura 50: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,7 m/s no tubo de diâmetro 9,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	110
Figura 51: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 1,05m/s no tubo de diâmetro 5,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	111
Figura 52: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 1,05m/s no tubo de diâmetro 7,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	112
Figura 53: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 1,05m/s no tubo de diâmetro 9,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.....	112
Figura 54: Janela de comandos de ajuste do perfil de velocidade da ascensão do jato de óleo.....	115
Figura 55: Destaque das linhas b2 (linha 7) e linha b7 (linha 17).....	116
Figura 56: Variação (Δ) de pressão ao longo do domínio de cálculo do COMSOL.....	117
Figura 57: Perfil de velocidade na velocidade de 0,35 m/s para o diâmetro do tubo de 5,7cm.....	118
Figura 58: Perfil de velocidade na velocidade de 0,35 m/s para o diâmetro do tubo de 7,7cm.....	119
Figura 59: Perfil de velocidade na velocidade de 0,35 m/s para o diâmetro do tubo de 9,7cm.....	119
Figura 60: Perfil de velocidade na velocidade de 0,7 m/s para o diâmetro do tubo de 5,7cm.....	120
Figura 61: Perfil de velocidade na velocidade de 0,7 m/s para o diâmetro do tubo de 7,7cm.....	120

Figura 62: Perfil de velocidade na velocidade de 0,7 m/s para o diâmetro do tubo de 9,7cm.....	121
Figura 63: Perfil de velocidade na velocidade de 1,05 m/s para o diâmetro do tubo de 5,7cm.....	121
Figura 64: Perfil de velocidade na velocidade de 1,05 m/s para o diâmetro do tubo de 7,7cm.....	122
Figura 65: Perfil de velocidade na velocidade de 1,05 m/s para o diâmetro do tubo de 9,7cm.....	122
Figura 66: Perfis de velocidade para tubos com 0,4 cm (a), 0,7 cm (b) e 10,0 cm na velocidade de injeção de óleo de 0,7 m/s com contra fluxo de água.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>A</i>	Área	m ²
<i>C</i>	Constante de integração	(-)
<i>D_s</i>	Diâmetro da base da gota	m
<i>f</i>	Fração de volume da malha	(-)
<i>F</i>	Força	N
<i>g</i>	Aceleração gravitacional	m/s ²
<i>G</i>	Potencial químico	J/mol
<i>H</i>	Altura	m
<i>I</i>	Sistema de vetores unitários	(-)
<i>j</i>	Energia livre externa	J
<i>k</i>	Penetrabilidade	(-)
<i>L</i>	Comprimento	m
<i>m</i>	Enchimento	(-)
<i>P</i>	Pressão	Pa
ΔP	Gradiente de pressão	Pa
<i>r</i>	Plano axial	m
<i>R₀</i>	Raio de curvatura	m
<i>S_i</i>	Fase interface	(-)
<i>t</i>	Tempo	s
<i>T</i>	Operação transposta da matriz	(-)
<i>T₀</i>	Tensão constante no cabo	Pa
u	Velocidade axial	m/s
<i>U</i>	Velocidade da fase contínua	m/s
<i>v</i>	Velocidade	m/s
<i>V</i>	Velocidade da fase dispersa	m/s
<i>x</i>	Comprimento do perfil	m
<i>x</i>	Vetor de posição	(-)
<i>z</i>	Plano vertical	m
<i>W</i>	Trabalho	J

Letras gregas

α	Ângulo	°
β	Fator de ajuste goniométrico	(-)
γ	Tensão interfacial	mN/m
δ	Mobilidade da interface	(-)
ε	Largura capilar	m
ζ	Esfericidade	(-)

λ	Densidade de energia da mistura	J/m ³
μ	Viscosidade	mPa.s
ρ	Densidade	kg/m ³
τ	Tensão interfacial / tensão de cisalhamento	Pa
φ	Ângulo entre as integrais	(-)
ϕ	Função <i>level-set</i> / <i>phase field</i>	(-)
χ	Parâmetro de ajuste de mobilidade	m.s/kg
ψ	Variável auxiliar <i>phase-field</i>	(-)
Γ	Razão entre as densidades/ razão entre as viscosidades das fases	(-)
π	Pi	(-)
ω	Razão goniométrica	(-)
\emptyset	Diâmetro	m

Sub índices

a	Adesão	(-)
B	Flutuabilidade	(-)
c	Contínuo	(-)
d	Disperso	(-)
G	Gravitacional	(-)
\dot{i}	Imersão	(-)
I	Inercial	(-)
o	Óleo	(-)
P	Pressão	(-)
r	Plano axial	(-)
s	Espalhamento	(-)
S	Tensão superficial	(-)
V	Viscoso	(-)
z	Plano vertical	(-)
w	Água	(-)

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivos	26
1.1.1 Objetivo geral.....	26
1.1.2 Objetivos específicos.....	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 Escoamentos multifásicos	29
2.1.1 Conceitos básicos	29
2.1.2 Forças fundamentais no escoamento multifásico	30
2.1.3 Números Adimensionais	31
2.1.4 Escoamento de bolhas/gotas e suspensões	33
2.2 Aspectos importantes no escoamento bifásico água/óleo.....	35
2.2.1 Tensão interfacial	35
2.2.2 Tensão superficial	37
2.2.3 Viscosidade	38
2.2.4 Densidade	39
2.2.5 Molhabilidade.....	40
2.2.6 Emulsões	42
2.2.7 Dispersões	43
2.2.8 Espalhamento	43
2.2.9 Hidratos	44
2.3 Situações reais de escoamento bifásico água/óleo	45
2.3.1 Escoamento multifásico em dutos.....	45
2.3.2 Escoamento de vazamentos.....	47
2.4 Modelagem computacional	51
2.4.1 O método de elementos finitos.....	51
2.4.2 Métodos de cálculo.....	55
3 MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1 Bancada experimental	59
3.2 Procedimentos experimentais.....	60
3.3 Balões de captura	61
3.3.1 Abertura e enchimento dos balões.....	62
3.4 Características dos fluidos do estudo	62
3.4.1 Densidade	63
3.4.2 Viscosidade	63
3.4.3 Tensão interfacial	63
3.5 Modelagem e simulações	65
3.5.1 Modelo de escoamento simplificado de um jato de óleo submerso através de um tubo.....	66

3.5.2 Modelo elíptico para o balão preenchido com óleo	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1 Abertura e enchimento dos balões	75
4.1.1 Balão flexível de látex.....	76
4.1.2 Balões flexíveis de plástico.....	77
4.1.3 Balão flexível de nylon	82
4.1.4 Modelagem do enchimento de balões flexíveis	85
4.1.4.1 Ajuste do modelo elíptico aos perfis experimentais dos balões	88
4.2 Simulação da liberação do óleo acumulado no bocal de coleta	90
4.3 Simulação do escoamento de um jato de óleo submerso através de um tubo	94
4.3.1 Simulação <i>COMSOL Multiphysics</i> [®] 4.3a	94
4.3.1.1 Estudo dos perfis de velocidade no bocal de coleta	105
4.3.2 Simulação no Wolfran Mathematica 8.....	114
4.3.2.1 Estudo dos perfis de velocidade no bocal de coleta	117
4.3.3 Estudo dos perfis de velocidade no bocal de coleta com contra fluxo de água.....	123
4.3.4 Vazões arrastadas de água nos dois modelos	125
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
6 SUGESTÕES.....	129
7 REFERÊNCIAS.....	131

1 INTRODUÇÃO

Uma das características do grau de desenvolvimento de uma nação é a sua capacidade de consumo de energia, independente da origem desta. Fica notório o desenvolvimento dos Estados Unidos da América (EUA), quando se trata de consumo de combustíveis para veículos, por exemplo. Sabe-se que a maior frota mundial de veículos se concentra sob solo norte-americano, esse grande volume de carros consome cerca de 550 bilhões de litros de gasolina por ano. O Brasil consome 25 bilhões de litros de gasolina por ano (UOL, 2007).

O petróleo e seus derivados representam mais de 42,3% do consumo de energia mundial, o que comprova a sua importância na matriz energética e afirma o fato de que a humanidade ainda dependerá dessa fonte de energia por muito tempo, ou enquanto houver óleo a ser extraído das jazidas (BARROS, 2010).

O Brasil está em ascensão na exploração de suas jazidas de petróleo na plataforma continental oceânica (*offshore*), o que aumenta a cada dia o risco de vazamentos de óleo em ambiente marinho, como o que aconteceu em 2011 na Bacia de Campos, onde vazaram da ordem de 3700 barris de óleo por dia, devido a uma fissura acidental no solo oceânico (NETO, 2011).

A coluna de água na qual se extrai o tão valioso óleo varia de 200 a 3000m, o que torna as operações difíceis e onerosas. Em profundidades abaixo de 300m, atividades hiperbáricas de mergulhadores não são possíveis, sendo necessário o uso de ROV (*remotely operated vehicle* – veículo operado remotamente). Tais dificuldades fazem com que, do acontecimento de acidentes com vazamentos em grandes profundidades, as operações de controle emergenciais se tornem muito difíceis, viabilizando as pesquisas no âmbito de criar estratégias de minimização desse tipo de impacto.

No dia 20 de abril de 2010, uma explosão na plataforma *Deepwater Horizon*, da empresa *British Petroleum* (BP), matou 11 funcionários no Golfo do México. A plataforma de petróleo afundou após a explosão e deu início a uma das maiores tragédias ambientais já assistidas pelo mundo. O acidente aconteceu a aproximadamente 80km da costa da Louisiana, sul dos EUA. O petróleo vazou da tubulação rompida a 1,5km da superfície do mar, formando uma enorme mancha negra que matou centenas de animais (MIRANDA, 2011). Estimativas da empresa BP apontavam para o derramamento de 5 mil barris de petróleo cru por dia no oceano durante o acidente, o equivalente a 800

mil litros. Os prejuízos para a economia chegaram a mais de US\$ 1,6 bilhão (MIRANDA, 2011).

Quando há vazamentos de petróleo, existe uma série de procedimentos, determinados pela Resolução CONAMA 269/2000 a serem tomados na contenção e dispersão do óleo, uma atividade de risco, de alto custo e pouco eficiente, que pode ser por vezes evitada se o vazamento for contido em ambiente subaquático. Dentre as técnicas de limpeza estão as barreiras de contenção, o uso de dispersantes químicos e absorventes, a queima e a remoção manual.

Esse e outros exemplos de acidentes ao redor do mundo fazem com que o desenvolvimento de um equipamento de captura de óleo em ambientes subaquáticos seja justificado.

As grandes profundidades fazem com que o uso de modelagem computacional seja crucial para estudar os fenômenos que envolvem o escoamento de óleo em vazamentos, devido ao fato de que esses não são rotineiros e a sua visualização é muito difícil devido às proporções que tomam.

Este trabalho irá apresentar um estudo teórico, experimental e de simulação dos fenômenos relacionados ao desenvolvimento inicial de um equipamento que irá coletar vazamentos de petróleo antes que esses cheguem até a superfície.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a viabilidade e identificar parâmetros operacionais da captura de vazamentos submersos de óleo por meio de balões desdobráveis/infláveis.

1.1.2 Objetivos específicos

- A partir de uma bancada experimental promover a injeção subaquática de óleo com simultânea captura do mesmo por meio de diferentes dispositivos de recepção, abertura de estrutura e acumulação;
- Desenvolver modelos e investigar geometrias que possam reproduzir as observações experimentais de forma a definir estratégias para a consolidação de uma tecnologia apta a coletar óleo em situações de vazamento a partir de uma fonte submersa;
- Estudar por meio de simulações CFD (*computational fluid*

dynamics) a fluidodinâmica do sistema água/óleo nos bocais dos dispositivos de captura de óleo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta parte do trabalho será apresentada uma síntese sobre os escoamentos multifásicos de forma ampla, bem como um aprofundamento sobre os aspectos e características do escoamento bifásico água/óleo que ajudará a elucidar e embasar os experimentos e simulações, e seus resultados aqui mostrados.

2.1 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Nos escoamentos multifásicos podem surgir diversas dificuldades de cálculo devido à existência de movimentos das interfaces, separando as fases ou fluídos imiscíveis. Em geral a geometria das interfaces e a distribuição espacial das fases não são conhecidas, mas fazem parte da solução de um problema de escoamento.

Os principais escoamentos multifásicos estudados são aqueles de gás-líquido, líquido-líquido e fluxos envolvendo partículas rígidas (esse último geralmente restrito a baixa concentração volumétrica) (WÖRNER, 2003).

2.1.1 Conceitos básicos

Fase é a definição termodinâmica para o estado da matéria que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Em um escoamento multifásico, uma ou mais fases acontecem simultaneamente. Tais fases podem ser constituídas de uma única espécie química, como fluxo de água e vapor d'água, ou mais de uma espécie química, como água e óleo (WÖRNER, 2003).

Na terminologia de escoamento multifásico, *fase* é classificada como a região *contínua*, se for continuamente conectada no espaço, e *dispersa*, quando ocupa regiões descontínuas do espaço. Sendo a fase contínua líquida ou gasosa e a fase dispersa formada por partículas (sólidas ou líquidas). Essas partículas são chamadas de bolhas quando são formadas por gases, e de gotas quando são formadas por líquidos (WÖRNER, 2003).

Nos escoamentos bifásicos ou multifásicos, o movimento de todas as fases é de interesse, diferindo dos escoamentos de superfície livre nos quais a influência da densidade e viscosidade são negligenciados, e somente o movimento dentro da fase líquida é de interesse, como o caso de correntes de lava vulcânica (WÖRNER,

2003).

2.1.2 Forças fundamentais no escoamento multifásico

Em geral, as forças que agem sobre os movimentos dos fluídos podem ser classificadas em três categorias (WÖRNER, 2003):

- *Forças de volume*: agem sobre os elementos de volume ($V \times L^3$);
- *Forças de superfície*: agem sobre os elementos de área ($A \times L^2$);
- *Forçar de linha*: agem sobre os elementos de curva ($C \times L$).

As forças podem ser subdividas nas categorias as quais elas agem nos fluxos multifásicos (WÖRNER, 2003):

- *Força de pressão*: age na área dos elementos e tende a acelerar o fluido na direção do gradiente de pressão;
- *Força de inércia*: é uma força de volume e tende a manter a direção e magnitude do movimento;
- *Força viscosa*: age sobre os elementos de área e tende a fazer com que o campo de fluxo seja uniforme e diminua as diferenças de velocidade;
- *Força gravitacional*: tende a acelerar o fluido na direção do vetor velocidade;
- *Força de flutuação*: está relacionada com a força gravitacional, sendo a diferença entre a *Força gravitacional* e a *Força de Archimedes* (empuxo). A *Força de empuxo* representa a rede de ação da gravidade quando a densidade não é uniforme, sendo causada por diferenças de temperatura por convecção natural ou presença de duas fases em um escoamento bifásico.
- *Força de tensão superficial*: age nos elementos de curva e tende a diminuir a área superficial da interface. Existe apenas em fluxos bifásicos de gás/líquido e líquido/líquido.

A Tabela 1 ilustra essas forças de forma compacta (WÖRNER, 2003):

Tabela 1: Forças atuantes em escoamentos multifásicos e suas respectivas magnitudes.

Força	Tipo	Magnitude	
		Força	Força por unidade de volume
Força de pressão	força de superfície	$Fp \times A\Delta P$	$fp \times \Delta PL^{-1}$
Força de inércia	força de volume	$Fi \times v_c \rho U^2 L^{-1}$	$fi \times \rho U^2 L^{-1}$
Força viscosa	força de superfície	$Fv \times A\mu UL^{-1}$	$fv \times \mu UL^{-1}$
Força gravitacional	força de volume	$Fg \times v_c g\rho$	$fg \times g\rho$
Força de empuxo	força de volume	$Fb \times v_c g\Delta\rho$	$fb \times g\Delta\rho$
Força de tensão superficial	força de linha	$Fs \times C\gamma$	$fs \times \gamma L^{-2}$

Fonte: Wörner (2003).

Onde, v_c é a velocidade da fase dispersa, U é a velocidade da fase contínua, ρ é a densidade, μ é a viscosidade, g é a aceleração da gravidade, e γ é o coeficiente de tensão superficial.

2.1.3 Números Adimensionais

Para entender melhor numericamente o escoamento bifásico, é de suma importância conhecer os números adimensionais envolvidos no problema. Esse conhecimento ajuda a identificar quais forças são realmente atuantes no sistema e quais delas devem ser negligenciadas. Das forças listadas na Tabela 1, pode-se derivar 5 números adimensionais (WÖRNER, 2003).

Um conhecido número adimensional é o *Número de Reynolds*, representado pela relação entre as forças de inércia e viscosa, como é possível ver a seguir:

$$Re = \frac{F_I}{F_V} = \frac{f_I}{f_V} = \frac{\rho LU}{\mu} \quad (1)$$

O *Número de Euler* representa a relação entre o gradiente de pressão e a *Força de Inércia*:

$$Eu = \frac{F_P}{F_I} = \frac{f_P}{f_I} = \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (2)$$

O *Número de Froude* caracteriza a relação entre as *Forças de Inércia e Gravitacional*:

$$Fr = \frac{F_I}{F_G} = \frac{f_I}{f_G} = \frac{U^2}{gL} \quad (3a)$$

Em algumas literaturas, o *Número de Froude* pode também ser encontrado da seguinte forma, quando se estuda o escoamento de sólidos (CROWE, 2006):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (3b)$$

Os próximos dois números adimensionais abaixo representam escoamentos bifásicos para interfaces entre líquido/líquido e gás/líquido porque eles envolvem a *Força de tensão superficial*.

O *Número de Weber* representa a relação da *Força de inércia* com a *Força de tensão superficial*.

$$We = \frac{F_I}{F_S} = \frac{f_I}{f_S} = \frac{\rho LU^2}{\gamma} \quad (4)$$

O *Número de Eötvös* representa a relação entre a *Força de Flutuação (F_B)* e a *Força de tensão superficial*:

$$Eo = \frac{F_B}{F_S} = \frac{f_B}{f_S} = \frac{\Delta \rho g L^2}{\gamma} \quad (5)$$

A partir dos números adimensionais acima podem ainda ser definidos outros. Um exemplo é o *Número de Capilaridade*, que representa a relação entre a *Força viscosa* e a *Força de tensão superficial*:

$$Ca = \frac{F_V}{F_S} = \frac{f_V}{f_S} = \frac{\mu U}{\gamma} = \frac{We}{Re} \quad (6)$$

Outros grupos adimensionais importantes são as relações entre as densidades e as viscosidades das fases (WÖRNER, 2003).

$$\Gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c}, \quad \Gamma = \frac{\mu_d}{\mu_c} \quad (7)$$

2.1.4 Escoamento de bolhas/gotas e suspensões

As bolhas podem ser estudadas isoladamente ou em forma de suspensões. Independente do tamanho da bolha, ar em água, por exemplo, tem a sua subida considerada retilínea com a velocidade proporcional ao seu tamanho aumentando monotonicamente (WÖRNER, 2003).

O comportamento de bolhas em água pura e água “contaminada” também é diferente. Uma bolha de ar em água pura atinge sua velocidade máxima e reduz-se a um mínimo, e logo em seguida aumenta de novo e assim sucessivamente, enquanto que em água contaminada com sais, esse aumento é retilíneo.

Se uma bolha é muito pequena o seu formato é esférico, a medida que o seu tamanho aumenta, o formato se torna elipsoidal até a formação de uma calota, em bolhas muito grandes. Quanto maior o tamanho da bolha, maior a instabilidade no formato e na aceleração, todos esses fatores dependem das propriedades dos fluidos em questão (WÖRNER, 2003).

As influências das propriedades dos fluidos são melhores representados pelo número de Morton, que envolve fluxos de líquido/líquido e gás/líquido e a densidade e a viscosidade da fase contínua (WÖRNER, 2003):

$$Mo = \frac{F_B F_B^4}{F_l^2 F_s^3} = \frac{g \Delta \rho \mu_c^4}{\rho_c^2 \gamma^3} = \frac{Eo We^2}{Re^4} \quad (8)$$

Onde, os subíndices ‘c’ indicam a fase contínua.

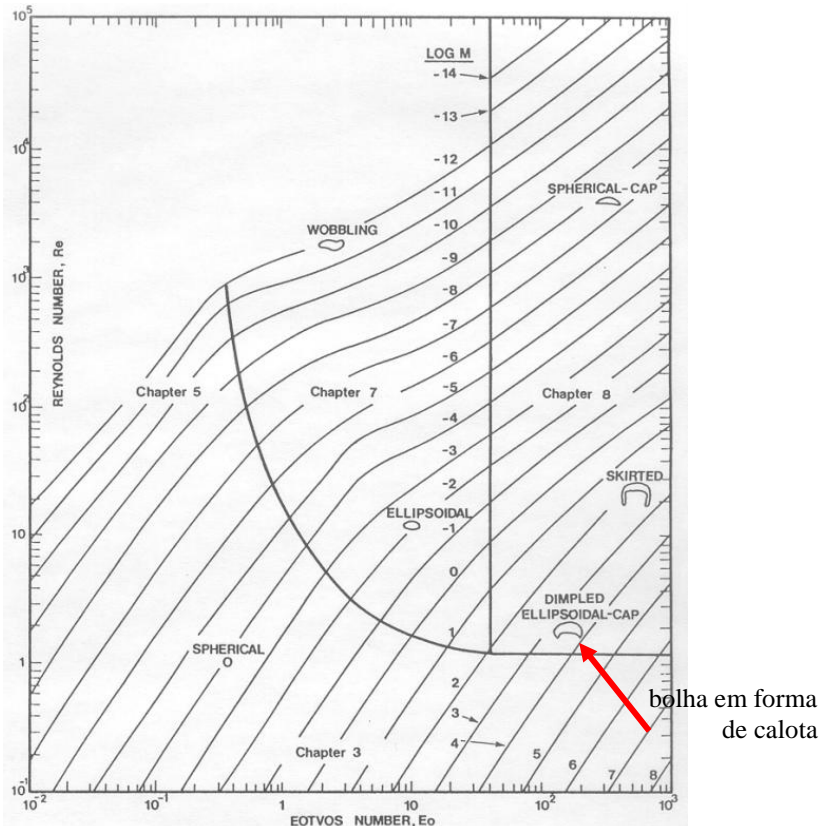
O escoamento de suspensões segue um comportamento diferente de uma partícula isolada. Na prática o escoamento de uma bolha isolada é muito raro e as interações partícula/partícula são importantes de serem estudadas, pois modificam a velocidade de escoamento. Um “enxame” de partículas (dispersão) em um escoamento diminui a sua velocidade tanto quanto aumenta o volume da suspensão (WÖRNER, 2003). Quando uma partícula está completamente imersa em um fluido

contínuo, cada elemento de área da superfície dessa partícula sofre ação de uma força pelo fluido circundante.

Em um cenário de vazamento em ambiente marinho, haverá diversos fatores que influenciarão no escoamento. As temperaturas da água e do óleo, salinidade e pressão são exemplos que influenciarão diretamente a interface água/óleo. Isso fará com que o tipo e formato das gotas se altere em relação aos trabalhos teóricos.

Uma relação entre os *Números de Reynolds, Eötvös e Morton* foi descrita por Wörner (2003), levando em consideração a tensão interfacial, viscosidade, densidade e *Força de Flutuação* consequente dos dois fluidos (Figura 1).

Figura 1: Bolhas em ascensão em função do Número de Reynolds, Eötvös e Morton.



Fonte: Wörner (2003).

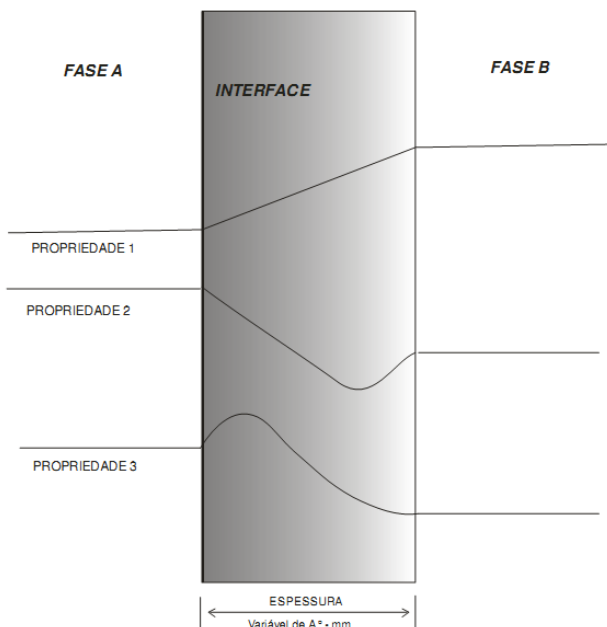
2.2 ASPECTOS IMPORTANTES NO ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA/ÓLEO

Devido ao fato de que maior parte da produção de petróleo nacional seja *offshore*, o conhecimento de fatores como pressão, temperatura e salinidade são indispensáveis para que as operações sejam bem sucedidas e os fenômenos envolvidos compreendidos. Algumas propriedades como tensão interfacial, viscosidade e densidade são afetadas diretamente pelos fatores citados, principalmente no caso de escoamento multifásico água/óleo, como no caso de vazamentos. Algumas dessas propriedades são apresentadas abaixo:

2.2.1 Tensão interfacial

A interface é uma região compreendida entre duas fases, tridimensional e heterogênea, diferindo da composição química das fases que a formam. A Figura 2 abaixo mostra a representação esquemática de uma interface:

Figura 2: Representação esquemática de interface.



Fonte: Paiva (2004).

Interfaces são geométricas e aparentes. Aparentes porque entre as duas fases não existe separação nítida e brusca, mas sim uma região de transição e variação contínua das propriedades de ambas as fases, quando no interior de cada fase estas propriedades poderiam não variar (PAIVA, 2004). Segundo o mesmo autor, nos estudos de fenômenos interfaciais, alguns fatores devem ser levados em consideração:

- A transição de uma fase para a outra é rápida, sendo a espessura pouco maior que algumas camadas de moléculas, mesmo havendo grande movimento cinético nesta;
- A existência de uma quantidade definida de energia livre por unidade de área interfacial, que é considerada como sendo a variação de energia requerida para trazer moléculas do interior de uma das fases para a interface por unidade de área;
- Diferença de potencial através da interface, ou seja, uma fase é mais carregada em relação à outra. Nas dispersões e emulsões, onde uma das fases está mais finamente subdividida e possui maior área interfacial, este fator pode ser observado mais claramente;
- De forma geral, baixos valores de energia livre interfacial caracterizam uma interface estável.

O parâmetro que descreve a interface é a tensão interfacial, sendo definida como a quantidade mínima de trabalho necessário para aumentar a área interfacial em uma unidade de área. A anisotropia entre as duas fases origina forças tensivas devido à ausência de uniformidade na distribuição das moléculas entre as fases. A tensão interfacial na mistura água/óleo é o principal fator de imiscibilidade dos fluídos (SANTOS *et al.*, 2003).

Em se tratando de escoamentos de vazamentos de óleo em ambientes marinhos, a salinidade é um fator fundamental de interferência na tensão interfacial. Comparando um volume de água com 0,0 kg/m³ de sal (NaCl) e outro volume com 30 kg/m³ (água do mar), ocorre uma redução de valor de tensão interfacial de 48,0 para 25,5 mN/m, além de também alterar a densidade, com um sutil aumento de 996 para 1020 kg/m³, respectivamente. Essa alteração de propriedades faz com que o processo de separação água/óleo seja mais acelerado (GHANNAM and CHAALAL, 2003).

Na interface de um escoamento bifásico ocorre um efeito chamado de pressão capilar, que mantém os dois fluídos separados, permitindo apenas algumas flutuações (SAFFMAN and TAYLOR, 1958).

2.2.2 Tensão superficial

É o trabalho necessário para aumentar a área da superfície de uma unidade num processo isotérmico reversível (RABOCKAI, 1979). Shaw (1966), diz que a tensão superficial é o excesso de energia livre por unidade de área, criada por forças coesivas das moléculas na superfície de um líquido atuando para o interior. Ou seja, a tensão superficial e a energia livre de superfície podem ser definidas como o trabalho necessário para aumentar ou reduzir a superfície em uma unidade de área.

A tensão superficial (γ) decresce com o aumento da temperatura, sendo necessário realizar um trabalho sobre o sistema para se obter um aumento da área de uma interface líquida. Se a área for aumentada adiabaticamente, a temperatura cairá e a tensão superficial aumentará, limitando posterior expansão da interface, conforme prevê o princípio de *Le Chatelier* (PAIVA, 2004). Esse princípio associa a necessidade da realização de um trabalho para aumentar a área superficial de um líquido, sendo a tensão superficial a “força” de oposição do líquido em sofrer esta deformação. A tensão superficial ainda apresenta uma relação de proporcionalidade com a pressão, ou seja, o aumento da pressão do sistema leva a um aumento da tensão superficial do líquido.

O conceito químico de tensão superficial está relacionado com a facilidade ou dificuldade com que as espécies do interior da fase se dirigem para a interface para interagirem com as moléculas da outra fase. Se a tensão superficial é alta as espécies tendem a permanecer no interior da fase, se é baixa, se alojam na interface (PAIVA, 2004).

Rabockai (1979) estudou a variação da tensão superficial em soluções em várias concentrações. O autor verificou que existem substâncias que aumentam e outras que diminuem a tensão superficial em soluções aquosas. Sais iônicos como solutos em água aumentam a tensão superficial em relação a tensão superficial da água pura. O trabalho necessário para levar as moléculas do interior da solução até a superfície é maior, tendo que vencer as forças de íon-dipolo de *Van der Waals*, sendo a região interfacial mais pobre em soluto que o interior da solução.

Esse tipo de conhecimento se torna interessante no estudo de vazamentos em ambientes marinhos devido à grande presença de sais no oceano, o que altera o comportamento dos vazamentos em regiões profundas em direção a superfície.

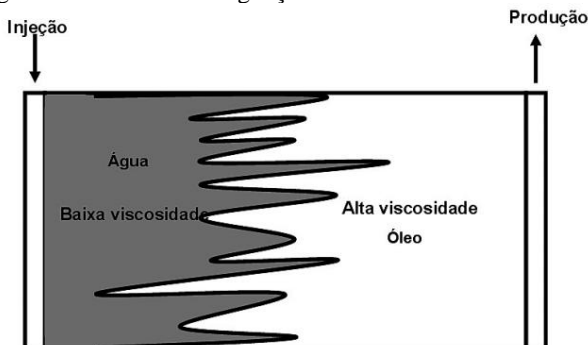
2.2.3 Viscosidade

A viscosidade (μ) é a medida da resistência ao escoamento de um fluido submetido a uma tensão mecânica. Para que o fluido se movimente, é necessário que haja um cisalhamento, ou seja, uma força motriz atuante em uma camada do fluido. Quanto maior a viscosidade de um fluido, maior é o cisalhamento necessário para movimentá-lo, e tal viscosidade é dependente da velocidade da transferência da quantidade de momento molecular e da coesão, esta última sendo diretamente proporcional à viscosidade e inversamente proporcional à temperatura (SILVA, 2008).

A viscosidade do óleo define a dimensão das partículas formadas em uma dispersão (DELVIGNE, 1988). Fortemente influenciada pela temperatura, aumenta à medida que o óleo envelhece, aumentando também a evaporação das frações leves e formação de emulsão com a água. Outro fator que influencia fortemente na alteração da viscosidade de um óleo é sua emulsificação, que vai depender diretamente da quantidade de água emulsionada (MOONEY, 1951).

Saffman and Taylor (1985) e Hansen and Rasmussen (1999) citam o efeito da digitação viscosa, que ocorre quando a diferença de viscosidade entre dois fluidos é muito grande, havendo a ultrapassagem do fluxo do fluido menos viscoso para o mais viscoso em forma de canalizações chamadas de *fingers*. Gustafsson (2006) cita a célula de Hele-Shaw, na qual um fluido viscoso ocupa domínio limitado, encontrando-se no espaço entre duas placas de área delimitada. O líquido pode ser injetado ou removido através de um ponto, e com isso pode ser observada a formação dos *fingers* (Figura 3).

Figura 3: Fenômeno da digitação viscosa em um reservatório de petróleo.



Fonte: Sousa *et al.* (2010).

A viscosidade do petróleo da Bacia de Santos (Campo Marlim Sul) é apresentada por Santos *et al.* (2003) como 741,94 mPa.s.

Num caso de derramamento de petróleo em ambiente marinho, a viscosidade do óleo pode aumentar rapidamente devido a um fracionamento do óleo durante o percurso para a superfície, ou a evaporação das frações de óleo mais leves (até 8 Carbonos) assim que alcançam a superfície. O volume do derrame pode ser reduzido em 40% dentro de poucas horas. O petróleo é formado por muitos componentes, e por isso possui uma taxa de evaporação logarítmica, pois cada componente tem diferentes graus de solubilidade e saturação no ar.

A evaporação também aumenta a densidade do óleo e as frações que não evaporam sofrem envelhecimento. A velocidade do vento, as propriedades do óleo, a área e espessura da mancha, a pressão de vapor, a radiação e a temperatura influenciam diretamente a evaporação do petróleo, alterando sua viscosidade e outras propriedades.

2.2.4 Densidade

A maior parte dos óleos e produtos refinados é menos densa que a água, flutuando livremente na superfície após um derramamento. As manchas de óleo que inicialmente flutuam, têm tendência a permanecer na superfície, excetuando casos em que há uma forte mistura do óleo com sedimentos, ou quando há combustão, originando a formação de resíduos altamente densos (GOBIRA *et al.*, 2007). Embora certos óleos crus mais densos que a água possam afundar por natureza e assim sedimentar.

O óleo torna-se menos flutuante ao longo do tempo, à medida que as frações mais voláteis se evaporam, e há formação de emulsões água-óleo. A temperatura também influencia a densidade do óleo, e se este for derramado numa água que está a uma temperatura inferior a do óleo, a sua densidade aumenta à medida que a sua temperatura se reduz até à temperatura da água (GOBIRA *et al.*, 2007).

Quando a densidade de um óleo derramado é próxima à densidade da água, o primeiro tende a afundar, e com isso formar gotas. O processo em questão ocorre comumente com óleos mais pesados derramados em águas frias (PALADINO, 2000).

Comumente a densidade (ρ) é conhecida como a massa (kg) que ocupa um determinado volume (m^3) de um material qualquer. Historicamente, quando se trata de densidade de petróleo, utiliza-se o Grau API para estimar o seu valor de mercado.

O Grau API é uma escala arbitrária que mede a densidade de

líquidos derivados do petróleo, criado pelo *American Petroleum Institute* (API). Quanto maior a densidade do petróleo menor o seu Grau API.

Ferreira (2012) determina as propriedades do petróleo para estudar a ação de um desemulsificante e apresenta a equação do cálculo do Grau API mostrado na Equação 9 abaixo:

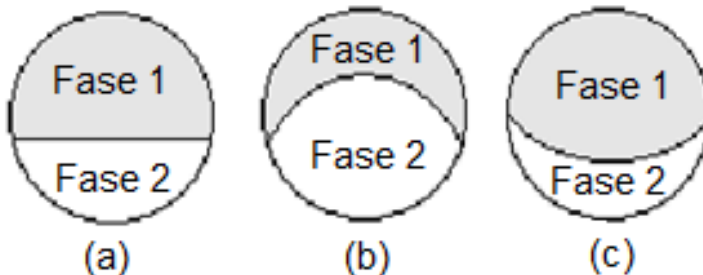
$$API = \frac{141,5}{\rho_{15,6^{\circ}C}} - 131,5 \quad (9)$$

A densidade do petróleo da Bacia de Santos (Campo Marlim Sul) é apresentada por Santos *et al.* (2003) como 925,5 kg/m³.

2.2.5 Molhabilidade

Dependendo das propriedades físicas de dois líquidos em um escoamento bifásico dutoviário, haverá uma molhabilidade da fase líquida no sólido. Mariano (2008) *apud* Brauner and Ullmann (2002) afirma que dependendo da molhabilidade dos fluídos, a interface líquido/líquido da seção transversal do escoamento em um duto pode ter um formato plano, côncavo ou convexo, conforme Figura 4 abaixo. Sendo a concavidade ou convexidade dependente principalmente da relação entre as propriedades de molhabilidade dos líquidos com a superfície sólida.

Figura 4: Esquema simplificado da interface de escoamento em um duto quando dois líquidos imiscíveis são submetidos a um escoamento: (a) interface plana (situação ideal); (b) interface convexa (situação real); (c) interface côncava (situação real).



Fonte: Mariano *apud* Brauner and Ullmann (2002).

As propriedades de molhabilidade de um fluido também dependem das características do sólido ao qual ocorre a aderência, sendo a rugosidade da superfície um fator muito importante (NAKAE *et al.*, 1998).

Substâncias chamadas de tensoativos são utilizadas para alterar características de um fluido, como a molhabilidade. Tensoativos são compostos anfífilos (substâncias que possuem regiões distintas e características como hidrofóbicas ou hidrofílicas), orgânicos ou organometálicos que formam colóides ou micelas em solução, tendo como forte característica o fato de apenas a polaridade das diferentes regiões variarem enormemente (ROSEN, 1989).

Paiva (2004) cita em seu trabalho que muitos termos são frequentemente utilizados para descrever o processo em que uma fase sólida e uma fase líquida entram em contato, em geral o termo mais utilizado é molhabilidade. O mesmo autor cita que os conceitos de hidrofobicidade e hidrofílicidade das partículas minerais estão sempre associados à sua molhabilidade. Na prática, mais de um tipo de molhabilidade podem estar associados à formação de interfaces sólido/líquido:

- Adesão: é caracterizada quando uma superfície sólida plana (S) é colocada em contato com uma superfície líquida plana (L) e a unidade de superfície de cada fase desaparece para formar uma unidade de superfície líquida de uma nova interface sólido/líquido. Rabockai (1979) calculou o trabalho envolvido neste processo (W_a) sob condições isotérmicas (Equação 10):

$$W_a = \gamma S/L - (\gamma S/V + \gamma L/V) \quad (10)$$

Onde $\gamma S/L$, $\gamma S/V$ e $\gamma L/V$ são as tensões interfaciais nas interfaces sólido/líquido, sólido/vapor e líquido/vapor, respectivamente (W_a é o trabalho reversível de adesão requerido para reestabelecer as condições iniciais);

- Espalhamento: caracterizado quando uma gota de líquido se espalha sobre uma superfície sólida plana. Para cada unidade de área de superfície sólida que desaparece, uma unidade equivalente de área de superfície líquida e interface sólido/líquido é formada. O trabalho envolvido é (Equação 11):

$$W_s = (\gamma S/L + \gamma L/V) - \gamma S/V \quad (11)$$

- **Imersão:** caracterizada quando ocorre a imersão total de um sólido. Neste caso são envolvidas trocas de interfaces sólido/vapor por interfaces sólido/líquido sem nenhuma troca na extensão da superfície líquida. O trabalho é dado conforme Equação 12 abaixo:

$$W_i = \gamma S/L - \gamma S/V \quad (12)$$

2.2.6 Emulsões

No próprio processo de produção de petróleo ocorre a formação de emulsões devido à sua associação com água e gás, também devido ao processo *gás lift* de reinjeção de gás, e injeção de água no poço para aumentar a pressão interna da jazida e possibilitar a vazão do óleo.

Bradley (1987) definiu emulsão como um sistema líquido heterogêneo formado por dois líquidos imiscíveis com um dos líquidos disperso na forma de gotículas no outro líquido. A formação de emulsões não é mais do que a dispersão de pequenas gotículas de um líquido dentro de outro (WANG and FINGAS, 1995).

Quando uma emulsão permanece estável por muito tempo, além das propriedades dos fluídos e do meio, como pressão e temperatura, também podem ser responsáveis por esse equilíbrio, os surfactantes e agente tensoativos que inibem a coalescência, pois estes diminuem a tensão interfacial entre os fluidos. De uma forma geral, emulsões se desfazem naturalmente com o tempo, variando esse tempo de alguns segundos a vários dias (FIORESE, 2004).

Pode haver emulsões de óleo em água e água em óleo. Quando gotas de óleo estão dispersas na água, há a formação de uma pasta, formando uma emulsão estável e persistente. Uma emulsão estável e totalmente emulsificada pode conter 80 a 90% de água e é um mecanismo importante para o envelhecimento do petróleo (WANG and FINGAS, 1995).

A tendência da formação e estabilização das emulsões água/petróleo, em casos de vazamentos, está em função do conteúdo de asfaltenos e parafinas do petróleo, que estão estabilizados em muitos óleos crus pelos solventes aromáticos. Quando está na superfície, a medida que a evaporação e foto-oxidação eliminam os solventes aromáticos, o conteúdo de asfaltenos e parafinas no petróleo altera-se, e estes compostos começam a precipitar. A partir de então a tensão superficial da interface óleo-água reduz e ocorre a emulsificação. É comum que a maioria dos óleos crus só inicie a emulsificação após certa fase de envelhecimento e é favorecida na presença de mar agitado

(WANG and FINGAS, 1995).

A emulsificação tem efeito significativo no comportamento das manchas de petróleo no mar. A formação de emulsões, por provocar aumento da viscosidade, diminui o espalhamento e a evaporação, e devido à sua estabilidade e persistência. O controle de emulsões é mais complexo do que um óleo não emulsionado, pois existe a inibição de algumas reações químicas e biológicas, uma vez que reduzem as áreas expostas ao ar e à água, sendo as operações de remoção e limpeza muito difíceis (WANG and FINGAS, 1995).

2.2.7 Dispersões

O desprendimento de gotas é causado pelas tensões turbulentas, estas gotas são degradadas com maior intensidade devido a maior influência sobre as mesmas da emulsificação, biodegradação e do espalhamento. Os vórtices devido à turbulência atuam no transporte dessas gotas, desprendendo-as da mancha e transportando-as verticalmente na coluna d'água (FERNANDES, 2001).

O movimento das gotas é causado por um balanço entre as *Forças de arraste* causadas pela turbulência e as *Forças de flutuação*. Essa turbulência pode ser causada, por exemplo, pela rebentação das ondas. A viscosidade do óleo, as temperaturas da água e do ar e estado do mar são os fatores que influenciam na dispersão de manchas de óleo em vazamentos (FERNANDES, 2001).

Quanto mais viscoso o óleo, mais difícil é o desprendimento de gotas, ou seja, um óleo leve tende a se dispersar mais do que o óleo pesado. A influência da temperatura está relacionada ao ponto de fluidez do óleo, sendo a dispersão quase eliminada quando a temperatura está abaixo desse valor. A dispersão em relação ao estado do mar é muito importante, pois se a agitação do mar for muito grande, a dispersão se torna mais importante que a evaporação (FERNANDES, 2001).

2.2.8 Espalhamento

Quando um vazamento de óleo chega até a superfície marinha, ocorre o espalhamento, que é o movimento horizontal da mancha sobre si mesma devido à ação da tensão superficial e da gravidade, aumentando a área da mancha. As forças que dominam o espalhamento são as *Forças inerciais, gravitacionais e viscosas*.

No começo do derramamento, o balanço é entre as *Forças inerciais e gravitacionais*, pois a espessura da mancha é grande nesse

momento. Após algumas horas ou dias, com a diminuição da espessura da mancha, as *Forças viscosas* se tornam mais relevantes comparadas às *inerciais*, e então o balanço deve ser feito entre *Forças viscosas e gravitacionais* (PALADINO, 2000). Decorrido mais tempo, a mancha torna-se muito dispersa, sem coesão, e até a sua modelagem torna-se difícil a partir daí (FERNANDES, 2001).

O espalhamento pode ser dividido em três fases, cada uma delas dominada por duas forças. Imediatamente após o derramamento, o espalhamento é comandado pela *Força gravitacional*; após um período de tempo curto, esta é balanceada pelas *Forças de tensão superficial*. Quando a espessura da mancha é muito pequena, a *Força gravitacional* deixa de ser importante, sendo o espalhamento dominado pelas *Forças de tensão superficial*, e impugnado pela *Força viscosa* (FAY and HOULT, 1971).

Na terceira fase, quando a mancha já é muito fina, ocorre uma divisão em pequenas manchas devido aos efeitos do vento, desta forma, a mancha perde unicidade. Portanto, é comum utilizar apenas a fase gravitacional-viscosa para calcular o espalhamento, assumindo que quando a espessura da mancha decresce até um determinado valor, o espalhamento termina. A Espessura de uma mancha pode variar de 0,1 mm, para óleos crus pesados, até 0,01 mm para substâncias menos viscosas (MACKAY *et al.*, 1980).

O efeito do vento e a turbulência associada também são fatores a serem levados em consideração em um espalhamento (FAY and HOULT, 1971). O vento causa um efeito conhecido como espalhamento turbulento, causado pelas *Forças de gravidade e de tensão superficial*.

2.2.9 Hidratos

Em águas profundas, a pressão é alta e a temperatura é baixa, ou seja, nessas condições, os gases podem formar hidratos gasosos. Esses hidratos são na realidade clatratos de uma mistura de água e gás. Isso ocorre quando uma molécula pequena fica presa em cavidades de cristais no resfriamento de uma solução, e um dos componentes cristaliza. Esse fenômeno é reversível com a elevação da temperatura do sistema. Os hidratos formados por gás natural são flutuantes, indo de regiões de alta para regiões de baixa pressão, se decompondo próximos à superfície em gás livre e água (CHEN and YAPA, 2004).

A presença de hidratos tem um impacto significativo no comportamento de vazamentos e no escoamento do petróleo em si, devido principalmente a alteração de fluatibilidade do óleo (CHEN and

YAPA, 2004).

Os hidratos formam blocos de gelo que bloqueiam os dutos, causando prejuízos da ordem de centenas de milhares de dólares. Enquanto o óleo está passando pelas linhas de transmissão, não há problema, pois sai dos poços submarinos em altas temperaturas, cerca de 60°C. As dificuldades surgem quando a passagem do petróleo tem que ser interrompida para a manutenção dos poços, por exemplo. Nesse caso, os dutos se resfriam gradativamente até atingir as temperaturas favoráveis à formação de hidratos, cerca de 4°C (CHEN and YAPA, 2004).

Uma das soluções para a não ocorrência de hidratos na produção de petróleo é aquecer as linhas de transmissão submarina de petróleo enquanto elas estiverem inativas (CHEN and YAPA, 2004).

2.3 SITUAÇÕES REAIS DE ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA/ÓLEO

2.3.1 escoamento multifásico em dutos

Os escoamentos multifásicos em tubulações, envolvendo líquido e gás ou líquido e líquido, conformam-se sob variadas configurações geométricas devido às suas interfaces. Os diferentes padrões de fluxo dependem de vários fatores, entre os quais estão (BORDALO and OLIVEIRA, 2007):

- Vazões das fases;
- Pressão;
- Diâmetro e a inclinação do duto;
- Rugosidade das paredes internas;
- Molhabilidade dos fluidos nas paredes do duto;
- Tensão superficial;
- Viscosidades e densidades dos fluidos.

Bannwart et al. (2001) estudaram os regimes de fluxo líquido-líquido em uma tubulação horizontal de 25,4 mm de diâmetro, escoando água e um óleo pesado com viscosidade de 500 mPa.s e densidade de 925 kg/m³. Os tipos gerais de regimes de fluxo observados no trabalho são exibidos na Figura 6, e descritos abaixo:

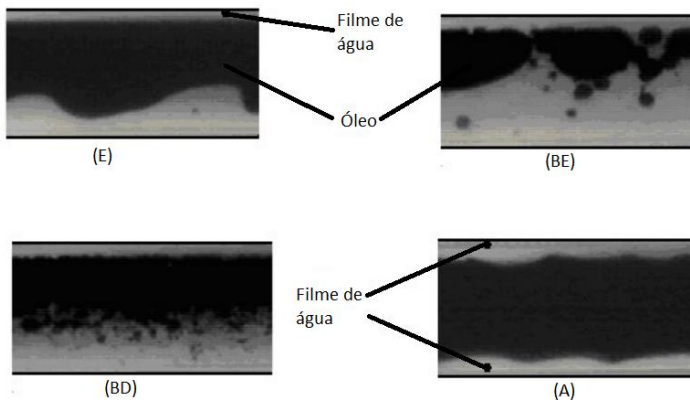
- Estratificado: nesta configuração, a fase menos densa (óleo) tende

a permanecer na parte de cima da seção do duto e a mais densa (água) na parte de baixo (segregação gravitacional). Observa-se a presença de um filme delgado formado pela fase mais densa (água), lubrificando a parte de cima da tubulação (E);

- Bolhas estratificadas: neste padrão, gotas de óleo se aglutinam na parte de cima do tubo, formando bolsões intermediados por pequenas bolhas dispersas (BE);
- Bolhas dispersas: observa-se uma dispersão de bolhas de óleo no interior da fase contínua (água). Este padrão ocorre para baixas vazões da fase dispersa (BD);
- Anular: nesta geometria, um filme delgado do líquido mais denso (água) escoou nas paredes do tubo, formando uma camada anular, e a fase menos densa (óleo) escoou pela parte central do tubo. Este regime ocorre para altas vazões da fase menos densa (A). Nos dois casos de fases contínuas (E e A), a interface água-óleo pode ser ondulada, em função do movimento relativo das fases. Em geral é um regime difícil de ser mantido por grandes distâncias a partir do ponto de entrada no duto.

A utilização de escoamento anular água/óleo para produção de óleos pesados de alta viscosidade e para o seu transporte minimiza as perdas de carga nas linhas de fluxo, uma vez que o óleo muito viscoso não entra em contato com as paredes da tubulação, aumentando consideravelmente a vazão de produção (BORDALO and OLIVEIRA, 2007).

Figura 6: Padrões de escoamento horizontal em dutos.



Fonte: Bordalo and Oliveira (2007).

2.3.2 Escoamento de vazamentos

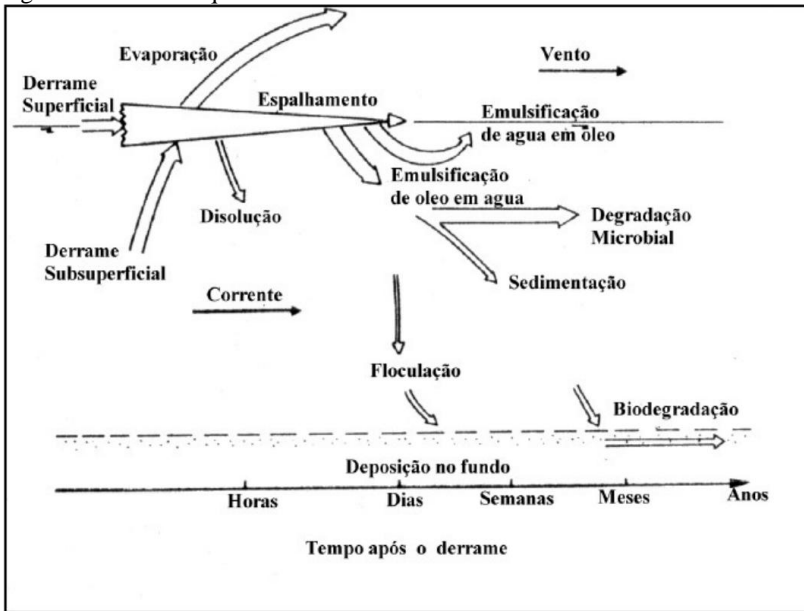
No processo de produção de petróleo, *offshore* ou *onshore*, ocorre a presença simultânea de água e óleo vindos do poço. Isto pode acontecer naturalmente, ou por bombeamento de água para aumentar a pressão do poço, conforme o método de recuperação de óleo (THOMAS, 2001).

É necessário estudar o comportamento dos fluídos existentes no reservatório, assim como as características físicas do mesmo, com o intuito de definir uma estratégia de exploração com o mínimo de perdas possíveis, pois os investimentos envolvidos são muito altos (TOWLER, 2002).

Quando ocorre um vazamento de petróleo em meio aquoso, a descarga inicial de óleo muitas vezes apresenta um comportamento fluidodinâmico denominado jato/pluma. Esses jatos são fluxos turbulentos produzidos por uma diferença de pressão através de um orifício. Já as plumas são movimentos devidos às forças de heterogeneidade dos fluidos, ocorrendo principalmente em emulsões. Um fluxo de um jato em alta velocidade forma uma camada laminar instável que cresce rapidamente, formando vórtices anulares, caracterizando as plumas, onde ocorre um arraste do fluido do jato para a vizinhança, e fluido da vizinhança para o fluxo do jato (HUAI and FANG, 2006).

Imediatamente após a introdução do petróleo no oceano, a advecção e espalhamento fazem com que haja um rápido aumento na área exposta do óleo, que posteriormente passará por processos de intemperismo, incluindo a evaporação, dissolução, dispersão, emulsificação e sedimentação (Figura 7) (ITOPF, 2007). Em cada um destes processos estão envolvidos os fatores químicos, determinados pela composição específica de petróleo derramado, bem como a oxidação fotoquímica que alguns componentes do petróleo podem sofrer. Enquanto processos químicos e físicos ocorrem, os processos biológicos também atuam de várias maneiras em diferentes frações do petróleo.

Figura 7: Processos que acontecem durante um derramamento.



Fonte: Chen and Yapa (2004).

Um procedimento de remoção de óleo a partir de navios naufragados foi desenvolvido por Cozijn and Andritsos (2011). O método é chamado de DIFIS (*Double Inverted Funnel for the Intervention on Ship Wrecks* - Funil invertido duplo para a Intervenção em naufrágios) (Figura 8).

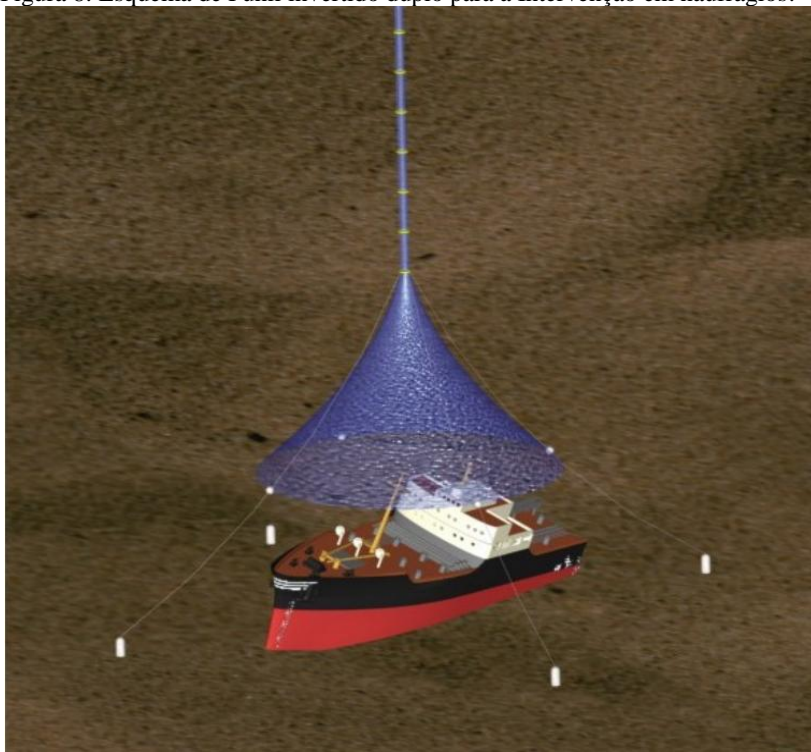
O princípio de funcionamento desse processo é a força motriz gerada pela diferença de densidades entre a água e o óleo. É um sistema passivo de recuperação de óleo com estrutura flexível que pode ser utilizado em grandes profundidades, composto por três componentes básicos, a cúpula, o tubo de ascensão e um compartimento de armazenamento temporário, localizado logo abaixo da superfície da água.

É notório que existem uma série de fatores envolvidos em um vazamento, como a vazão de óleo a escoar, o tamanho da abertura do vazamento, e uma série de características ambientais que nem sempre podem ser previstas (YAPA *et al.*, 1999).

É interessante o fato de que quando ocorre o vazamento de petróleo, a flutuação dos navios e qualquer instalação flutuante que estiver na amplitude do vazamento, perde flutuação por estar sobre um

fluido menos denso que a água (CHEN and YAPA, 2004).

Figura 8: Esquema de Funil invertido duplo para a Intervenção em naufrágios.

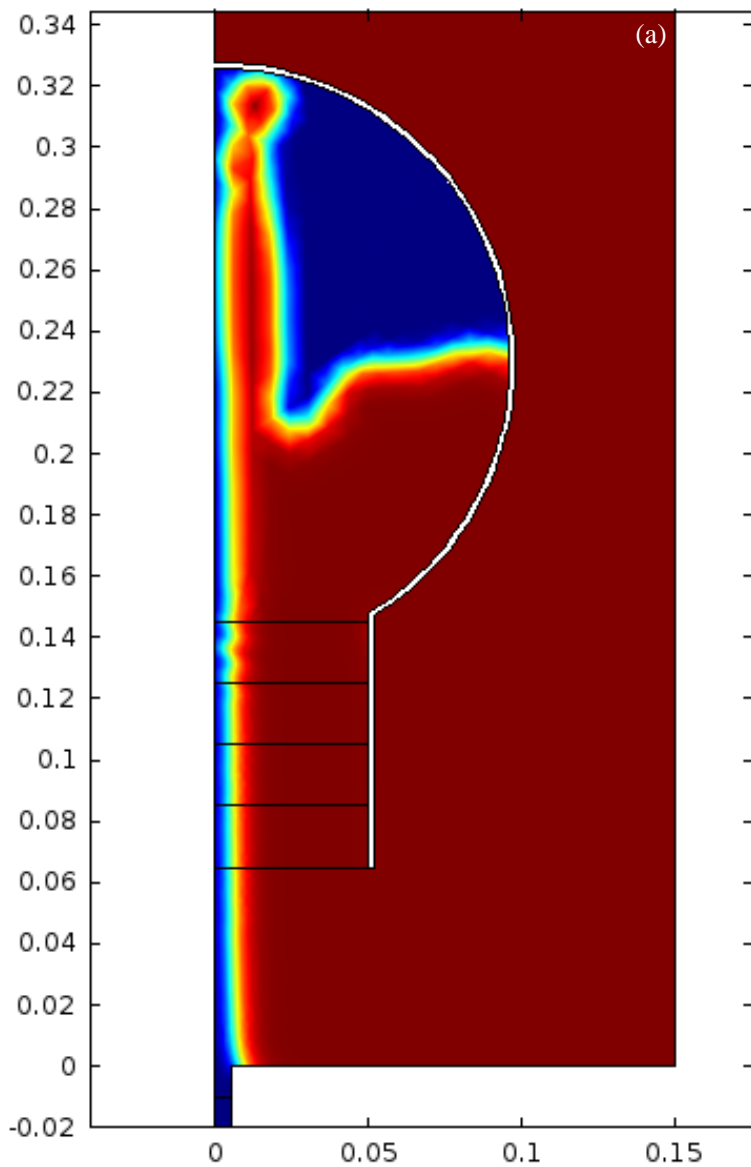


Fonte: Cozijin and Andritsos (2011).

Foram realizadas simulações testes da coleta de óleo com um balão em ambiente aquático. Percebeu-se que quanto maiores forem os contra fluxos de água no processo de captura de óleo, mais arraste e perturbação entre as fases pode ocorrer, prejudicando a ascensão e entrada de óleo no balão e aumentando a probabilidade de formar emulsões no ambiente confinado.

Nessas mesmas simulações para embasamento do trabalho, foi observado que se formaram ondulações na interface, mostrando a instabilidade do jato de óleo (Figura 9). Também foram constatadas correntes de recirculação da água no interior do balão promovidas pelo arraste de água que acompanha a entrada do óleo.

Figura 9: Simulação mostrando os contra fluxos no bocal do balão e o enchimento do balão.



Fonte: Autor.

2.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O estudo da modelagem computacional é importante em vários setores da engenharia. Estudar reservas de petróleo usando simulação numérica é de grande interesse pelo fato de que a maioria das decisões importantes de produção depende de informações providas de simulações.

Quando um sistema a ser estudado tem propriedades e formas regulares, é mais adequado o uso do método de diferenças finitas. Mas quando ocorrem descontinuidades, heterogeneidades e formas irregulares de contorno, o método de elementos finitos é mais adequado (KUKRETI *et al.*, 1989), como é o caso dos escoamentos multifásicos. O mesmo autor também afirma que, apesar de mais sofisticado matematicamente, este último método é uma alternativa para alcançar mais qualidade nas soluções.

As dificuldades na modelagem estão nos processos físicos de transferência que ocorrem através da interface, tais como transferência de momento, calor e massa, e troca de fases. As dificuldades numéricas surgem do fato de que as interfaces se movem, e determinadas grandezas são descontínuas através da interface, como densidade, viscosidade e pressão (WÖRNER, 2003).

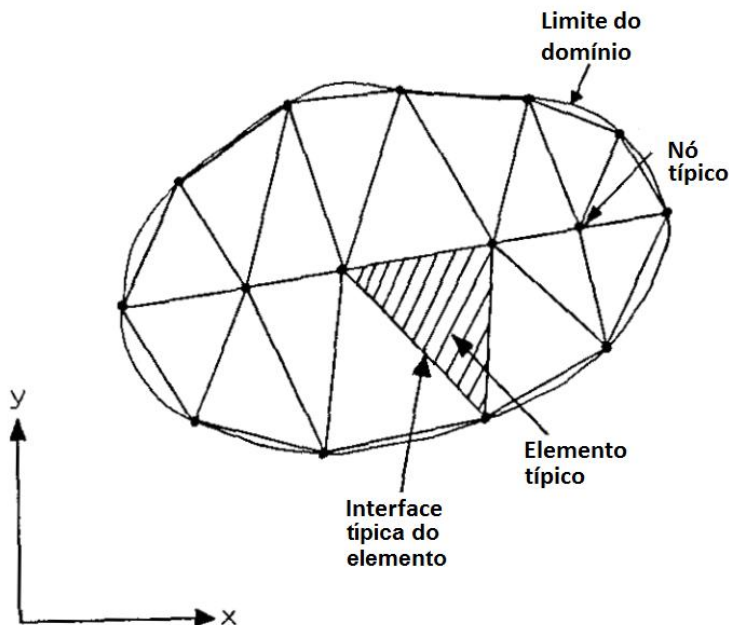
2.4.1 O método de elementos finitos

Para soluções numéricas, pode-se considerar um domínio bidimensional que é representado por um conjunto de subdivisões, também chamados de *elementos finitos*. Estes elementos são interconectados em pontos chamados *nós*.

Segundo Zienkiewicz *et al.* (2005) método dos elementos finitos é uma técnica numérica para resolver equações diferenciais parciais, sendo subdividido em células que formam uma malha.

Esse processo (subdivisão do domínio) é também conhecido como discretização da continuidade. Os elementos finitos podem possuir várias formas (triangular, retangular, quadrilateral, etc.) para discretizar o domínio, como também podem possuir bordas retas ou curvas. Geralmente os nós são selecionados nos cantos de um elemento e às vezes ao longo das interfaces dos elementos. A Figura 10 ilustra a discretização de um domínio bidimensional em um sistema de elementos finitos triangulares (KUKRETI *et al.*, 1989).

Figura 10: Domínio bidimensional representado com um conjunto de elementos finitos triangulares.

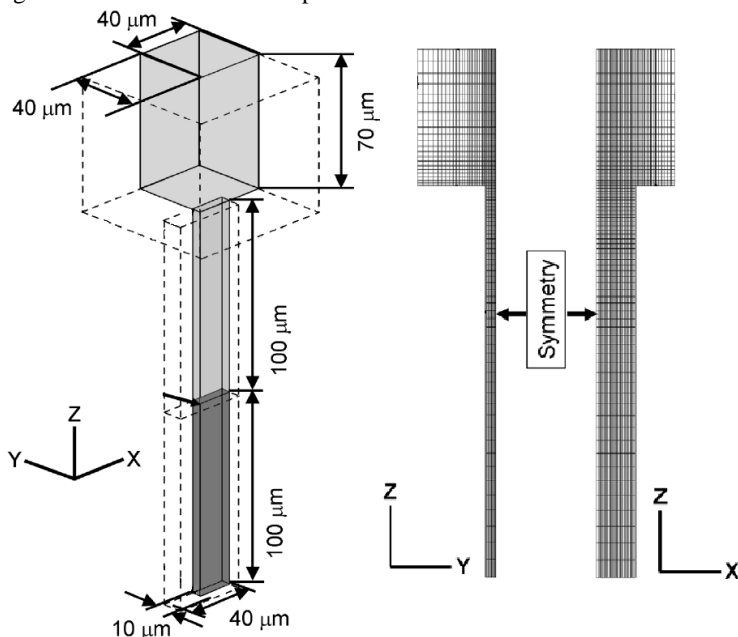


Fonte: Kukreti *et. al.* (1989).

Em cada nó dos elementos finitos, valores são considerados incógnitos, e são conhecidos como valores nodais. Funções polinomiais simples, chamadas de funções de molde, expressas em termos de coordenadas espaciais (x,y) são escolhidas para aproximar a variação dos valores nodais sobre cada elemento finito em cada fase. As incógnitas dos valores nodais estão compreendidas pela amplitude da respectiva função de molde, definidas separadamente sobre cada elemento do domínio (KUKRETI *et al.*, 1989).

Kobayashi *et al.* (2007) utiliza o método de elementos finitos para estudar escoamento de óleo através de um capilar para formar emulsões, por ser um método que “manipula” o escoamento multifásico. É possível, em uma modelagem de escoamento, controlar os efeitos de pressão capilar, por exemplo. A Figura 11 ilustra um conduto delineado por uma malha estruturada (elementos quadriláteros).

Figura 11: Conduto delineado por uma malha estruturada.



Fonte: Kobayashi *et al.* (2007).

Os elementos finitos são implementados segundo dois tipos de geometria em modelagens em duas dimensões (2D): elementos triangulares isoparamétricos de três nós e elementos quadriláteros isoparamétricos de quatro nós (KUKRETI *et al.*, 1989).

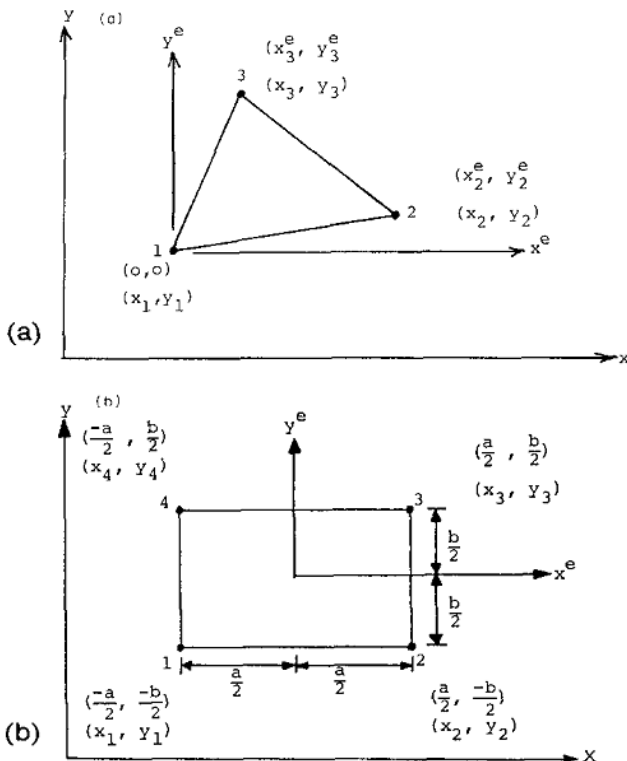
Nos elementos triangulares, pode ser adotada uma aproximação linear da função molde para expressar a variação dos valores nas duas fases no elemento, enquanto que para o elemento quadrático uma aproximação bilinear (equação cujo primeiro membro é linear em relação a duas variáveis diferentes ou a dois grupos diferentes de variáveis) pode ser selecionada. A seleção da função molde e o cálculo das matrizes dos elementos são simplificados e generalizados pelo conceito dos *parâmetros isométricos*. Neste conceito, o *sistema natural de coordenadas* é adotado para definir a geometria dos elementos e para expressar a função (KUKRETI *et al.*, 1989).

Na formulação de elementos finitos, geralmente um *sistema local de coordenadas* é definido por um elemento típico. O sistema de coordenadas usado para definir a geometria da configuração do domínio é chamado de *sistema global*. A Figura 12 ilustra um sistema de

coordenada local para um elemento triangular de três nós e um elemento retangular de quatro nós, estes alocados nos eixos locais cartesianos x^e e y^e (a), enquanto que o sistema global nos eixos x e y (b) cartesianos. Portanto, o sistema de coordenada local troca de elemento a elemento enquanto que o sistema de coordenada global não se altera (KUKRETI *et al.*, 1989).

Um sistema natural de coordenadas para um elemento é um sistema local que permite a expressão das coordenadas por qualquer ponto do elemento por um conjunto de números adimensionais e as suas magnitudes não ultrapassam valores unitários (KUKRETI *et al.*, 1989). Para montar uma matriz de elementos, é essencial que todos os elementos sejam referenciados em um sistema de coordenadas global e outro sistema de coordenadas.

Figura 12: Sistema de coordenada local e global para (a) elemento triangular com três nós e (b) elemento retangular com quatro nós.



Fonte: Kukreti *et al.* (1989).

2.4.2 Métodos de cálculo

Nos últimos 20 anos os principais métodos formulados para resolução de escoamentos de fluidos incompressíveis com interface definida são o *volume-of-fluid method*, *level-set method* e o *front tracking method*. Wörner (2003) citou que a principal dificuldade da resolução de simulação com interfaces é quando a forma e o movimento da interface fazem parte da mesma solução, pois densidade, viscosidade e pressão são descontínuas através da interface, como foi visto na seção anterior.

A ideia básica do *volume-of-fluid method*, descrito por Wörner (2003), é a definição de uma quantidade escalar f , que representa a fração do volume de uma malha ocupada por uma fase (fase 1). Para $f = 1$, a malha é toda ocupada pela fase 1, enquanto que para $f = 0$, a malha é toda ocupa por outra fase. Sendo $0 < f < 1$.

O *level-set method*, utilizado no software *COMSOL Mulyiphysics*[®] 4.3a, juntamente com o *phase-field method* para escoamentos multifásicos, segue uma abordagem diferente para evitar “manchar” a interface. A ideia desse método é definir a interface como o zero *level-set* através de uma função de suavização ϕ :

$$S_i = \{x \mid \phi(x, t) = 0\} \quad (13)$$

Onde S_i é a fase interface, \mathbf{x} é o vetor de posição e t é o tempo.

A região do fluido 2 é tida com $\phi < 0$ e a região do fluido 1 é tida com $\phi > 0$. Portanto se $\phi > 0$, $x \in$ phase 1 ou $\phi < 0$, $x \in$ phase 2. Na prática, ϕ é a espessura da interface e pode ser resolvido pela equação da advecção:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \phi \mathbf{v} = 0 \quad (14)$$

Sendo ϕ uma função de suavização, t o tempo e \mathbf{v} a velocidade do escoamento. A vantagem do *level-set method* é que, ao contrário do *volume-of-fluid method*, a interface é representada como uma superfície contínua. Fenômenos tais como o rompimento da coalescência podem ser resolvidos de maneiras simples. Desvantagens desse método são que a espessura da função ϕ deve ser reinicializada depois de cada passo de tempo e o método não é perfeitamente conservativo. Apesar de ser desenvolvido para escoamentos líquido/gás, pode trazer bons resultados

para líquido/líquido.

O *front-tracking method* é similar ao *level-set method*, baseado em um campo único de formulação da equação de momento que discretiza as diferenças finitas. A ideia chave do método é computar o campo de velocidade da solução da equação do momento em uma grade regular, enquanto a interface é representada por um conjunto de marcadores de partículas. Esses marcadores de partículas sofrem advecção com a velocidade local, que é interpolada da grade fixada para a posição dos marcadores de partículas. Após completo o passo de advecção das partículas e a interface ter sido novamente estruturada, marcadores de partículas são adicionados ou removidos para garantir a solução adequada da fase interface.

A principal vantagem desse último método é a representação precisa da interface como superfície contínua e é muito potente em simulação 3D. Uma desvantagem é que as trocas topológicas da interface tais como o rompimento e coalescência dificultam o controle e requer medidas adicionais específicas para cada caso.

No *phase-field method*, a interface entre os dois fluídos é tratada como uma fina camada de mistura, através da qual as propriedades físicas variam. Essa variação é governada pela variável ϕ , como no *level-set method*, mas aqui essa variável tem um parâmetro de ordem, seguindo a equação de Cahn and Hilliard (1958):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \delta \nabla G \quad (15)$$

Onde ϕ é a variável *phase-field* do campo de fase, \mathbf{u} é a velocidade axial, δ é a mobilidade da interface e G é o potencial químico. A variável ϕ atribui dois valores distintos para cada uma das fases, definindo a fração de volume para cada uma delas, havendo uma mudança suavizada de valores na interface, com largura infinitesimal (YUE *et al.*, 2006).

O potencial químico é dado por:

$$G = \lambda \left[-\nabla^2 \phi + \frac{\phi(\phi^2 - 1)}{\varepsilon^2} \right] \quad (16)$$

Onde λ é a densidade de energia da mistura (J/m³), ou seja, a quantidade de energia armazenada na interface por unidade de volume e ε é a escala de comprimento capilar que é dimensionada de acordo com

a espessura da interface.

O modelo *phase-field* reduz a equação de Cahn-Hilliard a duas equações de ordem inferior:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\sigma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \quad (17)$$

Sendo ψ uma variável auxiliar da variável *phase-field* (COMSOL, 2013) dada por:

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi + \frac{\varepsilon^2}{\lambda} \frac{\partial j}{\partial \phi} \quad (18)$$

Com $\lambda = \frac{3\varepsilon\gamma}{\sqrt{8}}$ e $\sigma = \chi\varepsilon^2$, ε é um parâmetro que controla a espessura da interface, j a energia livre externa, γ o coeficiente de tensão interfacial (N/m) e χ um parâmetro de ajuste da mobilidade.

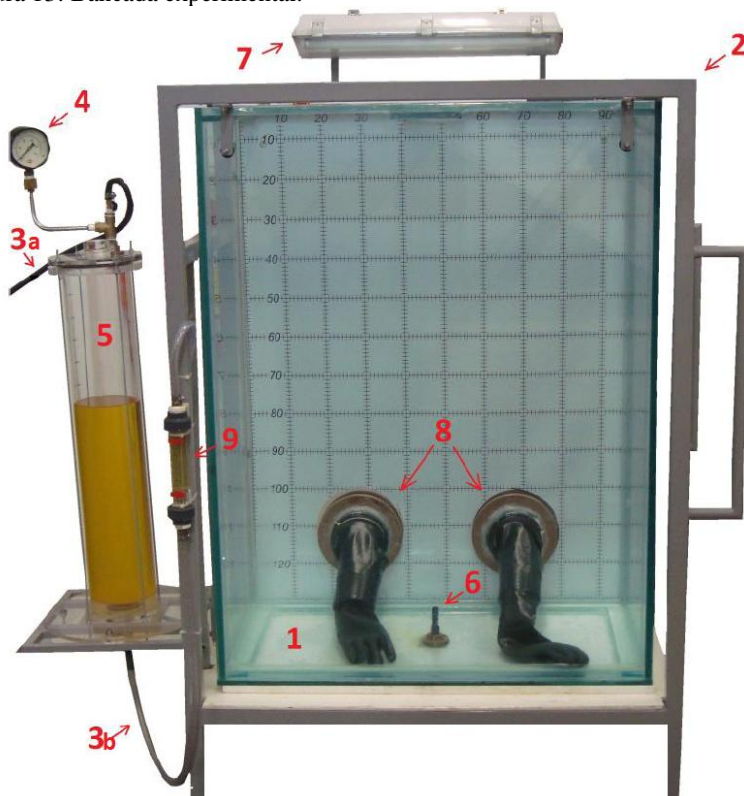
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Para que fosse possível realizar os experimentos, foi montada uma bancada experimental composta por um conjunto de dispositivos que permitiram a injeção de óleo em um meio submerso para o estudo do comportamento do escoamento. Essa mesma bancada experimental foi utilizada no trabalho de (FELLER, 2012), que estudou, dentre outros aspectos, a ruptura de um jato de óleo em ambiente submerso.

A Figura 13 abaixo ilustra os componentes da bancada experimental que são explicitados na sequência.

Figura 13: Bancada experimental.



Fonte: Autor.

1 Aquário: constituído de vidro temperado de 15,0mm espessura, dimensões espaciais de 130,0 x 100,0 x 50,0cm;

2 Carrinho de suporte: projetado para acomodar o aquário e o cilindro de óleo. Possui rodas de locomoção e quando está cheio é suportado por barrotes de madeira;

3 Mangueiras de injeção: (a) transporta ar comprimido para pressurização do cilindro de óleo, (b) transporta fluido do cilindro de óleo até o bocal de injeção no fundo do aquário;

4 Manômetro: mede a pressão no cilindro de óleo para controle operacional;

5 Cilindro de óleo: Armazena o óleo antes de ser injetado no aquário. Feito em acrílico para visualização completa do esgotamento deste. Dimensões de 85,0 x Ø 15,0cm, com entradas superiores de ar comprimido e óleo e saída inferior de óleo, pressão máxima de trabalho de 30,0 psi;

6 Bocal de injeção: orifício de injeção de óleo correspondente a um ponto de vazamento. Utilizado também para escoamento do aquário;

7 Sistema de iluminação: composto por duas lâmpadas fluorescentes de 20W de potência objetivando melhorar o registro das imagens e filmagens dos experimentos;

8 Luvas: permitem a montagem dos experimentos;

9 Rotâmetro: mede a vazão de óleo a ser injetada no aquário.

A parte traseira do aquário foi graduada para melhor compreensão das dimensões dos objetos e escoamentos submersos.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados segundo uma sequência operacional lógica. O cilindro de óleo é preenchido com óleo e o aquário preenchido com água até os níveis adequados para cada experimento. O volume total do cilindro de óleo varia de 5 a 9L e volume do aquário de 400 a 600L. Todas as válvulas são abertas para que o óleo possa escoar do cilindro até o aquário. Em seguida, é acionado o ar comprimido no cilindro de óleo para que se possa atingir a vazão de óleo desejada, que é medida no rotâmetro. A pressão no sistema de injeção de óleo é controlada pelo manômetro instalado no cilindro. Mesmo quando não houve acionamento do ar comprimido no cilindro de óleo, ocorreu gotejamento de óleo no bico de injeção devido a inversão de fases entre óleo e água, ou seja, a pressão não agrega energia ao escoamento. As forças viscosas impediriam o contra fluxo de com a utilização de um

bico de diâmetro menor.

Os balões de captura são centralizados sobre o bico de injeção, fixados em um suporte universal, e distanciados conforme o experimento.

O estudo aborda aspectos relacionados aos perfis de velocidade, escoamento, e a acomodação do óleo que ascende até o balão de captura.

Os experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente ($\sim 22^\circ\text{C}$), filmados com câmera digital SONY Handycam HDR-XR550V.

3.3 BALÕES DE CAPTURA

Para compreender o processo de captura de óleo vazando por um orifício, foram idealizadas diversas geometrias de um recipiente de captura. Foi selecionada a geometria o mais próxima possível da esférica, por possuir maior capacidade volumétrica por área superficial.

A esfera pode ser definida como um sólido geométrico formado por uma superfície curva contínua cujos pontos estão equidistantes de outro ponto fixo e interior chamado centro (VENTURI, 2003). A esfera tem a menor superfície entre todos os sólidos de dado volume, por isso a esfera sempre aparece na natureza como nos corpos celestes e nas bolhas e pequenas gotas d'água, que são aproximadamente esféricas, pois a tensão superficial leva a uma área superficial mínima.

Um objeto esférico pode ser definido pelo valor de esfericidade (ζ), no qual uma esfera perfeita terá valor 1. A esfericidade terá valores $0 < \zeta < 1$ (WÖRNER, 2003).

Os tipos de balões de captura de óleo testados foram:

1 Balão flexível de látex com capacidade máxima de volume de 65L, quando completamente cheio com 50,0cm de diâmetro. Espessura de $330,0 \mu\text{m}$;

2 Balão flexível de plástico (PEAD – polietileno de alta densidade) com capacidade máxima de 7,2 L quando completamente cheio com 25,0 cm de diâmetro. Espessura da parede de $9,0 \mu\text{m}$;

3 Balão flexível de plástico (PEAD – polietileno de alta densidade) com capacidade volumétrica máxima de 4,0 L quando completamente cheio. Por possuir formato irregular, não foi possível medir o diâmetro. Espessura da parede de $31,0 \mu\text{m}$;

4 Balão flexível de plástico (PEAD – polietileno de alta densidade) com capacidade volumétrica máxima de 4,0 L quando completamente

cheio. Por possuir formato irregular, não foi possível medir o diâmetro. Espessura da parede de $144,0 \mu\text{m}$;

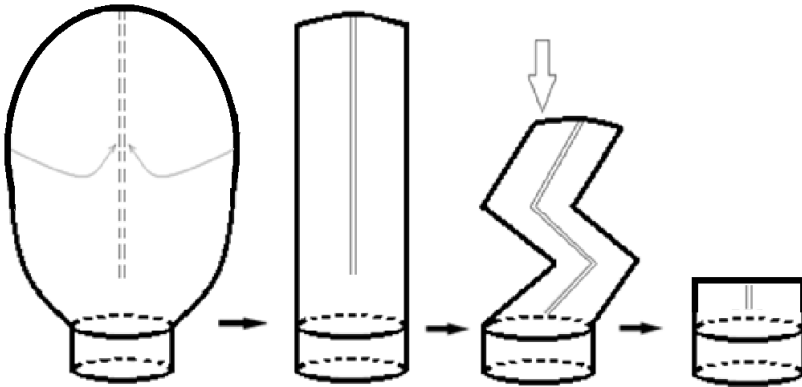
5 Balão flexível de tecido de nylon com capacidade de $7,5 \text{ L}$ quando completamente cheio. Espessura da parede de $85,0 \mu\text{m}$.

Todas as medidas das espessuras das paredes dos balões utilizados nos experimentos foram feitas com um micrômetro digital DIGIMESS IP54.

3.3.1 Abertura e enchimento dos balões

Foi adotada uma técnica de dobradura para verificar como a força de empuxo do óleo injetado proporciona a abertura do balão. O objetivo desta técnica é verificar uma forma de possibilitar o trajeto desse equipamento para as regiões profundas do oceano com o menor volume possível, reduzindo o atrito e possíveis acidentes. A Figura 14 abaixo mostra o esquema de dobradura adotado.

Figura 14: Esquema de dobradura de balões flexíveis.



Fonte: Autor.

Para o balão n.º 4, foi utilizado o óleo lubrificante de motores, e *Força de flutuação* consequente. Para os outros balões, os experimentos foram realizados apenas com óleo de soja.

3.4 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS DO ESTUDO

Os experimentos foram realizados utilizando óleo de soja, óleo

lubrificante de motores (SAE 20W 40) e água. As medições de densidade e viscosidade do óleo foram realizadas no Laboratório de Sistemas Porosos (LASIPO) e na Central de Análises, ambos do Departamento de Pós-Graduação de Engenharia Química.

A escolha do óleo de soja para utilização no presente trabalho se justifica pela disponibilidade de mercado, aspecto visual, propriedades físicas constantes a uma ampla faixa de temperatura, facilidade de higienização dos equipamentos, dentre outras, permitindo obter resultados de alcance mais geral com possibilidade de atender aos fenômenos observáveis (BAPTISTA *et al.*, 2009).

3.4.1 Densidade

As densidades dos óleos foram determinadas em duplicata utilizando um picnômetro de 10,0 mL e uma balança digital da marca Bioprecisa modelo FA2104N. A metodologia utilizada foi a divisão da massa pelo volume em temperatura ambiente ($\sim 22^\circ\text{C}$). O valor da densidade (ρ) do óleo de soja utilizada foi de $0,873 \text{ g/cm}^3$ e do óleo lubrificante de $0,820 \text{ g/cm}^3$.

3.4.2 Viscosidade

A viscosidade foi medida utilizando um viscosímetro digital HAAKE Viscotester 6L, a temperatura ambiente. O valor da viscosidade (μ) para o óleo de soja utilizada foi de 58 mPa.s e do óleo lubrificante de 275 mPa.s.

A variação da temperatura possui grande influência na viscosidade e conseqüentemente nos escoamentos aqui estudados. Devido a esse e outros fatores, a temperatura ambiente foi preservada na realização dos experimentos, pois a fluidez dos óleos é influenciada por esta.

3.4.3 Tensão interfacial

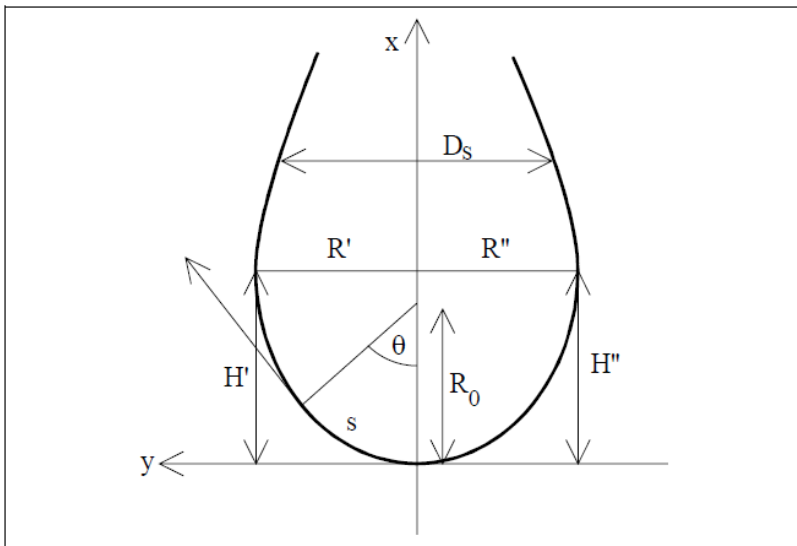
A tensão interfacial (γ) entre a água e o óleo é muito variável, pois depende da origem produtora do óleo, podendo apresentar características muito diferentes uns dos outros.

Uma ampla faixa de valores foi encontrada na literatura para a tensão interfacial água/óleo, constatando-se, adicionalmente, que o valor da mesma deveria ficar entre a tensão superficial do óleo de soja e o ar (28 mN/m) e a tensão superficial entre a água e o ar (75 mN/m). Outro

fator é o fato da presença de sal na água alterar a tensão interfacial entre a água e o óleo, embora os experimentos tenham sido conduzidos com água doce.

O método da gota pendente (RUSANOV and PROKHOROV, 1996) foi utilizado para a determinação da tensão interfacial água/óleo empregando-se um goniômetro Ramé-Hart Inst. Co. 250-F1. Esse equipamento registra imagens de gota a ser medida, no caso, de uma gota imersa em água. Foi selecionado o número máximo de leituras a serem realizadas (900 a 1000) na gota e o espaçamento entre as leituras de 1,0 segundo. Após isto, o equipamento realiza a medida da tensão interfacial com o ajuste da gota à janela de visualização do equipamento. O cursor horizontal do equipamento é posicionado na base da gota e o vertical deve passar pelo centro da mesma. O resultado estabilizado (após 600 medidas) foi em 33 mN/m. A Figura 15 abaixo mostra as regiões onde são medidos os parâmetros geométricos para o cálculo:

Figura 15: Coordenadas, medidas e ângulos da gota utilizados para o cálculo da tensão interfacial.



Fonte: (RUSANOV and PROKHOROV, 1996)

A tensão interfacial é obtida através da Equação:

$$\gamma = \Delta\rho g R_0^2 / \beta \quad (19)$$

Onde $\Delta\rho$ é a diferença de densidade mássica entre a gota e o meio, g é a força gravitacional, R_0 é o raio de curvatura no vértice e β é um fator de ajuste negativo, pois nesse caso a gota está imersa em água e virada para cima. O Parâmetro s é a distância ao longo do perfil. O fator β pode ter valores de 0,55 até 10^{20} , e é obtido através de integração numérica por meio de um algoritmo com ajuste automático do comprimento do passo. A Equação utilizada para cálculo do β é:

$$\beta = -0,12836 + 0,7577\omega - 1,7713\omega^2 + 0,5426\omega^3 \quad (20)$$

Onde ω é a razão entre o diâmetro da base da gota (D_s) e a distância de D_s até o ápex da gota. A localização de D_s no perfil da gota é previamente calculado empiricamente através da medida de diâmetros de vários tamanhos e formas de gotas de água, e estes dados obtidos são utilizados em uma linha de regressão de primeira ordem através de todos os pontos de dados empíricos.

3.5 MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Os estudos de simulação foram realizadas em um computador com processador Intel Core i7 3,07 GHz, memória RAM de 6Gb, sistema operacional Windows 7 Ultimate 64 Bits. Os *softwares* de simulação utilizados foram o *COMSOL Multiphysics 4.3a*, que utiliza o método dos elementos finitos para discretização das equações diferenciais, e o *Wolfran Mathematica v.8*.

O *COMSOL* possui ferramentas de CFD (*computational fluid dynamics* – fluido dinâmica computacional) aplicáveis aos escoamentos bifásicos que permitem considerar os efeitos de convecção/difusão ao nível das interfaces do sistema água/óleo. Nesta abordagem, assume-se escoamento laminar, isotérmico e domínio bidimensional axissimétrico para modelar a ascensão do óleo. A discretização das equações diferenciais que regem o fenômeno é feita através do método dos elementos finitos (CHEN and YAPA, 2004).

No *COMSOL Multiphysics 4.3a*, as propriedades físicas dos fluídos consideradas foram:

- Densidades;
- Viscosidades;
- Tensão interfacial;
- Pressão;

- Condições operacionais.

Foi assumido escoamento laminar bifásico isotérmico (22°C). Os campos de velocidade e pressão para os fluidos em presença da força gravitacional são descritos pelas equações de Navier-Stokes e pela equação da continuidade da massa, que em notação vetorial são dadas pelas Equações 21 e 22 abaixo (GIRAULT and RAVIART, 1979):

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-P\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \rho\mathbf{g} + \gamma \quad (21)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (22)$$

Onde ρ é a densidade (kg/m³), \mathbf{u} é o vetor velocidade (m/s), t é o tempo, P é a pressão (Pa), \mathbf{I} é o sistema de vetores unitários, T é a operação transposta da matriz, \mathbf{g} é a aceleração gravitacional (m/s²), μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s) e γ é a tensão interfacial (mN/m).

Para modelar a interface do escoamento bifásico água/óleo, foi selecionado o método *phase-field* (seção 2.4.2).

Já no *Mathematica*, uma ferramenta muito mais econômica que expressa o próprio fenômeno estudado, colocando-se as equações do escoamento água/óleo, foi desenvolvida uma representação simplificada e aproximada, do escoamento água/óleo do que se obtêm com o *COMSOL* para o estudo do jato em um bocal de recepção. Foi também estudado o formato do balão durante o seu enchimento.

3.5.1 Modelo de escoamento simplificado de um jato de óleo submerso através de um tubo

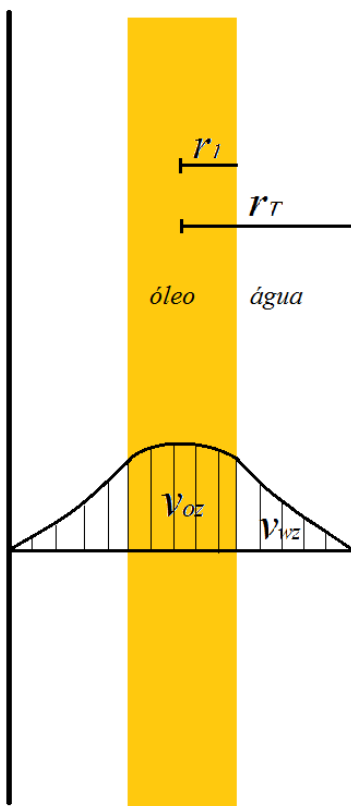
O problema do fluxo de água arrastada por um jato de óleo ao passar através do tubo de recepção (Figura 16) é um aspecto importante a ser estudado no escoamento bifásico com uma interface estável desses fluidos incompressíveis. Seguindo a teoria apresentada por Bird *et al.* (2002), um balanço diferencial de momento para as fases óleo e água leva as seguintes equações para a fase óleo (23) e para a fase água (24):

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{orz})}{dr} = k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) \quad (23a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{wrz})}{dr} = \frac{-\Delta P_{wi}}{H} \quad (23b)$$

Onde τ_{orz} e τ_{wrz} são as tensões no plano rz para as fases óleo e água, respectivamente; $-\Delta P_o/H$ é o gradiente de pressão efetivo na fase óleo na direção vertical (z) negativo para cima no interior do tubo cilíndrico de altura H e $-(\rho_w - \rho_o)g$ o termo de flutuação; k_{ow} é um fator adimensional de penetrabilidade; $-\Delta P_{wi}/H$, é o gradiente de pressão efetivo negativo para cima induzido na fase água devido aos efeitos de entrada do óleo no tubo; ρ_w e ρ_o as densidades da água e do óleo, respectivamente; e g a aceleração da gravidade.

Figura 16: Esquema em corte de um jato de óleo ascendendo pelo interior de um tubo.



Fonte: Autor.

A integração das Equações (23a) e (23b) produz, respectivamente:

$$\tau_{orz} = -\mu_o \frac{dv_{oz}}{dr} = \frac{r}{2} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) + \frac{C_{o1}}{r} \quad (24)$$

$$\tau_{wrz} = -\mu_w \frac{dv_{wz}}{dr} = \frac{r}{2} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) + \frac{C_{w1}}{r} \quad (25)$$

Na posição da interface água/óleo ($r = r_1$) tem-se $\tau_{orz} = \tau_{wrz}$, levando à seguinte expressão:

$$C_{o1} = -\frac{r^2}{2} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) + \frac{r^2}{2} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) + C_{w1} \quad (26)$$

Também em ($r = r_1$) tem-se que $v_{oz} = v_{wz}$. Logo, por integração de (24) e (25) chega-se a expressão:

$$C_{o2} = -\frac{r_1^2}{4\mu_w} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) + \frac{C_{w1}}{\mu_w} \ln r_1 + C_{w2} - \frac{r_1^2}{4\mu_o} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) - \frac{C_{o1}}{\mu_o} \ln r_1 \quad (27)$$

Em $r = 0$, onde se encontra o eixo de simetria, tem-se $\frac{dv_{oz}}{dr} = 0$, o que resulta em:

$$\frac{r}{2\mu_o} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) + \frac{C_{o1}}{r\mu_o} = 0 \Rightarrow C_{o1} = 0 \quad (28)$$

Na parede do tubo, em $r = r_T$ (raio do tubo) tem-se condição de parede (*no slip*), ou seja, $v_{wz} = 0$, resultando em:

$$C_{w2} = -\frac{r_T^2}{4\mu_w} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) - \frac{C_{w1} \ln r_T}{\mu_w} \quad (29)$$

A combinação das Equações 26 a 29 permite que se calcule as constantes de integração C_{o1} , C_{o2} , C_{w1} , C_{w2} :

$$C_{o1} = 0 \quad (30)$$

$$C_{o2} = \frac{r_1^2}{4\mu_{av}} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) - \frac{r_1^2}{4\mu_w} \left(\frac{-\Delta P_w}{H} \right) - \frac{r_1^2}{4\mu_{av}} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) + \frac{r_1^2 \ln r_1}{2\mu_{av}} \left[\frac{\Delta P_{wi}}{H} + k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) \right] + \frac{r_1^2 \ln r_T}{2\mu_w} \left[\frac{-\Delta P_{wi}}{H} - k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) \right] \quad (31)$$

$$C_{w1} = \frac{r^2}{2} \left[k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) - \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) \right] \quad (32)$$

$$C_{w2} = -\frac{r_1^2}{4\mu_w} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) - \frac{r^2 \left[k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) - \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) \right] \ln r_T}{2\mu_w} \quad (33)$$

Podendo-se então determinar os perfis de velocidade das fases óleo e água:

$$v_{oz} = -\frac{r^2}{4\mu_o} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) - C_{o2} \quad (34)$$

$$v_{wz} = -\frac{r^2}{4\mu_w} \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) - \frac{C_{w1} \ln r}{\mu_w} - C_{w2} \quad (35)$$

Passada a fase em que água é arrastada para dentro do balão, estabelece-se um regime de contra fluxo de água, sendo necessário uma vez mais que o modelo esteja apto a indicar a configuração do escoamento das fases água/óleo ao nível do tubo de recepção. Deverá ser considerado o diferencial de pressão atuante sobre a coluna de óleo ascendente e o raio médio da mesma bem como o raio do tubo e intensidade do contra fluxo de água, que será variável no caso de um balão inflável. Para isto, a metodologia já utilizada para o arraste de água é agora aplicada substituindo-se de início a Equação 24 pela 36 para a fase água:

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{w rz})}{dr} = \frac{\Delta P_w}{H} \quad (36)$$

Onde $\frac{\Delta P_w}{H}$ é o gradiente de pressão efetivo na direção vertical (z) positivo para cima no interior do tubo cilíndrico de altura H .

A integração da Equação 36 produz:

$$\tau_{wrz} = -\mu_w \frac{dv_{wz}}{dr} = \frac{r}{2} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) + \frac{C'_{w1}}{r} \quad (37)$$

Que deve ser considerada juntamente com a Equação 36 trocando C_{o1} por C'_{o1} .

Na posição da interface água/óleo ($r = r_1$) tem-se que $\tau_{orz} = \tau_{wrz}$ levando à seguinte expressão:

$$C'_{o1} = -\frac{r^2}{2} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) + \frac{r^2}{2} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) + C'_{w1} \quad (38)$$

Também em $r=r_1$ tem-se que $v_{oz} = v_{wz}$. Logo, por integração das Equações 23a e 36, chega-se à expressão:

$$C'_{o2} = \frac{r_1^2}{4\mu_w} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) + \frac{C'_{w1}}{\mu_w} \ln r_1 + C'_{w2} - \frac{r^2}{4\mu_o} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) - \frac{C'_{o1}}{\mu_o} \ln r_1 \quad (39)$$

Em $r=0$, onde se encontra o eixo de simetria, tem-se $\frac{dv_{oz}}{dr} = 0$, o que resulta em:

$$\frac{r}{2\mu_o} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o)g \right) + \frac{C'_{o1}}{r\mu_o} = 0 \Rightarrow C'_{o1} = 0 \quad (40)$$

Na parede do tubo, em $r = r_T$ (raio do tubo) tem-se condição de parede (*no slip*), ou seja, $v_{wz} = 0$, resultando em:

$$C'_{w2} = -\frac{r_T^2}{4\mu_w} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) - \frac{C'_{w1} \ln r_T}{\mu_w} \quad (41)$$

A combinação das Equações 38 a 41 permite que se calculem as novas constantes de integração C'_{o1} , C'_{o2} , C'_{w1} e C'_{w2} :

$$C'_{o1} = 0 \quad (42)$$

$$C'_{o2} = \frac{r_1^2}{4\mu_{av}} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) - \frac{r_T^2}{4\mu_w} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) - \frac{r_1^2}{4\mu_{av}} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o) g \right) + \rho_o g + \frac{r_1^2 \ln r_1}{2\mu_{av}} \left[-\frac{\Delta P_w}{H} + k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o) g \right) \right] + \frac{r_1^2 \ln r_T}{2\mu_w} \left[\frac{\Delta P_w}{H} - k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o) g \right) \right] \quad (43)$$

$$C'_{w1} = \frac{r^2}{2} \left[k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o) g \right) - \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) \right] \quad (44)$$

$$C'_{w2} = -\frac{r_T^2}{4\mu_w} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) - \frac{r^2 \left[k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o) g \right) - \left(\frac{-\Delta P_{wi}}{H} \right) \right] \ln r_T}{2\mu_w} \quad (45)$$

Pode-se então determinar os perfis de velocidade nas fases óleo e água:

$$v_{oz} = -\frac{r^2}{4\mu_o} k_{ow} \left(\frac{-\Delta P_o}{H} - (\rho_w - \rho_o) g \right) - C'_{o2} \quad (46)$$

$$v_{wz} = -\frac{r^2}{4\mu_w} \left(\frac{\Delta P_w}{H} \right) - \frac{C'_{w1} \ln r}{\mu_w} - C'_{w2} \quad (47)$$

As equações supracitadas foram implementadas no *Wolfram Mathematica* v.8 de modo a ajustar o modelo simplificado aos resultados obtidos com o *COMSOL Multiphysics 4.3a* para as diferentes situações testadas.

3.5.2 Modelo elíptico para o balão preenchido com óleo

Sabe-se que durante o enchimento dos balões, ocorre um aumento do empuxo devido ao preenchimento gradativo com óleo do volume disponível no balão. Para estudar as formas assumidas pelo balão, foi realizado um experimento que consistiu em encher com óleo um saco plástico submerso em água para testar as equações de formas funiculares elípticas estudadas por Newman apud Irvine (1981) aplicadas ao transporte de toras de madeiras em rios e lagos no Canadá e em partes

da Europa (Figura 17b).

A barragem das toras é composta por muitas centenas de pedaços de madeira conectados. Newman apud Irvine (1981) estudou as equações paramétricas do modelo integral elíptico que definem a forma da barragem. Esse mesmo perfil foi tomado e rotacionado segundo seu eixo de simetria para produzir a forma tridimensional. Esse modelo foi realizado no *Mathematica* e comparado com fotografias obtidas dos sacos plásticos submersos preenchidos com diferentes volumes de óleo. As equações paramétricas do modelo integral elíptico ilustrado na Figura 17a e são dadas por:

$$x = \left(\frac{T_0}{\tau}\right)^{1/2} \left\{ 2 \int_0^\varphi (1 - m \operatorname{sen}^2 \varphi)^{1/2} d\varphi - \int_0^\varphi \frac{d\varphi}{(1 - m \operatorname{sen}^2 \varphi)^{1/2}} \right\} \quad (48)$$

$$z = A^{1/2} \frac{m^{1/2} \cos \varphi}{(m - m^2)^{1/4}} \quad (49)$$

$$\frac{L}{A^{1/2}} = \frac{1}{(2m-1)(m-m^2)^{1/4}} \left\{ E\left(\frac{\pi}{2} \middle| m\right) - (1-m)F\left(\frac{\pi}{2} \middle| m\right) \right\} \quad (50)$$

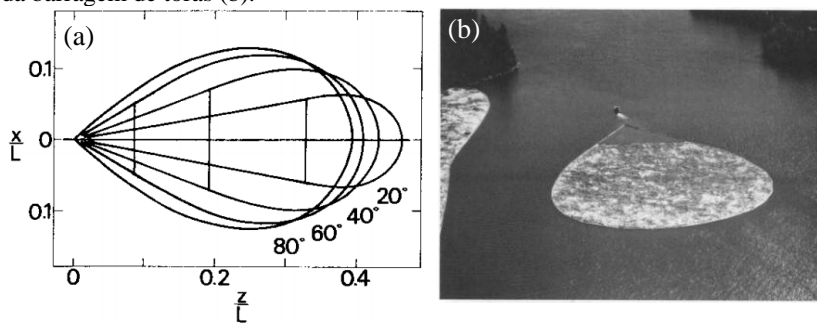
Onde x é o comprimento do perfil, T_0 é a tensão constante das madeiras do “cabo”, τ é a tensão de cisalhamento, $m = (1 + \operatorname{sen} \varphi)/2$ e os limites de m são $1/2 < m < 1$. O limite inferior se justifica pelo fato de que α , o ângulo entre o perfil e o eixo z na posição $z=0$, pode se aproximar, mas nunca alcançar o valor nulo e o superior devido ao fato de α ter valor máximo de 41° . O ângulo φ das integrais varia de $\pi/2$ a 0. A é a área total das toras, $E(\cdot)$ e $F(\cdot)$ são integrais elípticas de primeira e segunda espécie.

A é a área total delimitada pelo perfil elíptico e relacionada com o comprimento L perimétrico:

$$A = 4 \left(\frac{T_0}{\tau}\right) m^{1/2} (1 - m)^{1/2} \quad (51)$$

A Figura 17a a seguir ilustra o perfil da barragem comparando diferentes quantidades de toras sendo arrastadas, e a Figura 17b uma imagem aérea de um barco rebocador transportando uma barragem de toras.

Figura 17: Perfil da barragem com diferentes preenchimentos (a). Imagem aérea da barragem de toras (b).



Fonte: Irvine (1981).

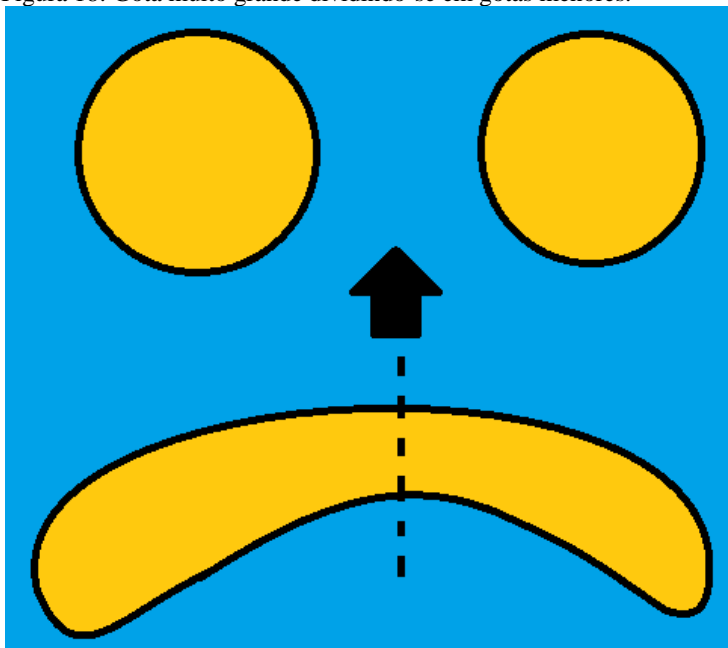
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ABERTURA E ENCHIMENTO DOS BALÕES

Cada enchimento de balão estudado apresentou um comportamento diferente devido ao material do qual são feitos e consequente flexibilidade.

Wörner (2003) afirmou, conforme citado na seção 2.1.4, que o formato do escoamento livre ascendente de uma gota pequena é esférico, a medida que essa gota aumenta de tamanho o seu formato passa a ser elipsoidal e forma uma calota, em gotas muito grandes, chegando a dividir-se em gotas menores quando a estabilidade da coalescência da gota diminui (Figura 18). Nas dimensões da indústria do petróleo, um balão com mais de 10,0 m de diâmetro, por exemplo, teria um grande volume de óleo coletado e poderia tender a formar uma “calota”. As forças atuantes para a divisão dessa “grande gota” em gotas menores poderia ser um grande problema para uma coleta eficiente.

Figura 18: Gota muito grande dividindo-se em gotas menores.



Fonte: Autor.

No detalhe destacado (flecha vermelha) da Figura 1 na seção 2.1.4, é possível observar uma comparação com os números adimensionais supracitados semelhantemente ao ilustrado na Figura 18 acima, onde ocorre a formação de uma calota em uma gota grande. Esse fenômeno ocorre devido à *Força de flutuação*, à *Força de tensão superficial*, à *Força de inércia*, à *Força viscosa*, às diferenças de densidade e viscosidade da fase contínua entre os dois fluidos e o fluxo bifásico líquido/líquido que está ocorrendo na ascensão da gota de óleo.

4.1.1 Balão flexível de látex

Os testes com o balão de látex indicaram que este não representou uma boa alternativa de captura de óleo porque a *Força de flutuação* do óleo não foi suficiente para desdobrar o balão, nem tampouco para inflá-lo. Com esse tipo de balão em grandes dimensões, talvez haja inflamento, mas com a bancada experimental utilizada, testes de tal grandeza não foram possíveis.

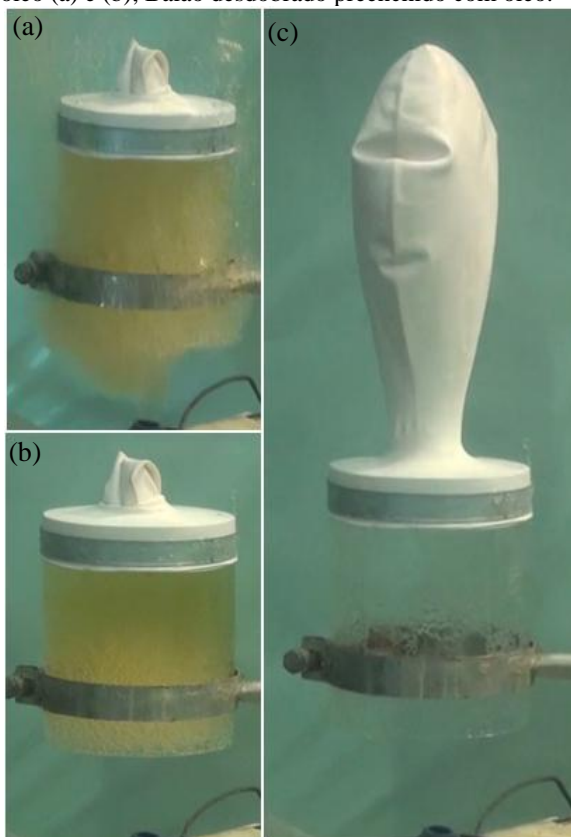
O balão de látex foi preso por uma abraçadeira metálica a um tubo de vidro de 10,0 cm de diâmetro e 15,0 cm de comprimento. Foi injetado óleo a uma vazão de 6,0 L/min, mesmo após o tubo de captura estar completamente cheio e transbordando (Figura 19a), o balão não abriu. Depois de cessada a injeção de óleo, foi aguardado cerca de 3 segundos e o balão permaneceu estático (Figura 19b), mesmo com uma pressão de 186,3 Pa no acúmulo de 15,0 cm no tubo de recepção.

A dobradura feita no balão foi a mesma descrita na Figura 14 na seção 3.3.1, respeitadas as limitações do látex e sua resistência à dobradura. A abertura do balão de látex foi feita manualmente, instantaneamente após o seu desdobramento, sendo preenchido com o óleo acumulado no tubo de recepção (Figura 19c).

Pode ser observado que a distância do ponto de injeção até o bocal de recepção do tubo de recepção foi cerca de 5,0 cm, evitando os transbordos laterais de óleo, o que foi repetido nos outros experimentos.

A espessura da parede do balão de látex é maior que a dos outros balões utilizados, consequentemente a sua resistência ao inflamento é muito alta em relação a *Força de flutuação* necessária para inflá-lo. Por ser um material flexível e expansível, seu volume depende da quantidade de material que o estiver preenchendo.

Figura 19: Enchimento do balão de látex. Tubo de recepção preenchido com óleo (a) e (b); Balão desdobrado preenchido com óleo.



Fonte: Autor.

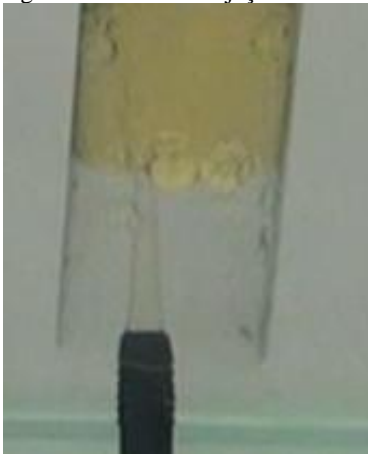
4.1.2 Balões flexíveis de plástico

Os experimentos com balões plásticos colocaram em evidência a geometria resultante do preenchimento com óleo, bem como permitiram o cálculo da pressão necessária ao desdobramento e abertura do dispositivo.

O objetivo nessa etapa da pesquisa foi observar o método de abertura dos balões. Por isso a distância do jato de injeção até o bocal de recepção de óleo foi selecionada de modo a oferecer coleta total do óleo injetado, desconsiderando os contra fluxos de água que pudessem impedir a entrada do óleo.

No primeiro experimento foi feito o acoplamento do balão de plástico n.º2, com um cilindro de acrílico com 7,0 cm de diâmetro por 18,0 cm de comprimento através de uma abraçadeira plástica. O volume de óleo injetado foi de 7,0 L. Pode-se ver na Figura 20 o ponto de injeção de óleo dentro do bocal de captura, impedindo que haja perda de óleo. A leve inclinação do bocal de captura é devida ao encaixe da garra com o suporte universal. Tal desajuste não interferiu nos experimentos, pois o bocal não era objeto de estudo nessa etapa e a *Força de flutuação* manteve o eixo simétrico do balão na direção vertical.

Figura 20: Ponto de injeção de óleo dentro do bocal de recepção.



Fonte: Autor.

O processo de enchimento do balão de plástico se deu com vazão variável. Devido a grande demanda de óleo, esta vazão aumentou à medida que o balão foi preenchido.

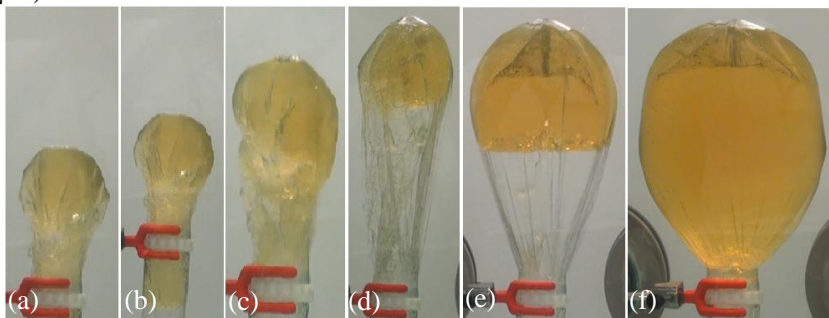
Inicialmente o balão estava dobrado junto ao tubo de recepção, conforme dobradura citada na seção 3.3.1, e logo que começou a injeção de óleo (Figura 21a), iniciou-se o processo de desdobraimento. Como o empuxo devido à pequena quantidade inicial de óleo não produzia força para desdobrar o balão, gerou-se um acúmulo de óleo (Figura 21b) no tubo até que a dobra fosse desfeita e o balão tomasse sua forma aberta. Uma pressão de 101,9 Pa (ZIENKIEWICZ *et al.*, 2005) foi necessária para desdobrar o balão com um acúmulo de 10,0 cm de coluna de óleo no tubo de recepção.

A Figura 21c capta o exato momento do desdobraimento do balão com a ascensão repentina do óleo acumulado no tubo de recepção. As

Figuras 21d, 21e e 21f mostram a sequência de enchimento do balão desde uma fase inicial até o balão ficar completamente cheio com o fim da injeção de óleo.

Na Figura 21f pode ser observado, que o balão toma a forma do saco com as paredes totalmente distendidas. Inicialmente especulou-se que o balão pudesse tomar a forma de calotas esféricas na parte ocupada pelo óleo até tornar-se esférico quando estivesse completamente cheio; mas o que se observou foram formas geométricas alongadas, que foram, “a posteriori”, adequadamente descritas por integrais elípticas. Ao final, constatou-se que a resistência do material utilizado e as forças internas atuantes perpendiculares às paredes do balão permitiram que o mesmo inflasse totalmente, praticamente sem deixar pregas e abandonando a geometria elíptica.

Figura 21: Etapas do enchimento do balão flexível de plástico (espessura 9,0 μm).



Fonte: Autor.

No topo do balão há uma pequena quantidade de ar que não pôde ser retirada no processo de dobradura, o que não interferiu nos resultados do experimento.

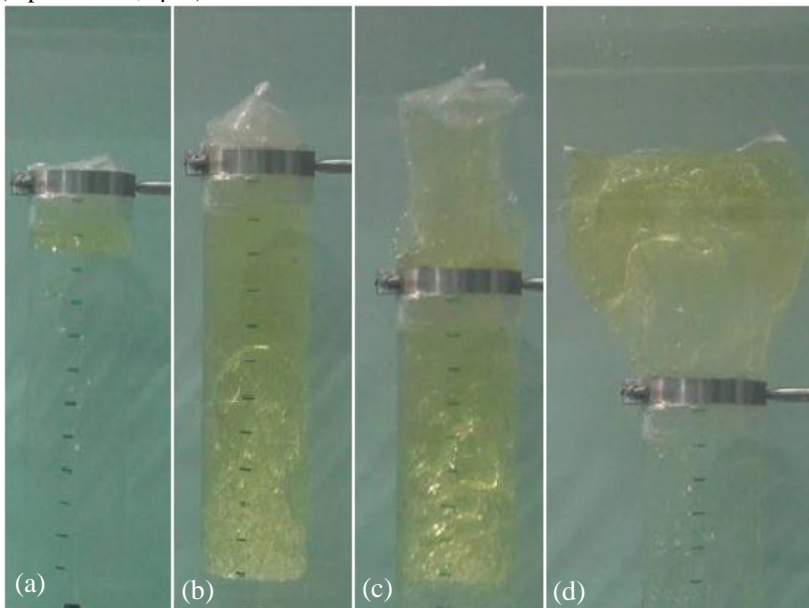
A movimentação deste balão dentro do aquário experimental foi muito delicada, reforçando o que um balão cheio óleo sendo movimentado dentro d'água requer cuidados extremos.

O balão de plástico n.º 3 (espessura: 31 μm) foi acoplado em um tubo de vidro de 10,0 cm de diâmetro por 35,0 cm de altura. O plástico utilizado para esse balão foi mais espesso e resistente que o do experimento anterior, oferecendo maior resistência ao desdobramento, por isso foi acoplado a um tubo de recepção de óleo maior.

Como pode ser observado na Figura 22a, o óleo passou por uma fase inicial de acumulação no bocal de recepção. Depois de pouco mais

de um minuto, a coluna de óleo acumulada atingiu a altura de cerca de 31,0 cm (Figura 22b), quando o empuxo foi suficiente para desdobrar e inflar o balão (Figura 22c). A ascensão do óleo acumulado no tubo de recepção foi imediata, o que proporcionou arraste concomitante de água (Figura 22d).

Figura 22: Etapas do enchimento do balão flexível de plástico com óleo de soja (espessura 31,0 μm).



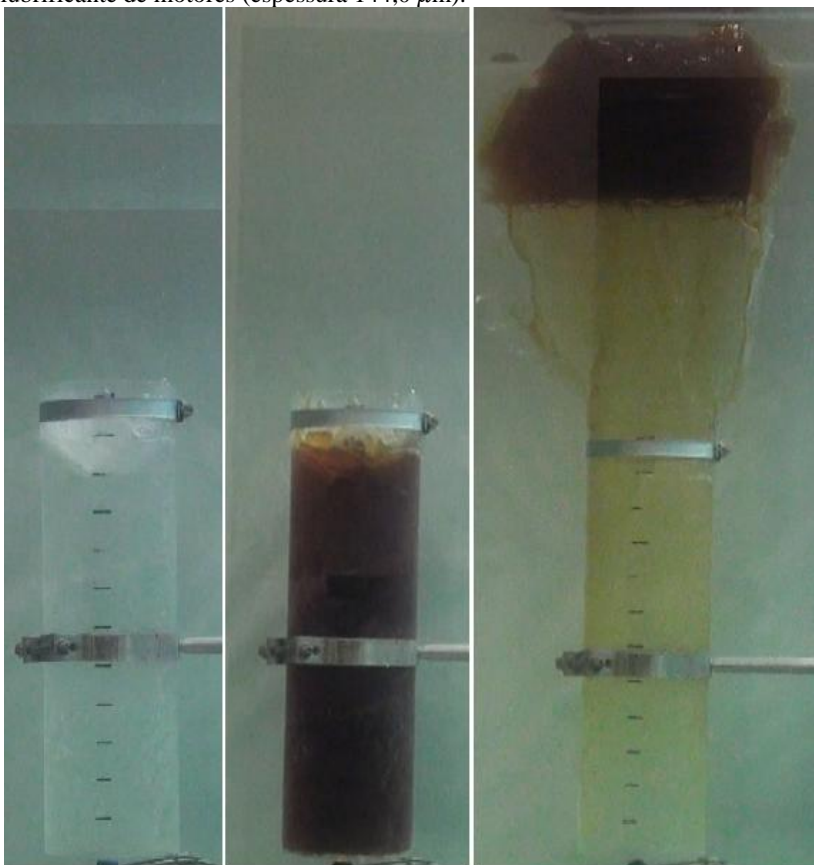
Fonte: Autor.

A pressão necessária para produzir o desdobramento desse balão foi estimada em 431,5 Pa considerando a coluna de óleo acumulada de 35,0 cm. No entanto, é bem provável que esse valor seja menor, pois, como pode ser observado na Figura 22b, quando começa o desdobramento, praticamente a metade inferior da coluna de óleo se encontra emulsionada com água, fazendo com que a densidade efetiva do óleo nessa região seja maior do que a densidade nominal do óleo. Na prática, o petróleo também costuma se apresentar emulsionado com água, sendo esse feito já esperado para as condições de operação em campo. Mesmo com essa pequena pressão exercida sob o saco no momento de sua abertura, chamou atenção a maneira abrupta como o óleo ascendeu para o interior do balão.

Esse balão ofereceu mais resistência ao desdobraimento que o balão de plástico n.º 2 por ser 3 vezes mais espesso.

O balão de plástico n.º 4 (espessura: 144 μm) foi acoplado no tubo de vidro e o experimento foi realizado com o óleo lubrificante de motores. O óleo passou por uma fase inicial de acumulação no bocal de recepção. Depois de 1 min 30 s, o balão não desdobrou e sua abertura foi auxiliada manualmente, mesmo assim levou 27 s para desdobrar. A Figura 23 abaixo mostra o enchimento do bocal e o desdobraimento do balão.

Figura 23: Etapas do enchimento do balão flexível de plástico com óleo lubrificante de motores (espessura 144,0 μm).



Fonte: Autor.

A lentidão no desdobraamento pode ser justificada devido às altas forças viscosas ($\mu=275$ mPa.s) do óleo lubrificante à temperatura utilizada ($\sim 22^\circ\text{C}$). A menor densidade do óleo lubrificante em relação ao óleo de soja resulta em uma maior pressão (608 Pa), indicando que o desdobraamento do balão fosse ocorrer mais rapidamente que o mesmo experimento com óleo de soja. Isto não aconteceu, pois o balão sequer desdobrou. O fato de ter sido utilizado um balão com maior espessura também contribuiu para o aumento da resistência desse balão ao desdobraamento, que foi quase 5 vezes mais espesso que o balão n.º 3.

O arraste de água foi menor que o mesmo experimento com óleo de soja devido à menor velocidade do desdobraamento. Não foi injetado mais óleo no experimento, pois o objeto de estudo foi a abertura do balão.

O óleo lubrificante se aproxima mais ao petróleo em relação às suas propriedades físicas, mesmo o petróleo sendo muito mais viscoso que este, e muito mais viscoso ainda que o óleo de soja. Percebe-se também que o cilindro ficou “sujo” de óleo, permanecendo uma camada de óleo aderida à superfície dos equipamentos. O óleo lubrificante não foi utilizado em mais experimentos devido ao grande volume de óleo necessário nos experimentos, dificuldade de limpeza e manutenção dos equipamentos.

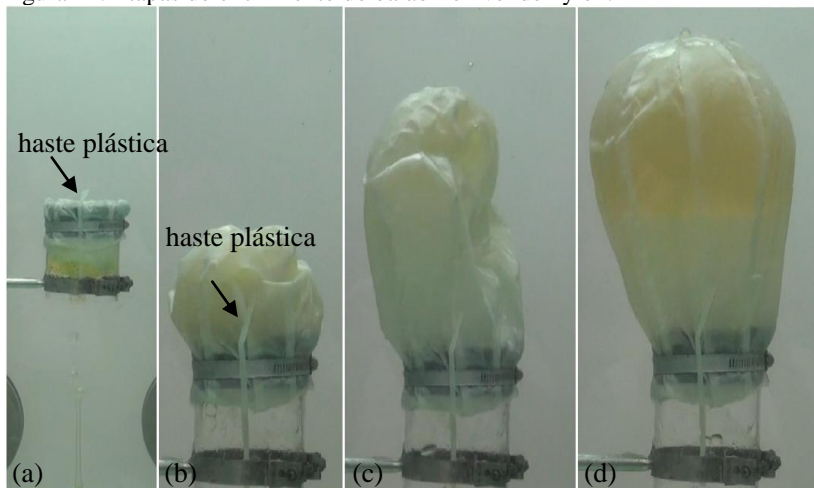
4.1.3 Balão flexível de nylon

Como material alternativo para a construção dos balões, empregou-se tecido de nylon em uma e duas camadas e com dimensões próximas aos de polietileno anteriormente testados. Os balões foram obtidos a partir da costura de gomos individuais e a camada dupla, quando existia, visava minimizar o vazamento de óleo pelos pequenos furos deixados pela costura. Nestes testes, ficou claro que o nylon oferece uma resistência muito menor ao desdobraamento, ao ponto de se terem utilizado hastes (Figuras 24a e 24b) de plástico rígido na extremidade superior do bocal de coleta para impedir a abertura prematura do balão.

A Figura 24 apresenta uma sucessão de quadros onde se pode observar a abertura e preenchimento desse tipo de balão. A forma dos gomos e do próprio balão procurou atender à geometria do preenchimento dos sacos de polietileno os quais, apesar de tomarem a forma de um balão, não foram construídos com base nesta forma. Durante os ensaios, o grau de vazamento de óleo através das costuras foi mínimo.

Após o início da injeção de óleo, houve um acúmulo inicial no bocal de captura antes do início da abertura, que foi suave e de ótima visualização. O bocal de captura utilizado era de vidro com 10,0 cm de diâmetro e 15,0 cm de altura. A pressão necessária para desdobrar o balão foi de 176,5 Pa.

Figura 24: Etapas do enchimento do balão flexível de nylon.



Fonte: Autor.

A estrutura costurada/colada demonstrou ser uma boa opção quando se trata de um sistema com grandes dimensões devido a sua facilidade de construção, manipulação e armazenamento.

O sistema de dobradura que foi feito no balão de nylon foi o mesmo dos outros balões flexíveis mas sua abertura foi mais fácil e suave.

A altura da coluna de óleo acumulada antes que o balão desdobre é essencial, pois a força de flutuação gerada será responsável pela abertura do dispositivo. Portanto, o adequado dimensionamento do bocal de recepção com diâmetro e altura capazes tanto de prevenir o transbordamento de óleo quanto permitir a ascensão estável do mesmo é de fundamental importância para o sucesso da operação. Adicionalmente, o posicionamento do bocal tão próximo quanto possível do chão, centrado no ponto de vazamento, poderia minimizar o arraste de água para dentro do balão e por consequência os efeitos de contra fluxo já referidos.

É importante lembrar que em situações operacionais de campo, a

súbita liberação de óleo se daria com alguma aceleração, podendo exigir estruturas reforçadas para fazer frente ao impacto da massa do óleo contra as paredes do balão. Esse efeito poderia ser reduzido com um sistema que controlasse o desdobraimento do balão, como uma estrutura articulada, por exemplo.

De um modo geral, o enchimento dos balões se deu em três etapas: acumulação, desdobraimento e enchimento. Na acumulação, o óleo fica retido no bocal de captura até que a força de flutuação seja suficiente para iniciar a etapa seguinte, em que ocorre o desdobraimento, quando o óleo acumulado abre o balão. Na última etapa, o óleo continua adentrando o balão até preenchê-lo segundo sua capacidade volumétrica.

A Tabela 2 a seguir mostra um resumo dos resultados obtidos com os experimentos com os diferentes tipos de balões testados:

Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos com os diferentes tipos de balões testados.

Balões	Abertura Natural	Pressão de abertura	Visualização interna
Látex (espessura 330,0 μm)	Não	-	Inexistente
Plástico (espessura 9,0 μm)	Sim	101,9 Pa	Ótima
Plástico (espessura 31,0 μm)	Sim	431,5 Pa	Ótima
Plástico (espessura 144,0 μm)	Não	-	Ótima
Nylon (espessura 85,0 μm)	Sim	176,5 Pa	Razoável

Fonte: Autor.

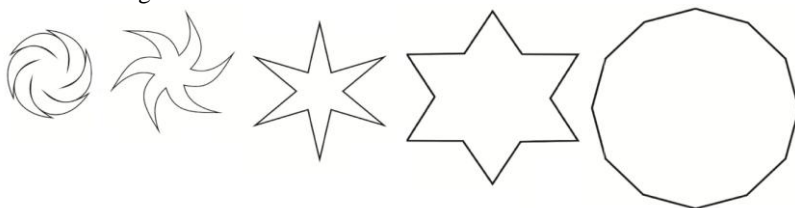
Para que não haja o vazamento do óleo do balão completamente cheio de óleo em situações práticas de campo, é imprescindível que seja instalado uma válvula de impedimento de refluxo no bocal de coleta.

Em futuras experimentações com maior escala, poderá ser estudado um sistema de dobradura aqui denominado de “carambola”, devido a semelhança com a fruta que leva esse nome, como mostra a Figura 38 na sequência. Para fazer esse tipo de geometria, seriam necessárias articulações no balão de nylon, o que não foi possível de fazer nessa escala experimental, como também um sistema que mantivesse o balão fechado até a sua abertura.

O balão teria seus “gomos” enrolados até que chegasse ao ponto de vazamento, onde, conforme o óleo fosse enchendo o balão, esse fosse inflando. O detalhe do enchimento é ilustrado na Figura 25 abaixo. Um fator interessante é que quando o balão está vazio de qualquer fluido, os

contra fluxos de água seriam minimizados durante o enchimento, pois o volume desta no interior do balão seria mínimo.

Figura 25: Vista superior das etapas do enchimento de balão flexível com dobradura em gomos enrolados.



Fonte: Autor.

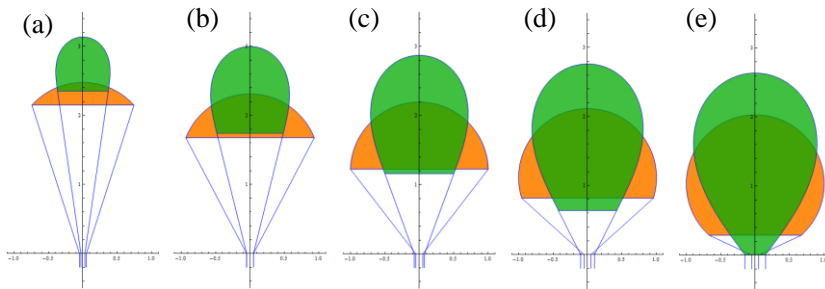
O fato de o balão estar “enrolado” facilita a sua descida até o fundo do mar, pois, com menos atrito com o deslocamento, o empuxo também será reduzido nessa etapa.

4.1.4 Modelagem do enchimento de balões flexíveis

Foram considerados dois modelos de enchimento: de geometria esférica e integral elíptico. No primeiro, o óleo que vai se acumulando ocupa sempre a forma de uma calota esférica na parte superior. O espaço entre o óleo e a extremidade superior do tubo de recepção é preenchido com água, e toma a forma de um tronco de cone, semelhante a um paraquedas aberto. No segundo, adota-se a forma integral elíptica derivada da análise de cabos estruturais quando submetidos a cargas distribuídas (IRVINE, 1981). As equações paramétricas do modelo integral elíptico são dadas pelas Equações 44, 45 e 46, na seção 3.5.2. As equações do modelo de geometria esférica são dadas pelas relações geométricas da esfera e do cone.

A Figura 26 a seguir ilustra o enchimento de um balão de 1,0m de raio no modelo esférico (alaranjado) comparado ao modelo elíptico (verde) para 0,3 m³ (a), 1,0 m³ (b), 2,0 m³ (c), 3,0 m³ (d) e 4,0 m³ de óleo (e).

Figura 26: Comparação do modelo integral elíptico com o modelo esférico.



Fonte: Autor.

A *Força de flutuação* em cada fase do enchimento é mostrada na Tabela 3 abaixo. São comparados os valores de densidade (ρ) do óleo lubrificante de motores (820 kg/m^3), óleo de soja (873 kg/m^3) e o do petróleo do Campo de Marlim Sul ($925,5 \text{ kg/m}^3$).

Tabela 3: Força de flutuação do balão de óleo modelado.

Volume (m³)	0,3	1,0	2,0	3,0	4,0
Força de flutuação petróleo (N)	219,2	730,6	1461,2	2191,8	2922,4
Força de Flutuação óleo de soja (N)	373,6	1245,4	2490,9	3736,3	4981,8
Força de Flutuação óleo lubrificante (N)	529,6	1765,2	3530,4	5295,6	7060,8

Fonte: Autor.

Devido as menores densidades (ρ) dos óleos de soja e lubrificante frente à do petróleo em questão, à *Força de flutuação* destes se torna consideravelmente maior, necessitando de uma força contrária (peso) de ascensão muito maior para impedir que o balão emerja em relação ao petróleo.

Pode-se perceber que os valores são sutis para o balão simulado com 1,0m de raio. Mas quando se trata de proporções reais para um balão de captura, como um de 10,0 m de diâmetro e capacidade de $4180,0 \text{ m}^3$, por exemplo, a *Força de flutuação* se torna gigante ($\sim 3.053.888,0 \text{ N}$), sendo necessária uma grande força contrária para manter esse balão gigante cheio de petróleo em regime submerso. Um sistema de ancoramento robusto necessitaria ser utilizado, bem como as paredes do material teriam que suportar as tensões atuantes. Para que

esse ancoramento não seja demasiadamente pesado, uma alternativa de transporte do óleo para a superfície é a sua drenagem por um duto a partir do topo do balão até um dispositivo de armazenamento na superfície.

O ângulo de abertura na região ocupada pela água é bem maior no caso do modelo esférico, o que acarreta a correspondentes esforços de tração mais intensos sobre o material em relação ao modelo elíptico. Outra diferença importante diz respeito ao volume de água presente no interior do balão durante o preenchimento com óleo, que é sempre muito maior no modelo esférico durante todo o enchimento (Tabela 4) (Figura 26).

Os volumes de água e óleo acumulados em cada fase do enchimento estão descritos na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Comparação dos volumes acumulados de água e óleo nos modelos esférico e elíptico.

	(a)		(b)		(c)		(d)		(e)	
	Esf.*	Elip.**	Esf.	Elip.	Esf.	Elip.	Esf.	Elip.	Esf.	Elip.
Vol. Óleo (m ³)	0,3		1		2		3		4	
Vol. Água (m ³)	1,32	0,39	1,6	0,52	1,3 5	0,42	0,8 2	0,2	0,1 5	0,01 5

*Esf.: referente ao modelo esférico; **Elip.: referente ao modelo elíptico.

Fonte: Autor.

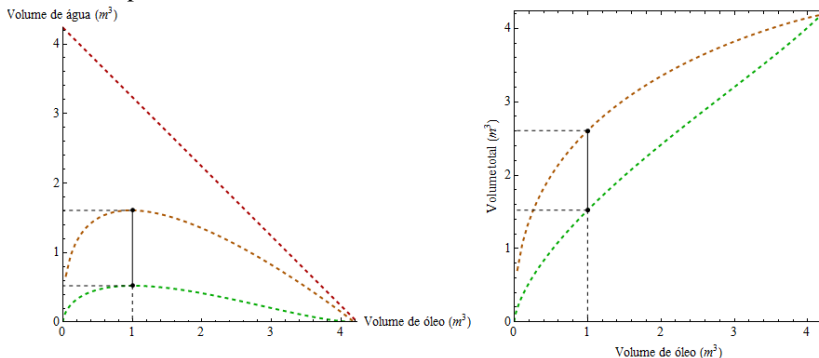
A Figura 27 mostra os volumes de água e óleo nos dois tipos de geometria durante o enchimento com óleo. É possível observar na marca de 1,0 m³, para ambos os tipos de geometria de balões, que há um máximo de volume de água acumulada, como também é possível perceber que próximo a 4,0 m³, o volume de água acumulada diminui e se equaliza em ambos os balões devido à ocupação do espaço pelo óleo.

O crescimento inicial do volume de água nos balões se dá pelo contra fluxo de água arrastado pelo fluxo de óleo. O volume de água diminui gradativamente com o enchimento do balão com óleo.

Percebe-se que o balão de geometria esférica tem maior volume de água acumulada durante todo o enchimento, equalizando-se com o balão de geometria elíptica apenas quando há o enchimento total de óleo. Essa maior capacidade de armazenamento de água durante o enchimento é desinteressante, pois haverá um contra fluxo de água mais intenso no bocal de recepção, podendo resultar na redução da taxa de

captura de óleo, turbulência no escoamento, e até um desvio do fluxo de captura de óleo para fora do bocal de captura.

Figura 27: Comparação dos volumes acumulados de água e óleo nos modelos esférico e elíptico.



Fonte: Autor.

Comparando os dados experimentais e os modelos estudados, o modelo elíptico parece ser mais representativo daquilo que se espera da forma geométrica “espontânea”, para um equipamento a ser construído de um material flexível destinado a operações em grandes profundidades em alto mar.

Estudos experimentais com essa geometria ainda são necessários para se alcançar conclusões mais precisas e dependem da disponibilidade de materiais adequados às solicitações de tensões de estiramento e pressão. Também é necessário que esse artefato possua elasticidade suficiente para permitir um enchimento do balão com a minimização de dobras e economia de área superficial das suas paredes. Em casos reais, o ideal seria que o balão fosse inflando à medida que fosse enchendo com óleo, reduzindo o arraste de água para o balão.

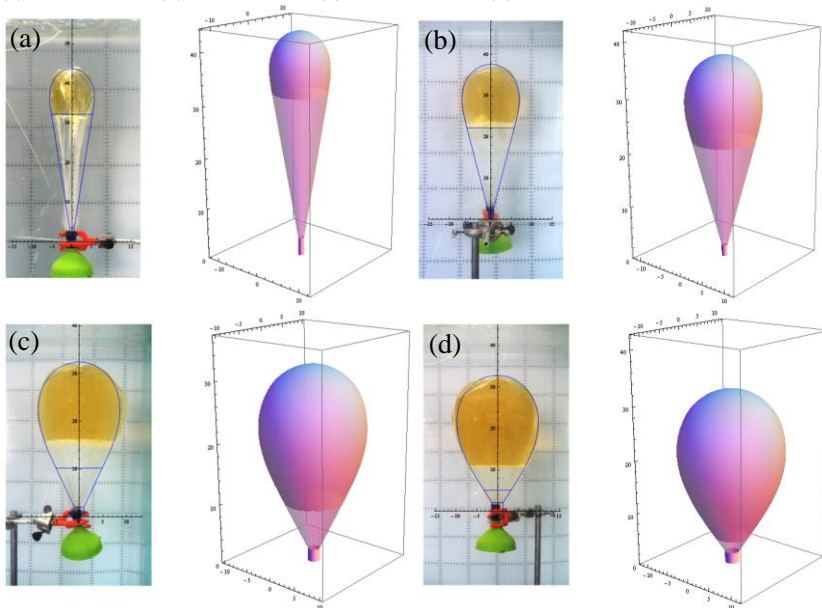
Com esse tipo de balão, os bocais de coleta podem ser minimizados no diâmetro, pois o contra fluxo de água será reduzido e terá menor influência sobre o escoamento de óleo, pois, como será mostrado no estudo dos perfis de velocidade de ascensão do jato, quanto maior a velocidade do jato de óleo que ascende pelo tubo, menor é o volume de água arrastada.

4.1.4.1 Ajuste do modelo elíptico aos perfis experimentais dos balões

As Figuras 28a, 28b, 28c e 28d ilustram o ajuste do modelo de

integrais elípticas aos perfis experimentais obtidos com balões plásticos submersos preenchidos com 900,0 mL, 1800,0 mL, 3600,0 mL e 5400 mL de óleo, respectivamente:

Figura 28: Modelo elíptico do enchimento balão flexível plástico com 900,0 mL (a), 1800,0 mL (b), 3600,0 mL (c) e 5400,0 mL (d).



Fonte: Autor.

Um aplicativo desenvolvido com o *Mathematica* permite ajustar manualmente o modelo elíptico do balão sobre as fotografias do experimento. Cada caso do perfil ajustado gerou um volume correspondente ao volume acumulado de óleo no experimento, permitindo ainda calcular a área das paredes do balão e a posição do nível de óleo. Os resultados foram bons para os volumes de 900,0 mL e 1800,0 mL.

Já para os volumes de 3600,0 mL e 5400 mL, o modelo prevê um nível de óleo no interior do balão (indicado pelo segmento de reta horizontal azul) inferior em altura ao observado experimentalmente. Nesses casos, apesar de os níveis de óleo não corresponderem aos experimentais, os volumes dados pelo modelo correspondem aos valores experimentais de óleo acumulado. Mesmo assim, os perfis experimentais desses casos continuam sendo bem representados pelo

modelo elíptico.

As diferenças entre o resultado experimental e o modelo podem ser justificadas ao se considerar que o saco plástico possui rugas, apresentando muitas dobras durante o enchimento, sendo um fator de distanciamento entre os experimentos e o modelo. Além disso, a simetria do balão durante o seu preenchimento não fica garantida.

Vale lembrar que o modelo elíptico é válido até o limite de preenchimento quando o ângulo entre a parede e a linha vertical que passa pelo centro balão atinge o ângulo de 41° (Figura 17a); além desse ângulo a curva cruzará o eixo z acima da origem impossibilitando a representação do balão (IRVINE, 1981).

4.2 SIMULAÇÃO DA LIBERAÇÃO DO ÓLEO ACUMULADO NO BOCAL DE COLETA

Nos momentos que antecedem o desdobramento e entrada de óleo para o interior de um balão, uma quantidade de óleo é acumulada no tubo de recepção até que a força de flutuação atuante sobre o mesmo seja suficiente para vencer as resistências associadas ao desdobramento do plástico. A modelagem desse sistema foi concebida segundo um domínio axissimétrico com condições iniciais e de contorno apresentadas na Figura 29 e dimensões dadas em metros. As propriedades dos fluidos simulados são as mesmas do óleo e da água utilizados nos experimentos. Utilizam-se as equações de Navier-Stokes e da continuidade juntamente com o modelo *phase-field*.

A Tabela 5 a seguir mostra as condições operacionais utilizadas no *COMSOL*:

Tabela 5: Condições operacionais *COMSOL*.

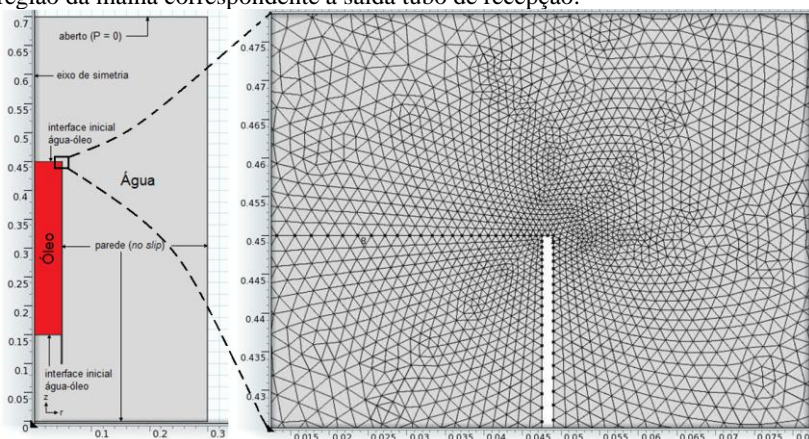
Condições operacionais <i>COMSOL</i>	
Parâmetro de controle de espessura interface (ϵ_{pf})	$tpf.hmax/4^*$
Parâmetro de ajuste de mobilidade (χ)	1,0 m.s/kg
Derivada ϕ da energia livre externa ($\partial f/\partial \phi$)	0,0 J/m ³
Pressão**	1 atm
Temperatura	20°C
Escoamento laminar para fluidos compressíveis	$Ma < 0,3^{***}$

* referente a um quarto do tamanho do maior elemento da malha; ** considerada na parte superior do domínio (saída); *** Número de Mach.

Fonte: Autor

O modelo é resolvido com o emprego de elementos finitos triangulares com polinômios interpoladores Lagrangeanos de primeira ordem. Ainda na Figura 29 é apresentado um detalhe da malha utilizada (da borda superior do tubo de recepção), composta de um total de 2496 elementos, apta a atender o compromisso entre precisão e tempo de cálculo (tipicamente tempo de máquina de 10 min para erros relativos máximos de 10^{-3}). Quando se testou uma malha mais refinada com 7860 elementos, o resultado obtido foi o mesmo, não sendo necessário um refinamento maior para este estudo.

Figura 29: Domínio de cálculo e condições do modelo com um detalhe de uma região da malha correspondente a saída tubo de recepção.

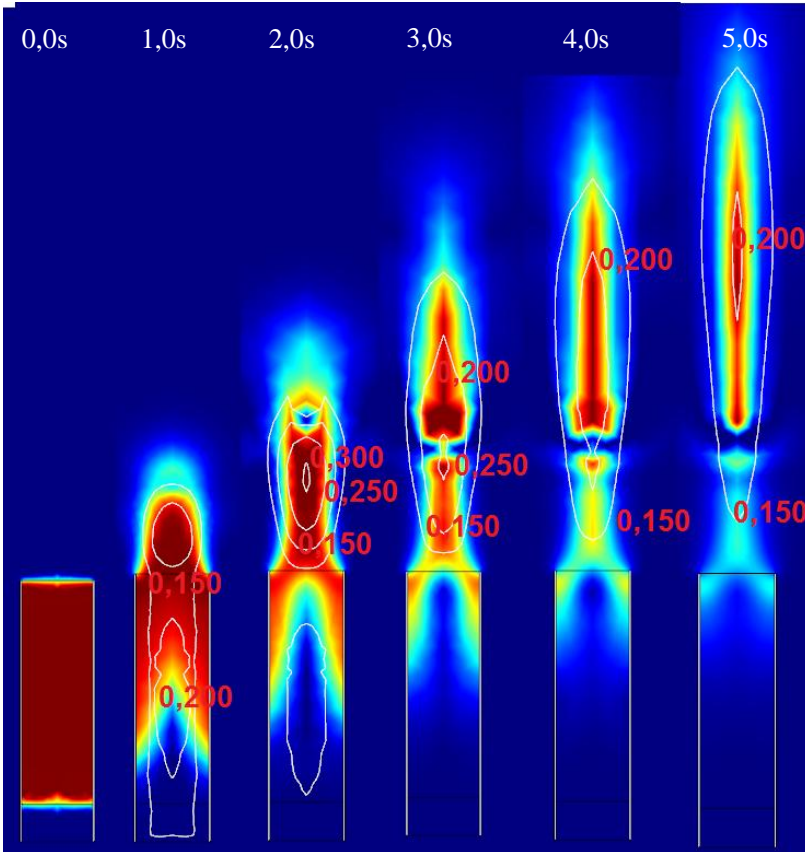


Fonte: Autor.

As Figuras 30 e 31 mostram resultados de duas simulações para a liberação de uma coluna de óleo com 30,0 cm de altura, no primeiro caso para um tubo de recepção de 10,0 cm de diâmetro e no segundo, 40,0 cm de diâmetro, ambos com 35,0 cm de altura. Em ambos os casos, inicialmente, é deixada uma altura de 5,0 cm a partir da extremidade inferior do tubo de recepção ocupada pela água.

O domínio de cálculo utilizado foi desenhado com 90,0 cm x 200,0 cm. O tempo de simulação em ambos os casos foi de 10 segundos.

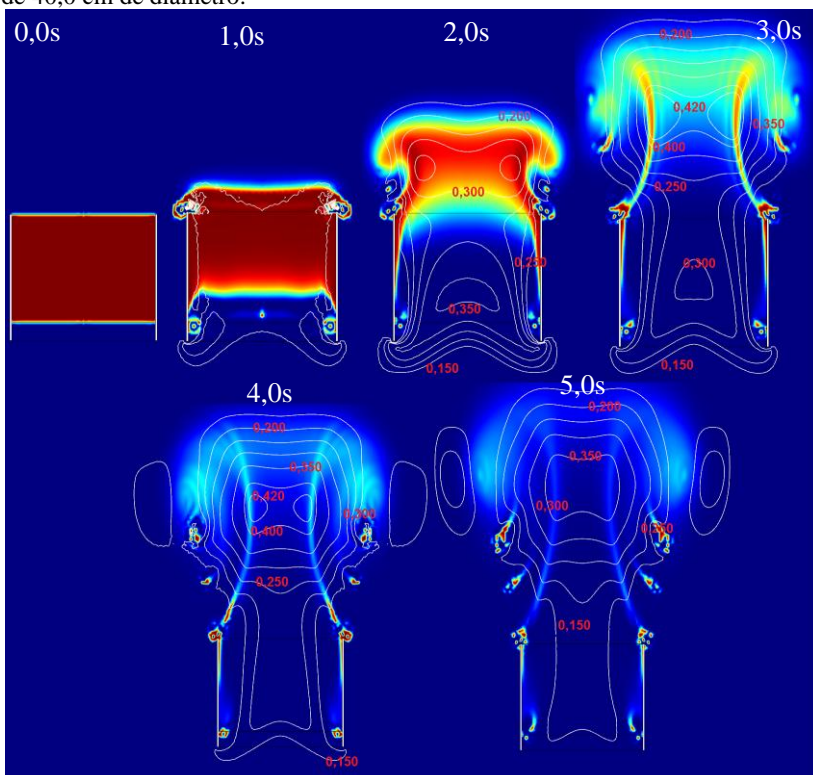
Figura 30: Lançamento de uma coluna de óleo em um tubo aberto de 10,0 cm de diâmetro.



Fonte: Autor.

Para o diâmetro de 10,0 cm, pode-se observar que o óleo escoava para fora do tubo avançando para cima segundo a forma de um cogumelo que se estende rapidamente. Já para o diâmetro de 40,0 cm, observa-se uma maior tendência de espalhamento lateral do óleo a partir da borda superior do tubo. Esse tipo de simulação permite antever a forma e a velocidade da massa de óleo preencheria naturalmente um balão acoplado ao tubo pronto a se abrir e inflar com a liberação do óleo.

Figura 31: Simulação do lançamento de uma coluna de óleo em um tubo aberto de 40,0 cm de diâmetro.



Fonte: Autor.

A partir do primeiro, cada quadro nas Figuras 30 e 31 representa 1 segundo de simulação. Observa-se maior integridade de forma da fase óleo após deixar o tubo de diâmetro de 10,0 cm do que no tubo com 40,0 cm. No tubo com diâmetro menor, até os 10 segundos de simulação, a fase óleo se encontra aglutinada em uma bolha, mesmo já estando distante do bocal. Já no tubo com diâmetro maior, aos 4 segundos de simulação, o óleo se encontra praticamente “misturado”, tendo havido um espalhamento promovido por vórtices laterais. É importante ressaltar que o modelo utilizado não é conservativo, por isto o efeito de mistura é amplificado ao nível da interface no *phase-field* do *COMSOL*, se refletindo nos resultados.

Observou-se também que a velocidade máxima de ascensão do óleo ocorreu para o diâmetro de 40,0 cm onde havia maior massa de

óleo no início. Para o tubo de 10,0 cm de diâmetro, obteve-se uma velocidade máxima de 0,3 m/s, e para o tubo de 40,0 cm chegou-se a 0,42 m/s. Esses resultados foram alcançados aos 3,3 segundos de simulação para o tubo com 40,0 cm de diâmetro e aos 2,0 segundos para o tubo com 10,0 cm de diâmetro.

A partir desses resultados prévios é possível conceber uma série de tipos de balões que poderiam ser utilizados: estruturados, com um exoesqueleto fixo que não permitisse o estiramento do material do balão; com estrutura compartimentada que fosse se abrindo à medida que o óleo adentrasse no balão; e vários outros tipos que não permitissem um impacto demasiado grande com as paredes do balão durante a ascensão repentina da coluna de óleo acumulada no bocal.

4.3 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DE UM JATO DE ÓLEO SUBMERSO ATRAVÉS DE UM TUBO

Baseado no estudo de Feller (2012), que realizou um balanço de massa no mesmo tipo de escoamento, foi realizado aqui um estudo dos perfis de velocidade.

Foram aqui analisadas as simulações realizadas no *COMSOL Multiphysics*[®] 4.3a e no *Wolfran Mathematica* v.8 para o mesmo caso de escoamento do jato de óleo por um tubo de recepção aberto, comparando o escoamento de ascensão do óleo com o enchimento de um balão em desdobramento que minimize os contra fluxos de água.

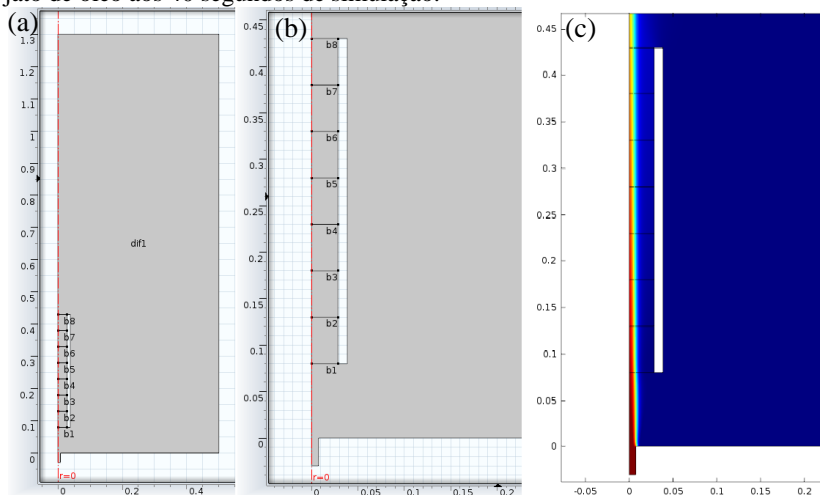
4.3.1 Simulação *COMSOL Multiphysics*[®] 4.3a

Procurou-se simular o escoamento laminar do óleo através de um tubo cilíndrico com 35,0 cm de altura, com diâmetros de 5,7 cm, 7,7 cm e 9,7 cm e velocidades de injeção de óleo de 0,35 m/s, 0,7 m/s e 1,05 m/s. Essas velocidades foram escolhidas através do trabalho de Feller (2012), que estudou a altura da ruptura de um jato de óleo submerso em diferentes a velocidade de injeção. Dessa forma foi possível prever um jato de óleo está ao passar pelos diferentes diâmetros de tubos do estudo.

O diâmetro do jato de injeção de óleo foi de 1,1 cm, o mesmo dos experimentos. Aqui foi estudado o comportamento do óleo ao passar pelo tubo de recepção em direção ao balão em processo de desdobramento. Simulou-se apenas o tubo de recepção, considerando que o balão, ao se desdobrar, não importaria qualquer resistência ao escoamento através do mesmo. A distância do ponto de injeção até a entrada do tubo foi de 8,0cm.

O domínio de estudo, considerado axissimétrico, apresenta 0,5 m de largura por 1,3 m de altura, conforme ilustrado na Figura 32 a seguir:

Figura 32: Domínio de cálculo (a); (b), e exemplo (c) de fração de volume de jato de óleo aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

As oito linhas onde foram calculados os perfis de velocidade são visualizadas Figura 32b, denominadas de b1 até b8.

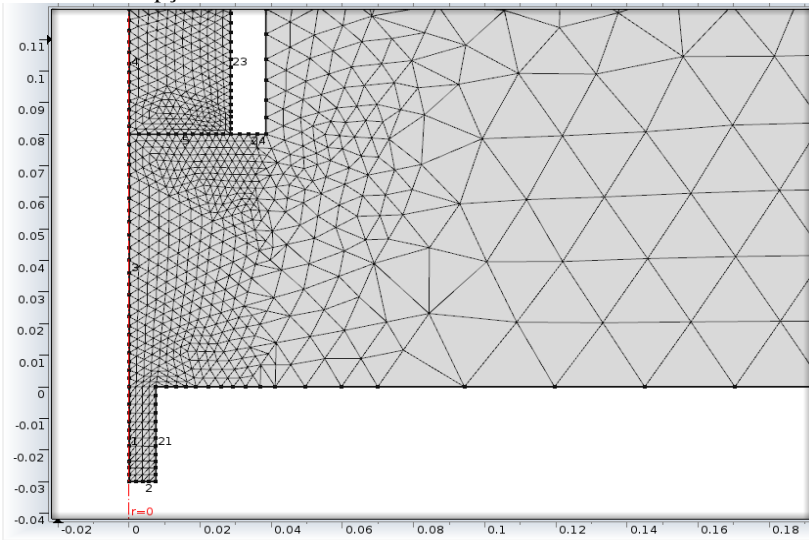
O modelo *phase-field* foi utilizado para simular o escoamento bifásico de água/óleo em regime transiente. As propriedades dos fluidos simulados são as mesmas do óleo e da água utilizados nos experimentos. A velocidade do escoamento tangencial nas paredes foi considerada nula pelo princípio da aderência, condição de contorno chamada *no slip* no *COMSOL*. Adicionalmente, um perfil hidrostático inicial de pressão foi adotado de forma a considerar o peso da coluna de água de 1,3m. O tempo total simulado foi de 40 segundos. Os valores das condições operacionais do *COMSOL* está detalhados na Tabela 5, na seção 4.2.

A malha utilizada foi refinada três vezes na região do escoamento para que houvesse maior precisão nos cálculos. Ao total foram utilizados 64421 elementos triangulares. Quando foi testada uma malha sem refinamento algum com 9719 elementos, não se obteve um bom resultado. Um refinamento com 12322 elementos mostrou escoamento característico, mas com péssima visualização. Um segundo refinamento,

com 23008 elementos apresentou as mesmas características da simulação com três refinamentos.

O *Pardiso solver*, com base em operações de substituição direta, foi escolhido para resolver o sistema de equações lineares resultantes da discretização de equações diferenciais. A Figura 33 ilustra a região refinada da malha do ponto de injeção até a entrada do tubo.

Figura 33: Região refinada da malha do ponto de injeção de óleo até a entrada do tubo de recepção.

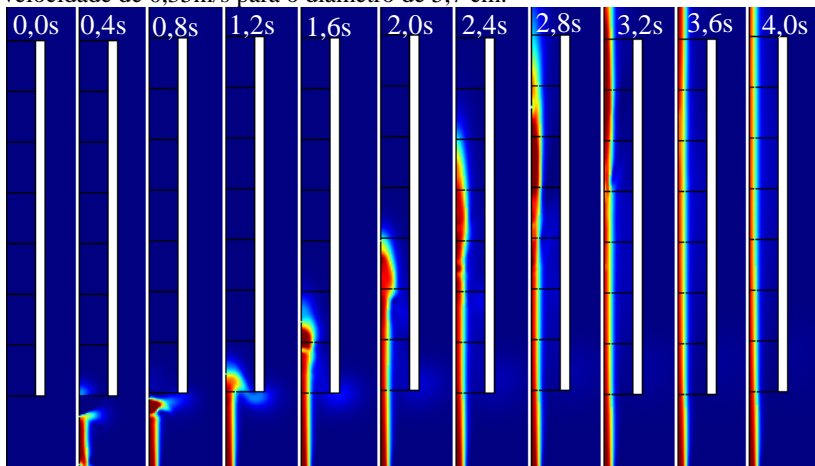


Fonte: Autor.

O modelo foi concebido em geometria 2D axissimétrica, levando a uma economia de tempo de simulação. Apesar de o estudo ter sido feito de 40 segundos, entre 4,0 e 6,4 segundos o regime de escoamento já era laminar.

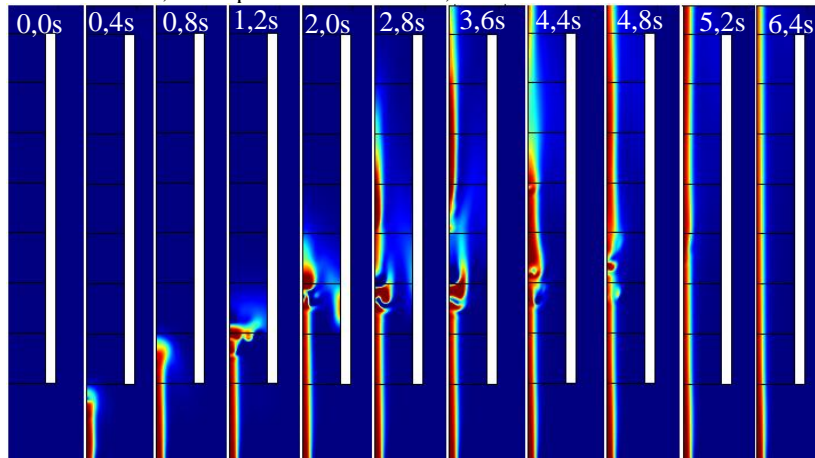
Constatou-se que quanto maior a velocidade de injeção de óleo, maior a espessura do jato. A região azul é correspondente à água, o óleo é vermelho e a interface na região de transição de cores. As Figuras 34 e 35 e 36 abaixo mostram a fração de volume do jato para a velocidade de injeção de 0,35 m/s em cada diâmetro estudado. Cada imagem das seqüências tem um intervalo de 0,4s.

Figura 34: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,35m/s para o diâmetro de 5,7 cm.



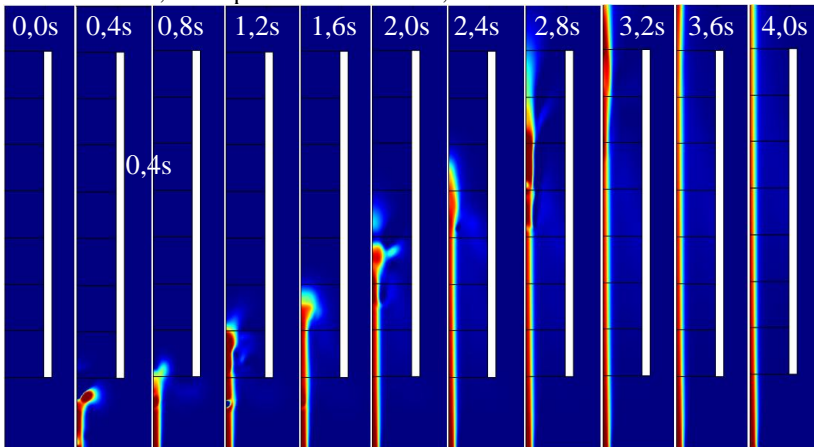
Fonte: Autor.

Figura 35: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,35m/s para o diâmetro de 7,7 cm.



Fonte: Autor.

Figura 36: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,35m/s para o diâmetro de 9,7 cm.



Fonte: Autor.

O escoamento estabilizou em regime laminar após 4,0s para os diâmetros de 5,7 e 9,7cm. Diferente de todos os outros estudos, no diâmetro de 7,7cm para a velocidade de 0,35 m/s, houve uma fragmentação espontânea do jato no início do escoamento no tempo de 1,2s. Uma explicação para esse evento dificilmente se encontra no diâmetro do tubo de 7,7 cm, pois como será visto a seguir, para o mesmo diâmetro em velocidades diferentes, isso não aconteceu.

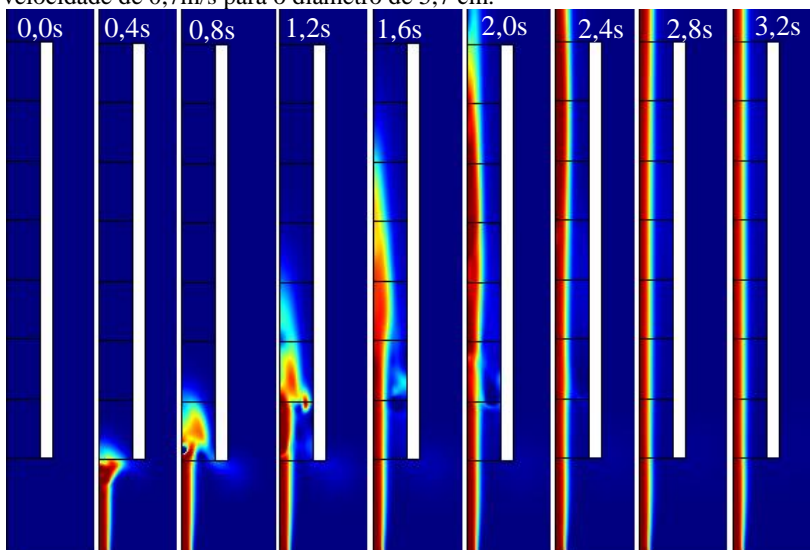
Devido à baixa velocidade de 0,35 m/s, com a redução do diâmetro do jato ao longo do escoamento, é possível que em algum determinado momento ocorra a quebra do jato em gotejamentos.

Percebe-se que a estabilização do escoamento se deu aos 6,4s para o diâmetro de 7,7 cm. Foram observadas “lacunas” de imagens havendo “saltos” nos intervalos de tempo, isso ocorreu devido ao movimento lento de ascensão da gota, gerando imagens muito semelhantes que foram retiradas da análise dos dados.

É possível observar no início do escoamento, para os três estudos, que a gota inicial que procede ao escoamento é diferente do escoamento no regime laminar estabelecido. Na penúltima imagem, para os três diâmetros ainda é possível observar remanescentes da gota oscilando e espessando o escoamento.

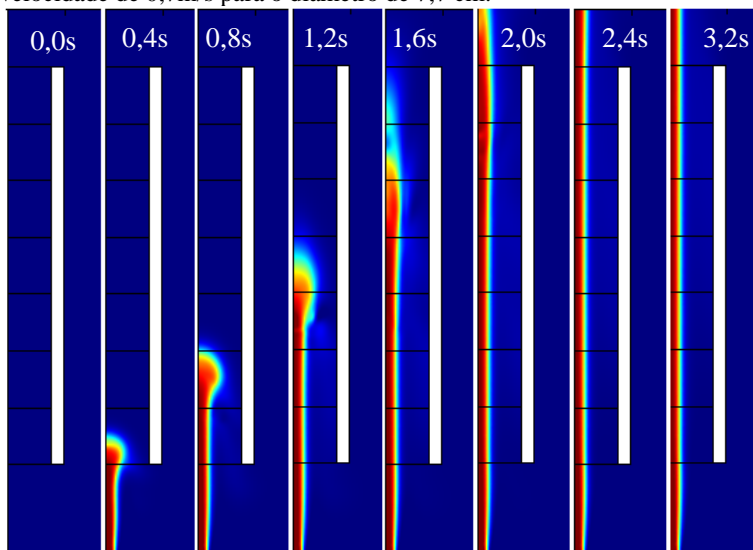
A sequência de Figuras 37, 38 e 39 a seguir ilustra a fração de volume do jato para a velocidade de injeção de 0,7 m/s em cada diâmetro estudado.

Figura 37: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,7m/s para o diâmetro de 5,7 cm.



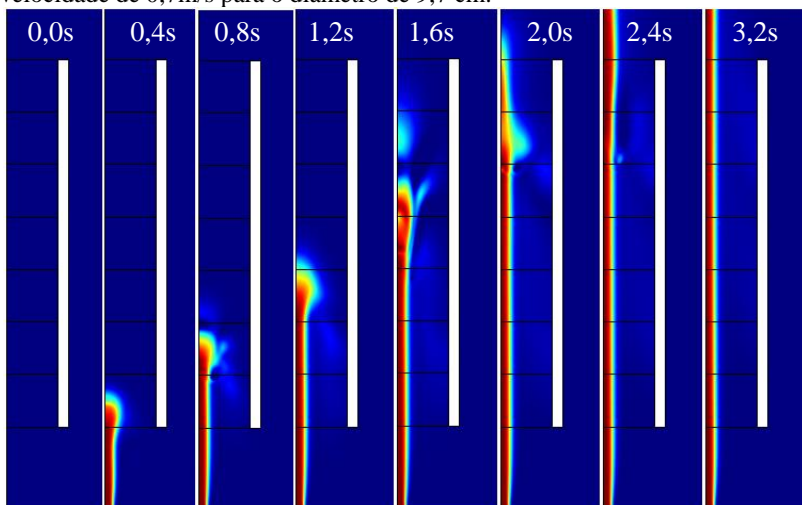
Fonte: Autor.

Figura 38: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,7m/s para o diâmetro de 7,7 cm.



Fonte: Autor.

Figura 39: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 0,7m/s para o diâmetro de 9,7 cm.



Fonte: Autor.

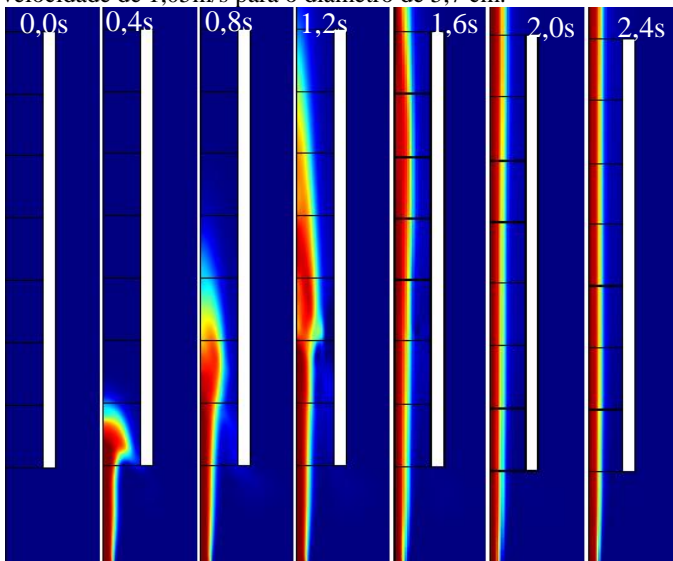
Percebe-se que aos 3,2 s para a velocidade de 0,7 m/s, independente do diâmetro estudado, já havia ocorrido a estabilização do escoamento laminar. Quanto mais velocidade se tem, mais rápido a ascensão do óleo ocorre, fazendo com que a estabilização do escoamento seja mais rápida.

Outro detalhe interessante para essa velocidade intermediária é que a espessura do jato foi ligeiramente maior que a velocidade de 0,35 m/s, justificada pelo aumento do volume de óleo injetado.

Para o diâmetro do tubo de 5,7cm (Figura 37) houve uma “tentativa” no início do escoamento de ruptura do jato, mas devido a velocidade do jato ser suficiente para não permitir o desprendimento da gota, isso não ocorreu como na velocidade de 0,35m/s, no tubo de 7,7 cm. Até mesmo no diâmetro do tubo de 9,7cm (Figura 31) houve um pequeno gotejamento, mas também sem ruptura do jato. Esse gotejamento pode ter ocorrido devido a instabilizações iniciais do escoamento.

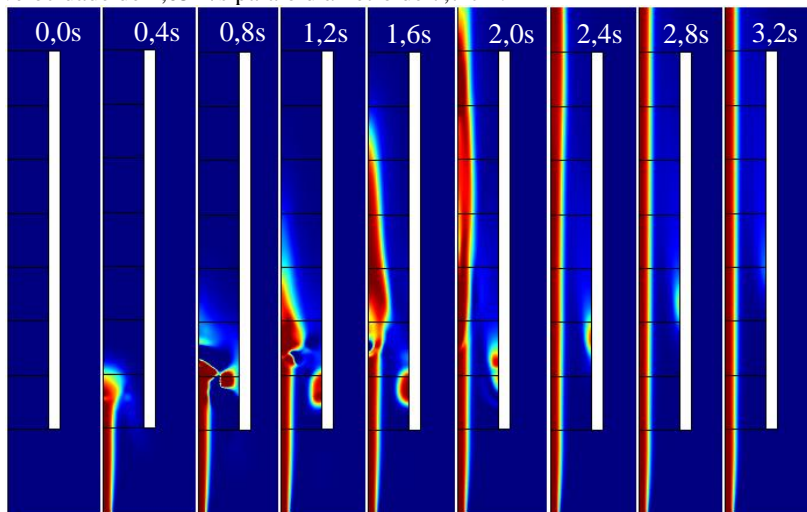
A sequência de Figuras 40, 41 e 42 a seguir ilustra a fração de volume do jato para a velocidade de injeção de 1,05 m/s em cada diâmetro estudado.

Figura 40: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 1,05m/s para o diâmetro de 5,7 cm.



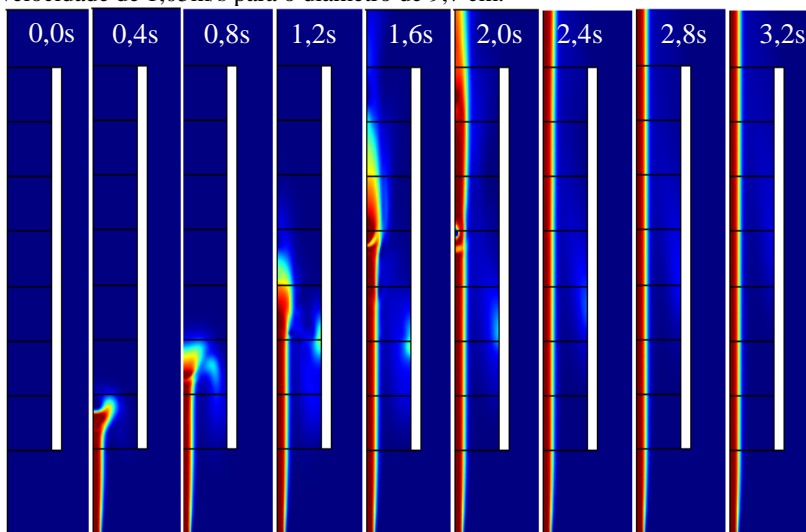
Fonte: Autor.

Figura 41: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 1,05m/s para o diâmetro de 7,7 cm.



Fonte: Autor.

Figura 42: Sequência do escoamento do início até o regime laminar na velocidade de 1,05m/s para o diâmetro de 9,7 cm.



Fonte: Autor.

Se para a velocidade do jato de 0,7 m/s em relação a de 0,35 m/s já houve um aumento significativo de espessura do jato, para a velocidade de 1,05 m/s o aumento foi ainda mais importante.

Aos 2,4 segundos de simulação, constata-se que o escoamento se estabilizou. Para o diâmetro de 7,7 cm (Figura 41), uma gota de óleo se desprende lateralmente aos 0,8s de simulação, não havendo rompimento do jato, mas um sutil “atraso” de 0,8 s para que houvesse estabilização do escoamento laminar em relação ao diâmetro de 5,7 cm.

Essa gota que “escapou” se prendeu a parede interna do tubo e “escorregou” de forma ascendente até se desprender e continuar subindo livremente. Esse tipo de escoamento também foi observado experimentalmente, embora na prática haja uma dificuldade dessa gota aderida a uma superfície, desprender-se desta, necessitando de uma pingadeira que possa gotejar, no caso dessa simulação, a borda do tubo.

Apesar das diferenças no início do escoamento para as diferentes velocidades, a estabilização do escoamento não ultrapassou 6,4 segundos em nenhum dos casos estudados, o escoamento se manteve laminar, e a partir de então é possível compreender os fenômenos e seus efeitos que ocorrerão no tubo de recepção de coleta em vazamentos.

Foram medidos os valores do diâmetro do jato de óleo na

entrada/saída do tubo para cada um dos diâmetros de tubo estudados e as respectivas velocidades de injeção de óleo aplicadas (Tabela 6).

Tabela 6: Diâmetro do jato de óleo ao longo do perfil dentro do tubo de recepção em cada velocidade de injeção e diâmetro do tubo na entrada e saída do tubo de recepção.

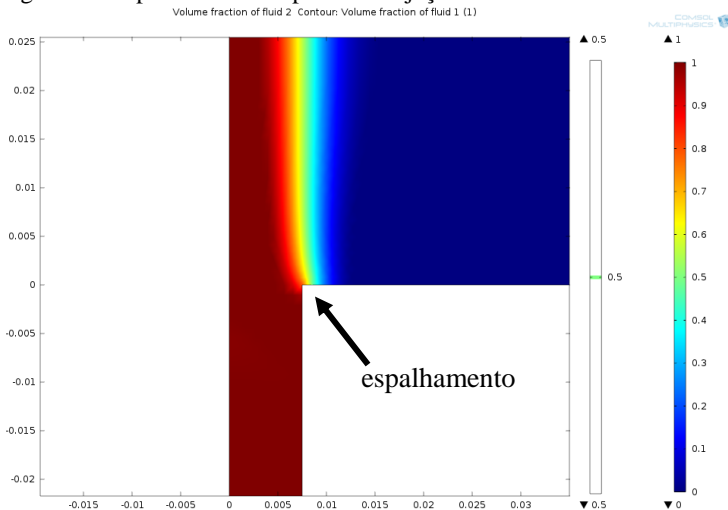
Velocidade \ diâmetro tubo	5,7 cm	7,7 cm	9,7 cm
0,35 m/s	1,42 / 0,9 cm	1,46 / 1,05 cm	1,46 / 0,88 cm
0,7 m/s	1,76 / 1,70 cm	1,79 / 1,69 cm	1,8 / 1,64 cm
1,05 m/s	1,90 / 2,02 cm	1,923 / 2,0 cm	1,94 / 1,95 cm

Fonte: Autor.

Para todos os diâmetros dos tubos, na velocidade de 0,35 m/s, devido à baixa vazão de óleo, ocorreu um “afinamento” do jato de óleo ao longo do perfil, indo de um diâmetro maior na entrada do tubo até outro diâmetro menor na saída. Isso é possível de visualizar na imagem da sequência das Figuras 34 e 36 aos 4,0 s, e na Figura 35 ao 6,4 s de simulação. Na velocidade de injeção de 0,7 m/s, o jato permanece praticamente com mesmo diâmetro enquanto passa pelo tubo, com pouca diferença entre a entrada e a saída do tubo. Já na velocidade de 1,05m/s, o diâmetro do jato aumenta ao longo do escoamento, de 1,9 cm na entrada até 2,0 cm na saída do tubo. Essas medidas apenas reafirmam que o aumento da vazão evidencia o aumento do diâmetro do jato.

A espessura do diâmetro do jato foi medida tomando-se como limite externo a parte mediana da interface água/óleo, como mostra a Figura 43.

Figura 43: Espalhamento no ponto de injeção de óleo.



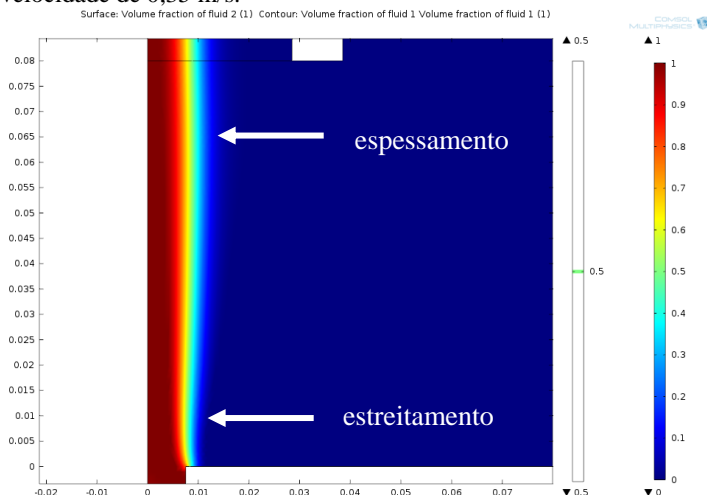
Fonte: Autor.

Um detalhe interessante a ressaltar é que, no momento que o jato é lançado do bico de injeção, ocorre um espalhamento do óleo lateralmente antes que se inicie o escoamento. Esse evento pode ser explicado pela *Força viscosa* existente entre o óleo e a parede do material em questão. O material não é definido no modelo, é apenas uma parede qualquer, mas experimentalmente, no bico de injeção de PVC (cloreto de polivinila), também ocorreu este espalhamento. A seta da Figura 39 acima mostra o ponto em que ocorre o espalhamento.

Outra observação interessante próxima do ponto de injeção de óleo é a formação de um ‘S’, logo após o estabelecimento do regime laminar. Primeiramente ocorre o espalhamento no ponto de injeção, como já foi mostrado, após isso, ocorre um “estreitamento” do jato, e na sequência um “espesamento” que se reduz gradativamente até atingir um diâmetro padrão. Isso ocorre antes que jato chegue até o tubo nas velocidades de 0,35 m/s e 0,7 m/s (Figura 44). Na velocidade de 1,05 m/s isso não ocorre, pois o jato aumenta de diâmetro logo após o espalhamento no bocal.

O espesamento também pode ser explicado pelo efeito do lançamento do jato, que penetra a água com uma bolha na forma semelhante a um cogumelo. As mesmas forças de arraste que dificultam a ascensão do jato de óleo ainda existem, mas como o regime laminar já se estabeleceu, não há mais o cogumelo/calota.

Figura 44: Escoamento de ‘S’ próximo ao ponto de injeção de óleo para a velocidade de 0,35 m/s.



Fonte: Autor.

4.3.1.1 Estudo dos perfis de velocidade no bocal de coleta

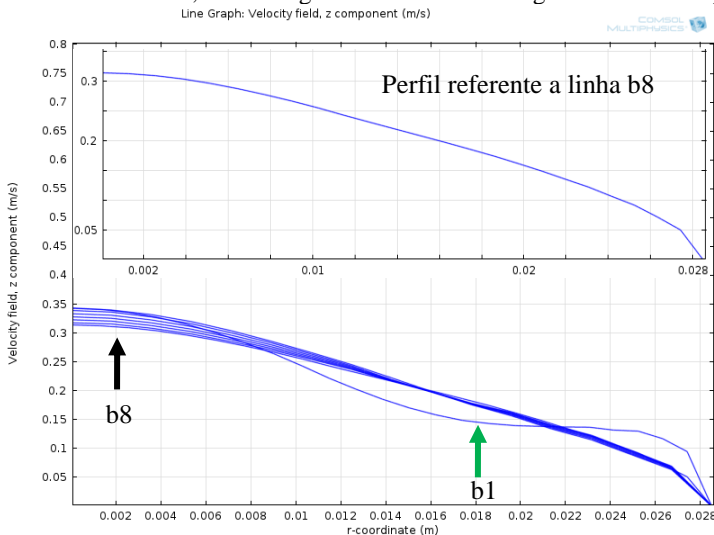
De cada uma das linhas (b1 até b8) foi extraído um perfil de velocidade para estudar possíveis alterações no escoamento ao longo do perfil após passados os segundos iniciais de estabilização do escoamento laminar (embora os perfis tenham sido extraídos do tempo de final de 40s).

As próximas três Figuras (45, 46, e 47) mostram os perfis de velocidade nas oito linhas na velocidade de 0,35 m/s para os três diâmetros dos tubos de recepção de óleo do estudo. O perfil está descrito da esquerda para a direita, do centro do escoamento de óleo até a parede interna do tubo (eixo axissimétrico).

A linha no detalhe na referida Figura corresponde à linha b8, onde se chegou ao perfil final de velocidade na saída do tubo. Constatou-se uma redução da velocidade da fase óleo ao longo do tubo. A última linha foi destacada para facilitar a sua visualização.

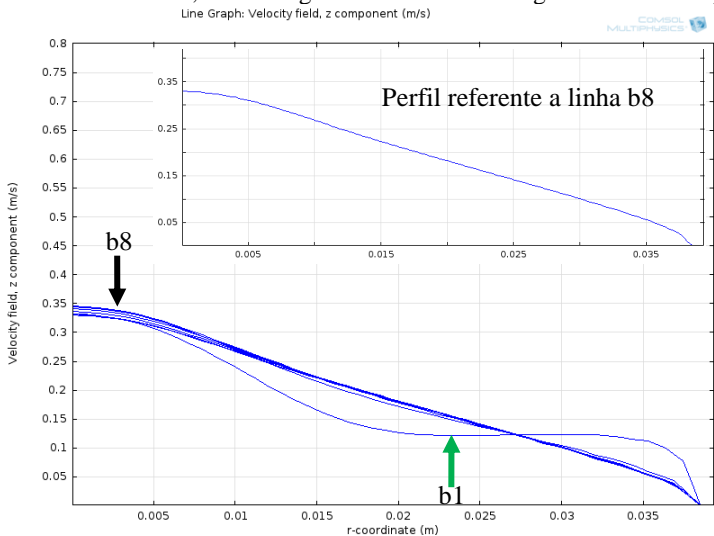
O *COMSOL Multiphysics*[®] 4.3a não aceita a extração de gráficos com diferentes cores para as linhas supracitadas, por isso é necessário que haja bastante cautela na interpretação, pois todas as linhas são azuis.

Figura 45: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,35m/s no tubo de diâmetro 5,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



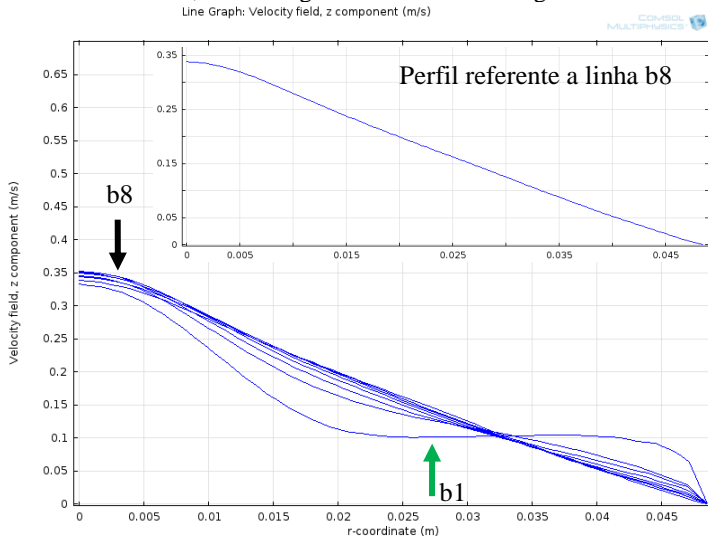
Fonte: Autor.

Figura 46: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,35m/s no tubo de diâmetro 7,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

Figura 47: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,35m/s no tubo de diâmetro 9,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

Na Figura 45, que representa o tubo com 5,7 cm de diâmetro, na linha b1 (entrada) ocorre uma perturbação, fazendo com que o perfil de velocidade inicial seja muito diferente do restante do escoamento. Quando o óleo chega ao tubo, ele sofre uma resistência ao escoamento, pois o fluxo de óleo necessita “empurrar” a coluna de água que está estática, justificando o perfil inicial onde, próximo à parede do tubo a água é rapidamente arrastada pelo fluxo de óleo. A seguir a velocidade do fluxo ascendente de água estabiliza, e cresce gradativamente até chegar próximo ao jato de óleo. A velocidade do jato de óleo chega a um pico máximo de 0,34 m/s, velocidade, pouco menor que a injetada. O comportamento do escoamento no tubo de 5,7 cm é diferente dos outros, pois o perfil de velocidade referente à linha b1 cruza as outras linhas e chega a um pico de velocidade maior que todos os outros perfis, podendo ser justificado pelo fato da *Força de flutuação* ser maior quanto maior é a profundidade.

É possível observar também que, para cada linha, obtêm-se um perfil de velocidade máximo no interior do jato diferente, isso ocorreu devido ao “afinamento” do jato ocasionado pela pequena quantidade de óleo que não mantém a espessura ao decorrer do escoamento. Apesar de semelhantes, os outros perfis que vão da linha b2 até b8 mantêm um

padrão, sendo diferenciados pela velocidade máxima no interior do jato de óleo. As *Forças de superfície* e *viscosas* que ocorrem na interface contribuem para redução da velocidade ao longo do perfil.

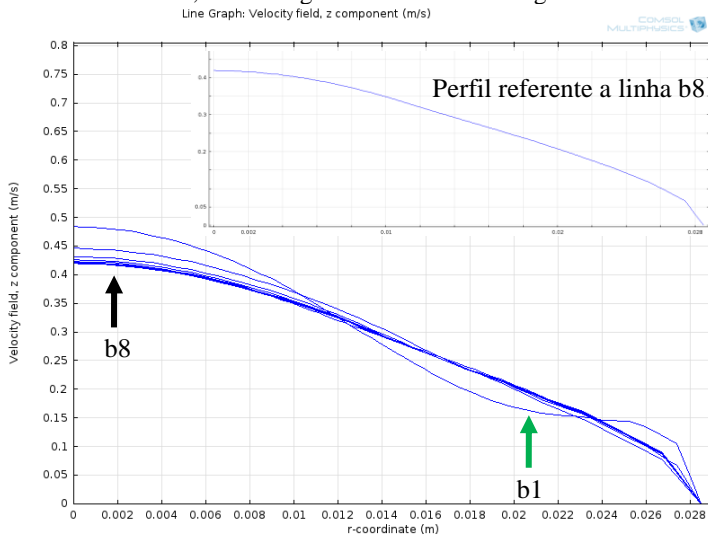
Para os diâmetros de tubo de 7,7 e 9,7cm houve uma diferença sutil para a linha b1 em relação ao diâmetro de 5,7cm: não houve cruzamento dos outros perfis. Isso pode ser devido ao fato de que nos diâmetros maiores, o raio de abrangência de arraste do jato de óleo atinja as paredes do tubo com menor intensidade. Mesmo após o regime laminar estar estabelecido, quando o jato chega a entrada do tubo, ele sofre uma resistência, devido as paredes do tubo limitarem o fluxo da água, que é “empurrada” pelo jato de óleo, disputando ambos os fluidos o espaço no interior do tubo.

Outro detalhe a ser observado é que para o diâmetro de 9,7cm, próximo a parede do tubo, o perfil de velocidade fica suavizado em relação aos anteriores, o que não ocorre com os outros diâmetros de tubo menores. Isso acontece da mesma forma para as outras velocidades (0,7 e 1,05m/s) nesse mesmo diâmetro de tubo, pois com o aumento do diâmetro, o fluxo ascendente do jato de óleo fica mais longe da parede interna do tubo e a velocidade do arraste de água tende a ser menor quanto mais se afasta do jato.

É importante ressaltar que as velocidades de escoamento ao longo do perfil do tubo ficaram entre e 0,30 e 0,35m/s, muito próximas a velocidade inicial de injeção.

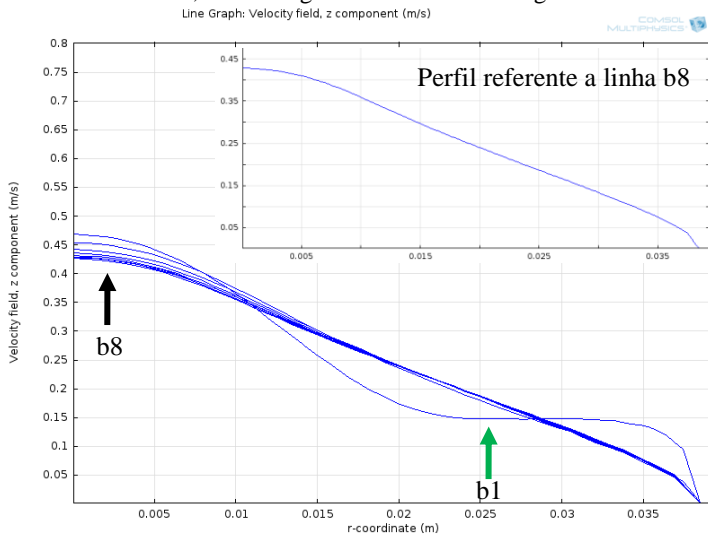
As próximas três Figuras (48, 49, e 50) a seguir mostram os perfis de velocidade nas 8 linhas na velocidade de 0,7 m/s para todos os diâmetros dos tubo de recepção de óleo do estudo.

Figura 48: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,7 m/s no tubo de diâmetro 5,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



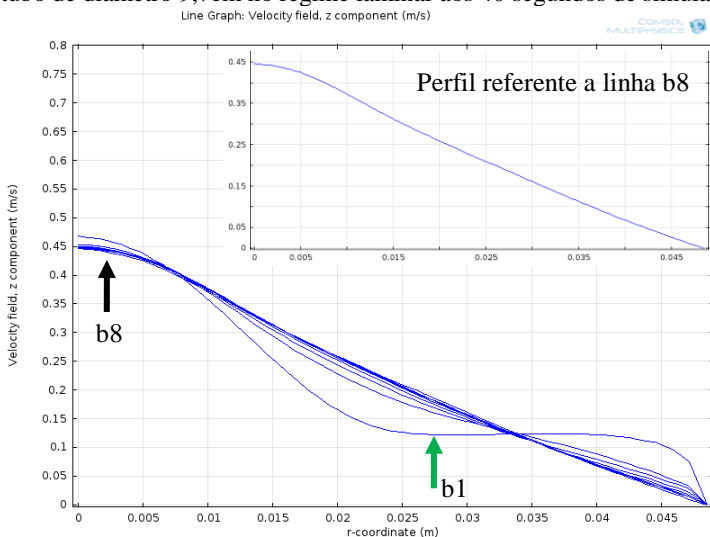
Fonte: Autor.

Figura 49: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,7 m/s no tubo de diâmetro 7,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

Figura 50: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 0,7 m/s no tubo de diâmetro 9,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

O perfil de velocidade correspondente à linha b1 para esses três casos acima teve o comportamento padrão observado até então, ou seja, muito diferente dos outros perfis ao longo do tubo, o que já foi discutido anteriormente. Há um cruzamento pelo perfil da linha b1 através dos outros perfis em todos os três diâmetros de tubo para essa velocidade (0,7 m/s). Diferente do observado nas Figuras 46 e 47, onde a velocidade no centro do jato foi menor da linha b1 que os outros perfis na velocidade de 0,35 m/s, para as velocidades de 0,7 e 1,05 m/s isso não aconteceu, devido à vazão de óleo ser suficiente a ponto de não permitir que o jato diminua de diâmetro na amplitude estudada, e consequentemente não tenha a velocidade menor na entrada do que na saída do tubo.

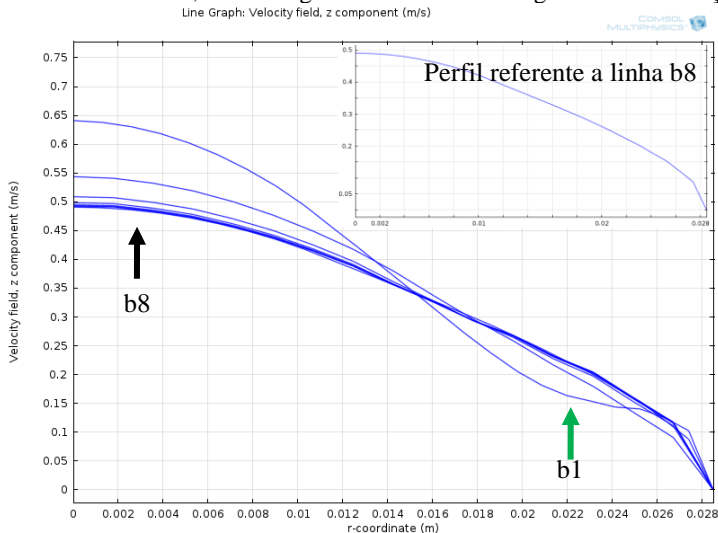
Também nessa velocidade pôde-se observar a suavização do perfil próximo a parede do tubo de diâmetro de 9,7cm, comprovando o fator de que quanto maior o afastamento do jato das paredes internas do tubo, menor é a sua interferência no arraste da água.

Pelos mesmos fatores de arraste, pode-se observar que quanto maior é o afastamento do jato de óleo das paredes internas do tubo, para uma mesma velocidade de injeção, maior é a velocidade final observada. Ainda que para o caso em que a velocidade de injeção de foi de 0,7m/s,

a velocidade máxima observada no interior do jato foi entre 0,45 e 0,5m/s. Isso indica que as forças de arraste são maiores quanto maiores são as velocidades envolvidas. Também uma parcela é dependente da tensão interfacial água/óleo, que pode vir a reduzir a força motriz que estabelece o fluxo de óleo, inicialmente considerada como gradiente de pressão e *Força de flutuação*. É necessário considerar um valor de viscosidade média (μ_m) na interface devido a uma fina camada de mistura que garantirá a continuidade dos perfis de velocidade.

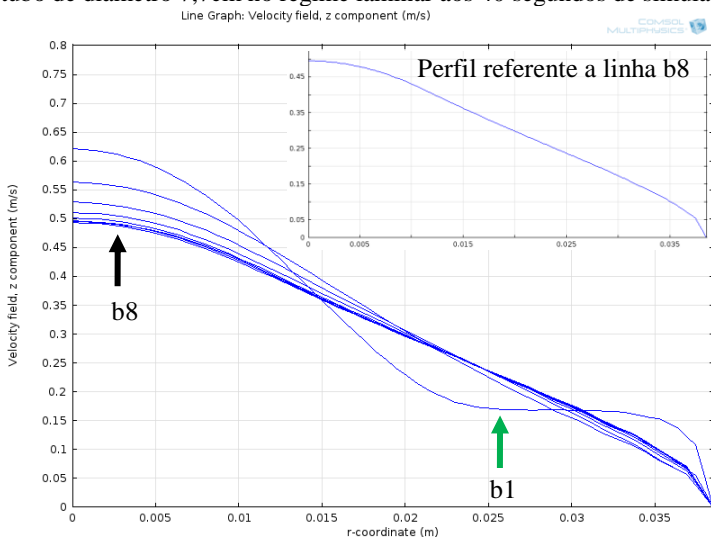
As próximas três Figuras (51, 52, e 53) a seguir mostram os perfis de velocidade nas 8 linhas na velocidade de 1,05 m/s para todos os diâmetros dos tubo de recepção de óleo do estudo.

Figura 51: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 1,05m/s no tubo de diâmetro 5,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



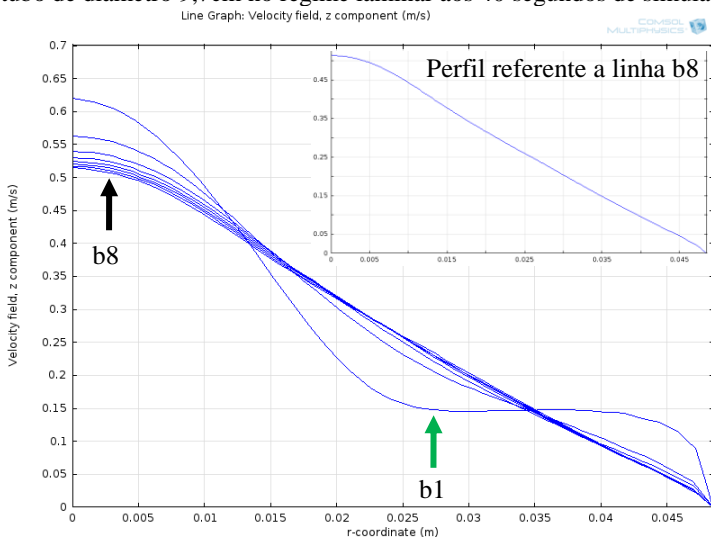
Fonte: Autor.

Figura 52: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 1,05m/s no tubo de diâmetro 7,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

Figura 53: Perfis de velocidade nas 8 linhas para a velocidade de 1,05m/s no tubo de diâmetro 9,7cm no regime laminar aos 40 segundos de simulação.



Fonte: Autor.

Para a velocidade de 1,05m/s pôde-se observar que, quanto menor o diâmetro do tubo, mais próximos ficaram os perfis de velocidade na região junto as paredes internas do tubo. Na Figura 51, para o tubo de diâmetro de 5,7 cm é notável que praticamente não há diferenças no escoamento nessa região, onde o perfil de velocidade na linha b1 se confunde com os demais.

A medida que o jato se distancia das paredes internas do tubo, nos diâmetros maiores, percebe-se que esse efeito inicial diminui, com um perfil bem diferenciado para a linha b1 em relação as outras linhas para o diâmetro de 7,7cm, como vinha se observando até então (Figura 52). E um escoamento muito mais suavizado a partir da linha b2 para o diâmetro de 9,7cm (Figura 53). O perfil de velocidades na entrada do tubo (linha b1) mostra o efeito de parede sobre o escoamento bifásico ao penetrar na região cilíndrica. Esse perfil mostra velocidades baixas na região mais próxima da parede, constituída integralmente pela fase água, evoluindo a partir de um raio médio até um pico máximo de no eixo de simetria.

O cruzamento do perfil de velocidade da linha b1 fica muito evidente para essa velocidade em todos os diâmetros de tubo do estudo, mostrando que a força inicial de escoamento é muito forte, fazendo com que haja uma perturbação do sistema muito importante na entrada do tubo.

Mesmo para o maior diâmetro de tubo considerado (9,7 cm), constatou-se um forte efeito de arraste da coluna ascendente de óleo sobre toda a extensão da fase água dentro e fora do tubo. A velocidade máxima atingida pelo óleo no eixo de simetria não ultrapassou a velocidade injetada, evidenciando o efeito de arraste sobre o óleo exercido pelas forças de cisalhamento e de forma (*drag forces*). Quanto maior a velocidade de um escoamento imiscível, maior é o coeficiente de atrito entre as fases, fazendo com que o arraste seja maior, podendo o escoamento gerar emulsões com comportamento Newtoniano quando o número de Reynolds ultrapassa 2000 (ROSSI and MORALES, 2004).

Em todos os estudos houve uma tendência de formação de um mesmo perfil de velocidade, independente das diferenças de diâmetro de tubo e velocidade de injeção. As principais diferenças observadas estão na velocidade de ascensão do jato no meio aquoso, que é maior, quanto maior é a velocidade de injeção do óleo.

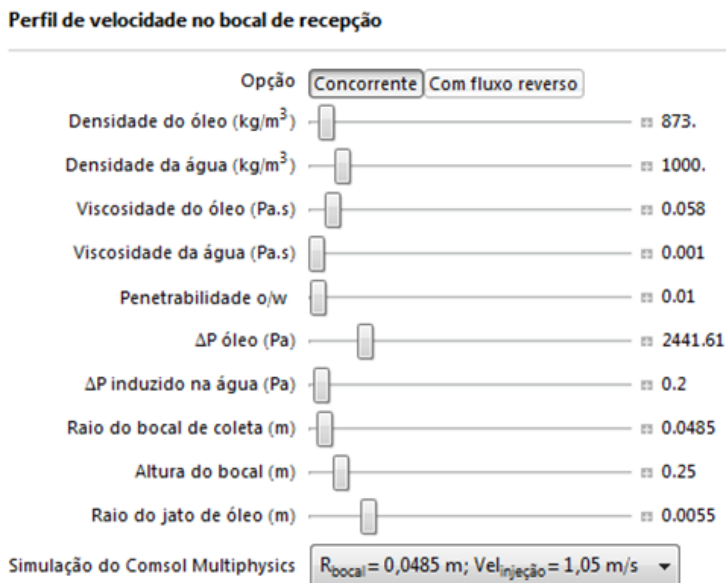
4.3.2 Simulação no Wolfram Mathematica 8

O modelo de escoamento simplificado para a coluna de óleo ascendente foi implementado no *Wolfram Mathematica v.8* e ajustado aos resultados obtidos com as simulações realizadas no *COMSOL*. Os perfis de velocidade foram ajustados segundo a regressão dos valores do parâmetro penetrabilidade (k_{ow}) e do gradiente de pressão $-\Delta P_{wi}/H$. A penetrabilidade engloba os efeitos de arraste sobre o óleo e forças de tensão interfacial de forma a incluir aspectos fenomenológicos inerentes ao problema. Com base nas simulações realizadas no *COMSOL*, um valor médio aceitável para k_{ow} , na ausência de contra fluxo, seria $2,75 \times 10^{-2}$, mas sujeito a variações segundo as dimensões geométricas envolvidas e a intensidade do jato de óleo. Em todos os casos estudados o $-\Delta P_{wi}/H$ ficou abaixo de 2 Pa/m. Ainda é necessário considerar um valor de fechamento para viscosidade média (μ_m) na interface água/óleo, justificada por um certo grau de mistura, que garantirá a continuidade do perfil de velocidades nesta posição.

Os demais parâmetros envolvendo os valores das densidades e viscosidades dos fluidos, o gradiente médio de pressão ao longo da coluna de óleo, os valores de raio e altura do bocal e raio médio da coluna de óleo para cada diâmetro e velocidade estudados foram todos tomados tal e qual utilizados nas simulações com o *COMSOL*. Algumas diferenças foram evidenciadas, principalmente pelo modelo do *Mathematica* ser muito simples e não levar em consideração muitos detalhes que o *COMSOL* leva, como os efeitos de borda e o controle da espessura da interface.

A Figura 54 mostra a janela de comandos com os valores ajustados no *Mathematica* que possibilita ajustar o perfil de velocidade obtido com o gerado no *COMSOL*. Foram consideradas as densidades e viscosidades dos fluidos, a penetrabilidade do óleo na água, a diferença de pressão ao longo do jato de óleo e da coluna de água, os valores de raio e altura do bocal, raio do jato e com qual modelo do *COMSOL* se está comparando. No exemplo abaixo, é mostrado o bocal de 5,7cm de diâmetro e velocidade de 0,35m/s. A penetrabilidade é o único comando manipulável que influenciaram diretamente na curva de velocidade.

Figura 54: Janela de comandos de ajuste do perfil de velocidade da ascensão do jato de óleo.



Fonte: Autor.

Foi medida a variação de pressão no jato de óleo da linha b2 até b7 (Figura 55) para que fossem eliminados os efeitos de borda que não existem no *Mathematica*, ficando a altura do bocal de 25,0 cm nesse modelo. Os valores de gradientes médios de pressão dinâmica obtidos do *COMSOL* e inseridos no modelo simplificado ficaram em torno de 5160 Pa/m, sendo que a parcela de gradiente de pressão estática referente à diferença de densidades entre a água e o óleo foi de 4616 Pa/m.

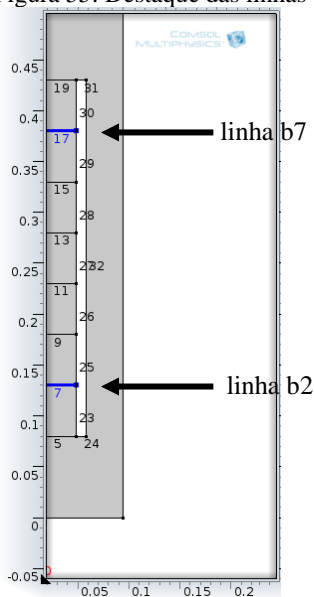
A Tabela 7 a seguir mostra a diferença de pressão total (pressão dinâmica + pressão estática) extraídos do *COMSOL* ao longo do tubo para cada velocidade de injeção de óleo e diâmetros de tubo de recepção estudados.

Tabela 7: Diferença de pressão (Pa) ao longo do tubo para cada velocidade e diâmetro estudados.

Diâmetro do tubo (cm)	5,7	7,7	9,7
Velocidade (m/s)	Pressão (Pa)		
0,35	2443,0	2442,0	2444,5
0,7	2444,0	2438,0	2441,5
1,05	2451,5	2433,5	2436,5

Fonte: Autor.

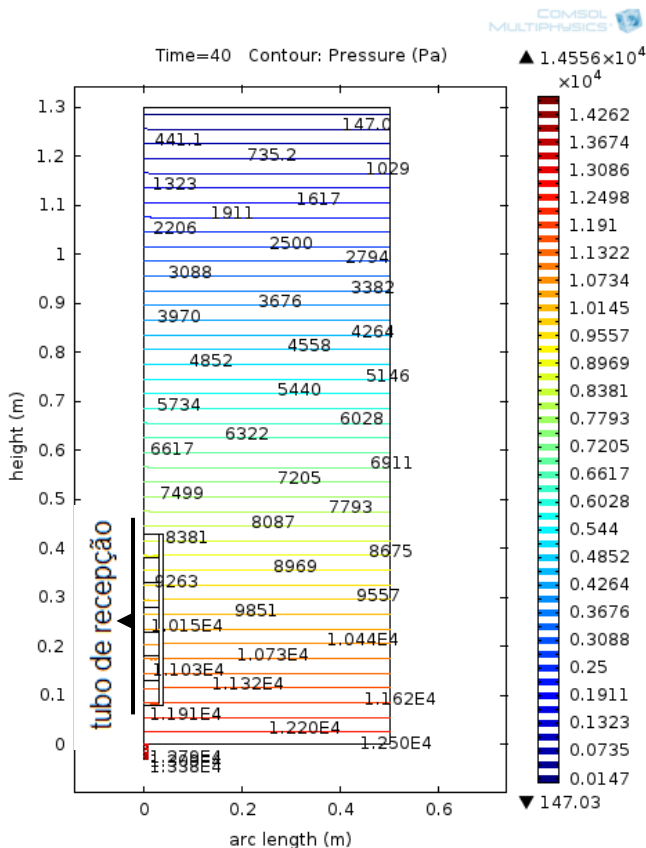
Figura 55: Destaque das linhas b2 (linha 7) e linha b7 (linha 17).



Fonte: Autor.

A Figura 56 abaixo mostra isovalores da variação da pressão ao longo do domínio de cálculo obtidos no *COMSOL*:

Figura 56: Variação (Δ) de pressão ao longo do domínio de cálculo do COMSOL.



Fonte: Autor.

4.3.2.1 Estudo dos perfis de velocidade no bocal de coleta

As próximas três Figuras (57, 58, e 59) a seguir mostram o resultado do perfil de velocidade obtido no *Mathematica* em relação ao mesmo perfil obtido no *COMSOL* (linha b8) na velocidade de 0,35 m/s para todos os diâmetros dos tubos de recepção de óleo do estudo.

Há uma diferença sutil nos resultados dos dois programas, como já foi comentado anteriormente, devido ao *COMSOL* possuir maior complexidade, leva em consideração mais fatores nos cálculos. Para que os valores do *Mathematica* fossem mais próximos dos encontrados no

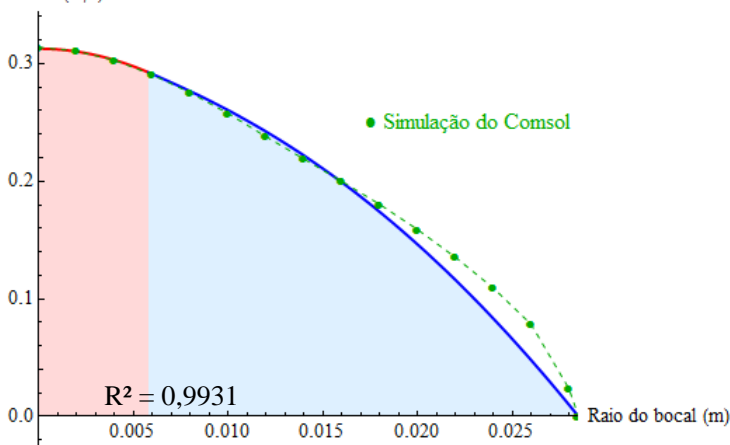
COMSOL, foi ajustado o valor de raio do jato de óleo que está passando pelo tubo, que é diferente do diâmetro de injeção. Para as velocidades de 0,35, 0,7 e 1,05 m/s foram utilizados valores médios de raio do jato de 0,53, 0,85 e 0,98 cm respectivamente baseados nos valores da Tabela 4.

O perfil de pontilhado verde se refere ao perfil retirado da linha b8, que foi destacado com uma flecha preta nos gráficos do *COMSOL*, mostrados anteriormente na seção 4.3.1.1.

A região vermelha dos gráficos corresponde ao raio do jato de óleo e a região azul, a coluna de água.

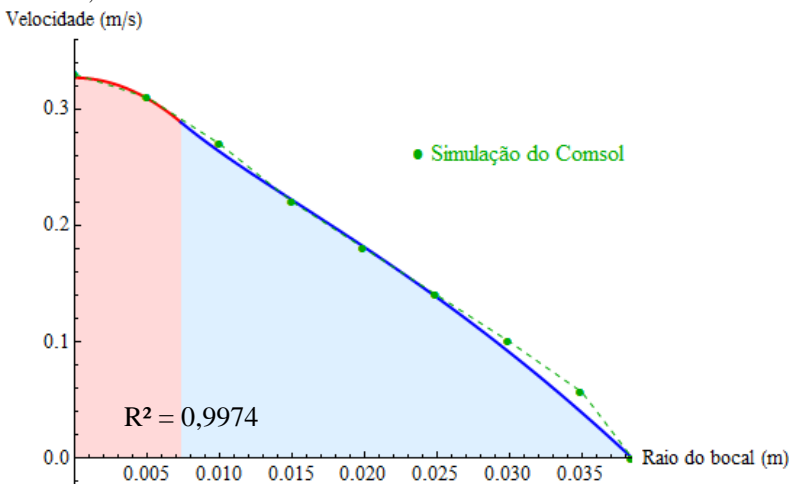
Figura 57: Perfil de velocidade na velocidade de 0,35 m/s para o diâmetro do tubo de 5,7cm.

Velocidade (m/s)



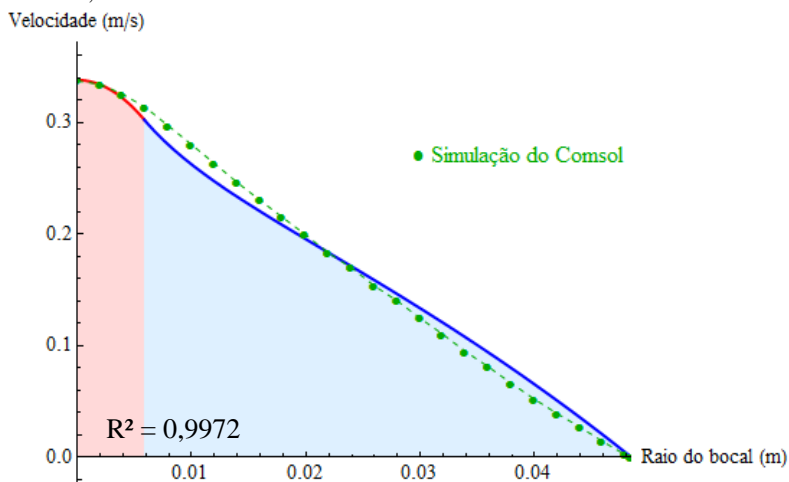
Fonte: Autor.

Figura 58: Perfil de velocidade na velocidade de 0,35 m/s para o diâmetro do tubo de 7,7cm.



Fonte: Autor.

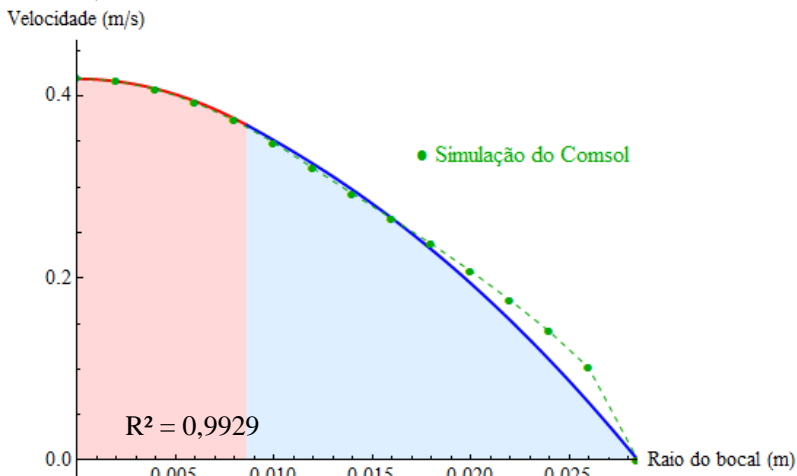
Figura 59: Perfil de velocidade na velocidade de 0,35 m/s para o diâmetro do tubo de 9,7cm.



Fonte: Autor.

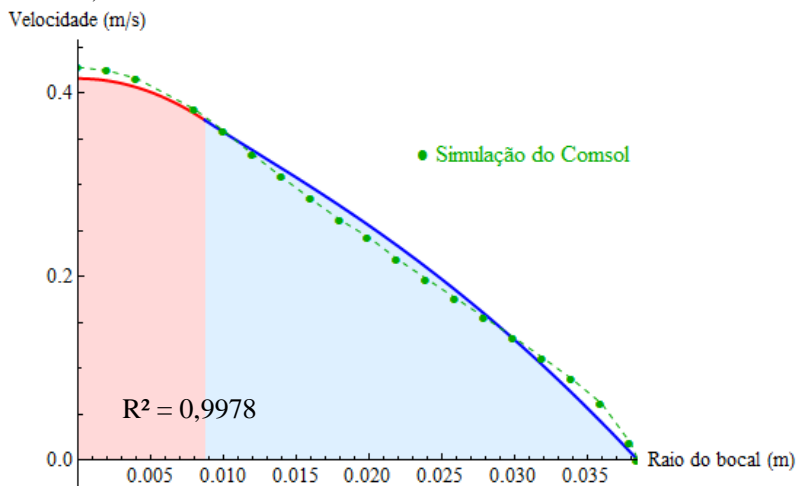
As próximas três Figuras (60, 61, e 62) a seguir mostram o mesmo comparativo na velocidade de 0,7 m/s para todos os diâmetros dos tubos de recepção de óleo do estudo.

Figura 60: Perfil de velocidade na velocidade de 0,7 m/s para o diâmetro do tubo de 5,7cm.



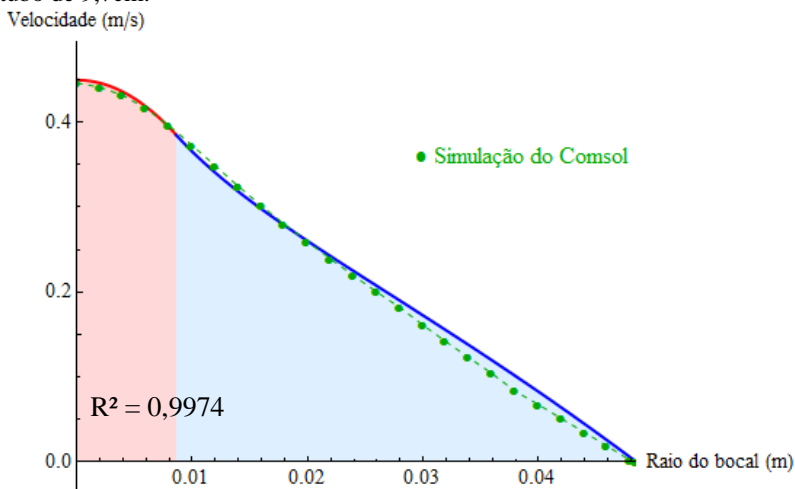
Fonte: Autor.

Figura 61: Perfil de velocidade na velocidade de 0,7 m/s para o diâmetro do tubo de 7,7cm.



Fonte: Autor.

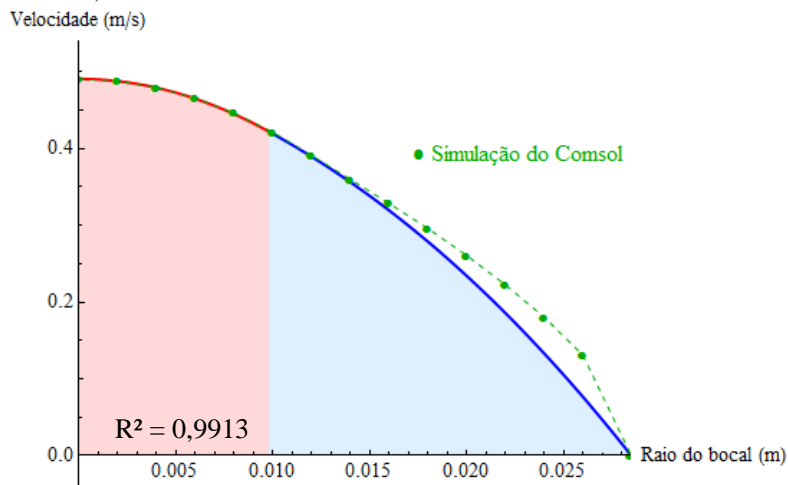
Figura 62: Perfil de velocidade na velocidade de 0,7 m/s para o diâmetro do tubo de 9,7cm.



Fonte: Autor.

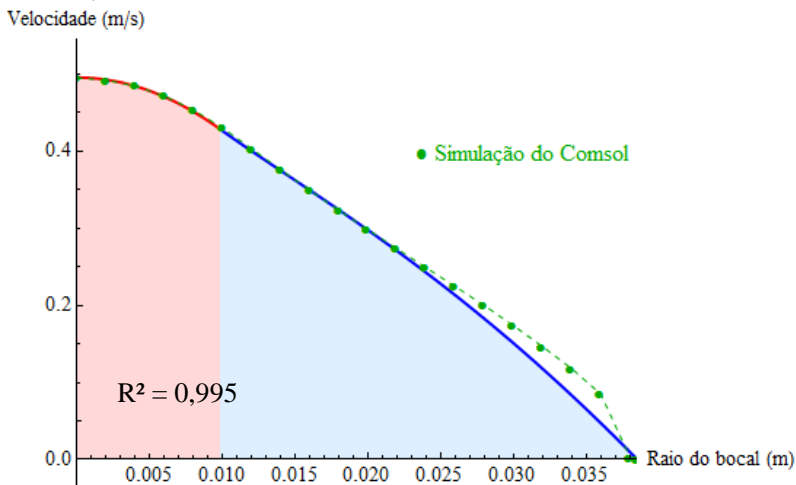
As próximas três Figuras (63, 64, e 65) a seguir mostram o comparativo na velocidade de 1,05 m/s para todos os diâmetros dos tubos de recepção de óleo do estudo.

Figura 63: Perfil de velocidade na velocidade de 1,05 m/s para o diâmetro do tubo de 5,7cm.



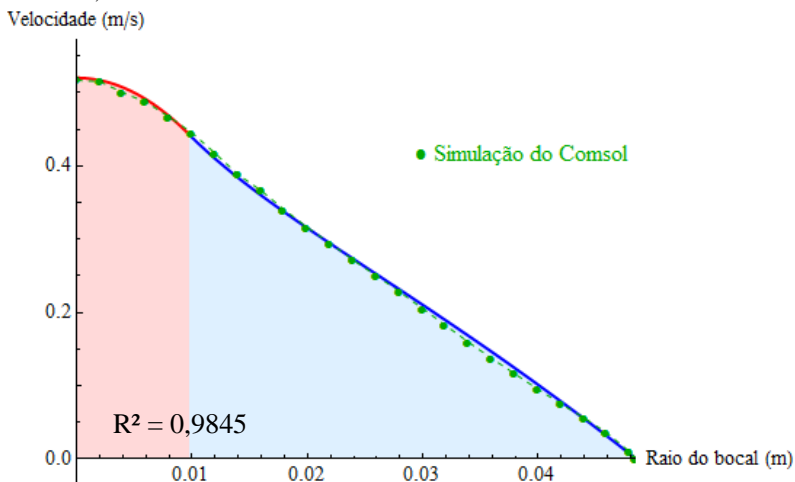
Fonte: Autor.

Figura 64: Perfil de velocidade na velocidade de 1,05 m/s para o diâmetro do tubo de 7,7cm.



Fonte: Autor.

Figura 65: Perfil de velocidade na velocidade de 1,05 m/s para o diâmetro do tubo de 9,7cm.



Fonte: Autor.

De uma forma geral, pode-se dizer que o modelo simplificado pôde ser satisfatoriamente ajustado aos resultados de simulação do *COMSOL*, com um coeficiente de determinação (R^2) muito próximo de

1, significando que as curvas dos perfis de velocidade obtidos no *Mathematica* se ajustam aos resultados obtidos com o modelo do *COMSOL*.

O R^2 utiliza o Método dos Mínimos Quadrados, que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (BUSSAB, 1986). Na prática, o R^2 é uma medida de qualidade de um modelo em relação a qualidade de estimar corretamente os valores de uma variável resposta (resultados do *Mathematica*). Isso significa que nos resultados obtidos, para o caso onde houve injeção de óleo a 1,05 m/s e um diâmetro de tubo de 9,7 cm (Figura 65), por exemplo, 98,45% da variância do perfil de velocidade obtido no *Mathematica* é explicada pela variância do *COMSOL*.

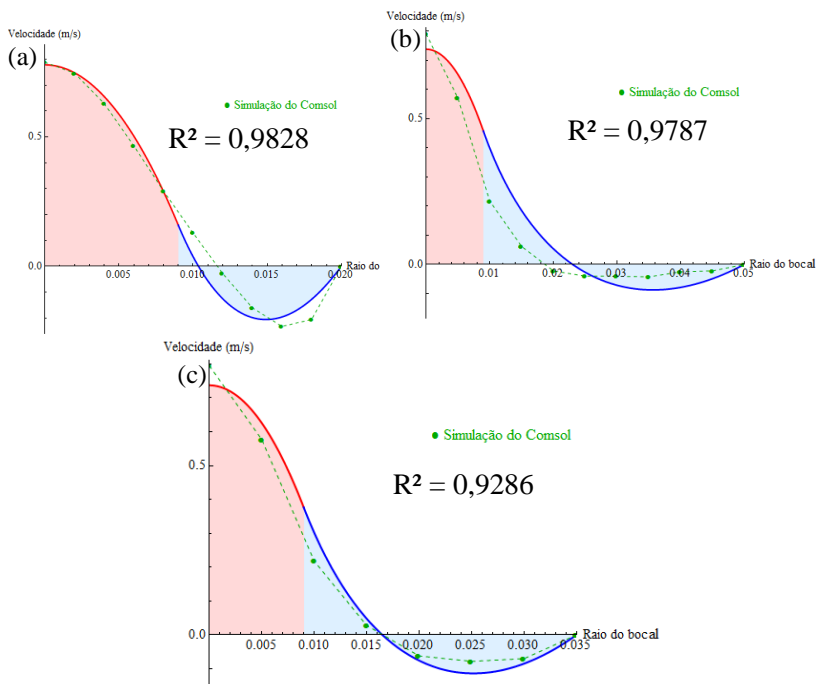
Por outro lado, os gradientes elevados de velocidade de ascensão na direção do raio junto à parede do tubo não puderam ser bem representados pelo modelo simplificado. De fato, os efeitos de entrada e do escoamento do lado de fora do tubo não são considerados na abordagem simplificada, o que pode ser o motivo para tais discrepâncias.

4.3.3 Estudo dos perfis de velocidade no bocal de coleta com contra fluxo de água

Quando a fase de desdobramento do balão finaliza, passa a ocorrer o enchimento gradativo do mesmo com óleo que passa a desalojar a água que entrou no momento em que se deu a abertura do balão. A partir de então ocorre a inversão do fluxo de água, com alteração do padrão de escoamento no interior do bocal de recepção.

As Figuras 66a, 66b e 66c comparam os perfis de velocidades obtidos no *COMSOL* e ajustados no modelo simplificado no interior de tubos de recepção com 4,0 cm, 7,0 cm e 10,0 cm de diâmetro para velocidade de injeção de 0,7 m/s.

Figura 66: Perfis de velocidade para tubos com 0,4 cm (a), 0,7 cm (b) e 10,0 cm na velocidade de injeção de óleo de 0,7 m/s com contra fluxo de água.



Fonte: Autor.

Nesses casos havendo contra fluxo de água, também se pode dizer que o modelo simplificado pôde ser satisfatoriamente ajustado aos resultados de simulação do *COMSOL*, com um coeficiente de determinação (R^2) muito próximo de 1, representando que as curvas dos perfis de velocidade obtidos no *Mathematica* se ajustam aos resultados obtidos com o modelo do *COMSOL*.

Segundo o modelo simplificado, percebe-se que, para um mesmo raio da coluna de óleo (região vermelha), quanto maior o raio do tubo maior o grau de recirculação da água, podendo ser discernido na região azul pela porção positiva de velocidades ascendentes passando pelo zero para a porção negativa descendente da água que sai do tubo de recepção. Uma vez mais, devido aos efeitos de extremidades não considerados no modelo simplificado, as simulações no *COMSOL* não puderam ser reproduzidas com perfeição. No entanto, os perfis de velocidade aproximados são suficientemente corretos para estimativas operacionais

e fenomenológicas do que se passa no bocal de recepção de óleo.

4.3.4 Vazões arrastadas de água nos dois modelos

O aumento na velocidade de injeção de óleo produz um aumento no volume de água arrastada para um mesmo diâmetro de tubo testado. Para uma dada velocidade do jato de óleo, quanto maior o diâmetro do tubo, maior é o volume de água arrastada. Dessa forma, se o dimensionamento do bocal de recepção de óleo for maior que o necessário, haverá um deslocamento desnecessário de água para o aparato de armazenamento submerso.

Ao considerar os valores da razão entre as vazões água/óleo, constatou-se que quanto maior a velocidade do jato de óleo que ascende no tubo, menor é o volume de água arrastada com relação ao volume de óleo coletado. Portanto, a operação de captura de um jato na etapa de abertura do balão teria condições mais favoráveis com maior velocidade do jato e menor diâmetro do bocal. Na prática, em caso de vazamento, a velocidade do jato de óleo dificilmente pode ser controlada, sendo apenas o diâmetro do tubo de coleta e a sua distância do ponto de vazamento fatores manipuláveis. Considerando que no modelo o tubo representa o bocal de recepção de óleo, o volume de água arrastada para dentro do dispositivo de coleta tenderá a ser maior à medida que se aumenta o diâmetro do referido bocal. Dessa maneira, o dimensionamento de um bocal com diâmetro muito maior de que o diâmetro do jato poderia gerar um deslocamento de água desnecessário no processo de captura do óleo.

As Tabelas 8 e 9 abaixo mostram os valores de vazão (Q) de óleo e água arrastada e a razão entre elas no modelo simplificado implementado no *Mathematica* e no *COMSOL*:

Tabela 8: Vazões (Q) de água e óleo através do tubo para as diferentes velocidades de injeção de óleo no *Mathematica*.

Vel. de injeção óleo (m/s)	0,35			0,7			1,05		
Diâmetro tubo (cm)	5,7	7,7	9,7	5,7	7,7	9,7	5,7	7,7	9,7
Q óleo (L/s)	0,032	0,038	0,034	0,092	0,093	0,097	0,137	0,139	0,143
Q água arrastada (L/s)	0,342	0,560	0,817	0,407	0,733	1,024	0,462	0,824	1,215
Razão Q (a/o)	10,69	14,69	23,74	4,410	7,836	10,57	3,353	5,895	8,496
Q Total (L/s)	0,374	0,598	0,851	0,500	0,827	1,121	0,599	0,964	1,358

Fonte: Autor.

Tabela 9: Vazões (Q) de água e óleo através do tubo para as diferentes velocidades de injeção de óleo no *COMSOL*.

Vel. de injeção óleo (m/s)	0,35			0,7			1,05		
Diâmetro tubo (cm)	5,7	7,7	9,7	5,7	7,7	9,7	5,7	7,7	9,7
Q óleo (L/s)	0,058	0,057	0,058	0,162	0,162	0,163	0,174	0,174	0,174
Q água arrastada (L/s)	0,347	0,571	0,757	0,421	0,737	0,944	0,490	0,896	1,489
Razão Q (a/o)	5,998	10,04	12,98	2,603	4,545	5,807	2,812	5,144	8,546
Q Total (L/s)	0,405	0,628	0,815	0,583	0,899	1,107	0,664	1,071	1,664

Fonte: Autor.

Percebe-se que ao se ajustar o modelo simplificado as vazões de óleo são sempre algo menores do que as produzidas nas simulações do *COMSOL*. Isto determina valores de razão água/óleo sensivelmente diferentes entre um modelo e outro, salvo para a velocidade de injeção de óleo de 1,05 m/s quando os valores ficaram mais próximos. De qualquer modo, tanto um modelo quanto outro testifica a grande capacidade de arraste de água pelo deslocamento de um jato de óleo.

Esse arraste deve ser minimizado ao máximo para que a quantidade de água que entra no dispositivo de coleta seja o menor possível.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo fenomenológico de escoamento bifásico água/óleo em situações vazamento em águas profundas é crucial para que se tenha uma ideia do que possivelmente ocorrerá em um caso real. O próprio processo de refino de petróleo fraciona os hidrocarbonetos presentes no óleo, permitindo uma série de movimentos entre as fases separadas geridas pelas equações de escoamento multifásico.

O estudo de escoamento bifásico água/óleo para vazamentos em águas profundas é crucial para que se tenha uma ideia do que possivelmente ocorrerá em um caso real. Estudos têm sido desenvolvidos para que os processos de ascensão de óleo sob grandes pressões em alto mar e baixas temperaturas sejam compreendidos, com o intuito de tomar decisões adequadas no caso de vazamentos nessas condições.

Contudo, concluiu-se que muito ainda necessita ser pesquisado e compreendido para que situações reais de escoamentos de óleo sejam dominadas, tanto no âmbito da modelagem computacional, como experimental e operacional.

Fazendo um comparativo entre os balões testados, os que tiveram comportamento satisfatório foram o de plástico e o de nylon, pois tiveram uma abertura “natural” conforme foram preenchidos com óleo. Devido ao fato destes balões se abrirem à medida que o óleo entrava, os contra fluxos de água no bocal de captura foram pouco importantes, tornando a sua geometria mais próxima do que se espera na realidade.

Um balão com paredes flexíveis como látex não está descartado, pode ser que em grandes profundidades, com grandes volumes de óleo, a expansão de um balão desse tipo aconteça.

Os estudos realizados ajudaram a compreender como será o comportamento de um jato regular de óleo que deverá encher um balão que de início se encontra dobrado. Estudos considerando a ampliação de escala serão indispensáveis para o desenvolvimento de um equipamento com a função de fazer a referida coleta de óleo.

A similaridade entre as observações experimentais e os resultados do modelo, além da observância dos critérios de estabilidade, convergência numérica e unicidade da solução, permitem atribuir a esse modelo a capacidade de representar adequadamente a liberação do óleo a partir do tubo de recepção.

6 SUGESTÕES

- Estudar incremento salinidade e variação de temperatura nos experimentos para estudar as possíveis alterações fluidodinâmicas;
- Testar balões maiores para o estudo da amplificação das forças envolvidas no sistema;
- Realizar um controle operacional dos experimentos para coletar dados precisos e poder compará-los/utilizá-los em novas simulações;
- Experimentar outras dobraduras nos balões que visem facilitar o desdobramento e minimização de contra fluxos e preenchimento com água;
- Desenvolver estratégias para casos de vazamentos de longa duração.

7 REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, R. M., R. A. FRANCISCO, et al. New Developments for the Description of Oil Leakages by Advective Migration From Submarine Pipelines. **Journal of pressure vessel technology**, v. 131, 17p., 2009.
- BARROS, E. V. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. **Engevista**, v. 9, 32p., 2010.
- BIRD, R. B., W. E. STEWART, et al. **Transport phenomena**. Nova York: 2002.
- BORDALO, S. N. and R. d. C. OLIVEIRA. Escoamento bifásico óleo-água com precipitação de parafinas em dutos submarinos de produção de petróleo. **PDPETRO**, v. 4, p. 11, 2007.
- BRADLEY, H. B. **Petroleum engineering handbook**. Society of Petroleum Engineers, 1987. 368
- BRASIL. Resolução CONAMA 269/2000.
- BRAUNER, N. and A. ULLMANN. Modeling of phase inversion phenomenon in two-phase pipe flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, p. 1177-1204, 2002.
- BUSSAB, W. d. O. **Análise de variância e de regressão**. São Paulo: Atual, 1986. 147p.
- CAHN, J. W. and J. E. HILLIARD. Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy. **The Journal of Chemical Physics**, v. 28, p. 258-267, 1958.
- CHEN, F. and P. D. YAPA. Three-Dimensional Visualization of multi-phase (oil/gas/hydrate) plumes. **Environmental Modelling & Software**, v. 19, p. 751-760, 2004.
- COMSOL (2013). COMSOL Multiphysics 4.3a Documentation.

COZIEN, H. and F. ANDRITSOS. The DIFIS system for removal of oil from shipwrecks-evaluation of operational conditions, survival conditions and system deployment. In, 2011. IEEE. p.1-8.

CROWE, C. T. **Multiphase flow handbook**. Danvers, Massachusetts: CRC Press, 2006. 1128p.

DELVIGNE, G. A. L. S., CE. Natural dispersion of oil. **Oil and Chemical Pollution**, v. 4, p. 281-310, 1988.

FAY, J. A. and D. P. HOULT. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. DTIC Document. p.21. 1971.

FELLER, R. **Estudo do vazamento e captura de óleo em ambiente subaquático**. (Mestrado). Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

FERNANDES, R. **Modelação de derrames de hidrocarbonetos**. (Graduação). Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Instituto Superior Técnico, Portugal. 2001.

FERREIRA, B. M. S. **Efeito da radiação micro-ondas sobre o desempenho desemulsificante de um polo (óxido de etileno-B-óxido de propileno) sobre emulsões de água em petróleo**. (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

FIGLIOLA, E. K. **Estudo experimental e de modelagem de fluidodinâmica de sistemas água/óleo**. 92p. (Mestrado). Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

GHANNAM, M. T. and O. CHAALAL. Oil spill cleanup using vacuum technique. **Fuel**, v. 82, p. 789-797, 2003.

GIRAULT, V. and P. A. RAVIART. Finite element approximation of the Navier-Stokes equations. **Lecture Notes in Mathematics, Berlin Springer Verlag**, v. 749, p. 208, 1979.

GOBIRA, A., F. N. GAZE, et al. **Principais propriedades e processos envolvidos no derrame de uma mancha de óleo em ambiente marinho**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2007. 28p.

GUSTAFSSON, B., B. Gustafsson, et al. **Conformal and potential analysis in Hele-Shaw cells**. Valparaíso: Springer, 2006. 189p.

HANSEM, E. B. and H. RASMUSSEN. A numerical study of unstable Hele-Shaw flow. **Computers & Mathematics With Applications**, v. 38, p. 217-230, 1999.

HUAI, W. and S. FANG. Rounded flowing states of obstructed buoyant jet. **Applied Mathematics and Mechanics**, v. 27, p. 1133-1139, 2006.
IRVINE, M. **Cable Structures**. Londres: MIT Press, 1981.

ITOPF. The international tanker owners pollution federation limited. 2007. Disponível em: < <http://www.itopf.com/> >. Acesso em: 18/02/2013.

KOBAYASHI, I., K. Uemura, et al. CFD analysis of generation of soybean oil-in-water emulsion droplets using rectangular straight-through microchannels. **Food Science and Technology Research**, v. 13, p. 187-192, 2007.

KUKRETI, A. R., F. CIVAN, et al. Finite element solution for flow of immiscible fluids in petroleum reservoirs. **Enhanced Oil Recovery II Processes and Operations**, v.3, p. 511-577, 1989.

MACKAY, D., I. A. Bruist, et al. **Oil spill processes and models**. Research and Development Division, Environmental Emergency Branch, Environmental Impact Control Directorate, Environmental Protection Service, Environment Canada, 1980.

MARIANO, G. C. **Estudo do escoamento imiscível água/óleo mediante experimentação em célula de Hele-Shaw e simulação CFD**. 85p. (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2008.

MIRANDA, J. Consequencias do vazamento de petróleo no Golfo do México. **Grupo Escolar** 2011. Disponível em: < <http://www.grupoescolar.com/pesquisa/consequencias-do-vazamento-de-petroleo-no-golfo-do-mexico.html> >. Acesso em: 30/01/2011.

MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. **Journal of Colloid Science**, v. 6, p. 162-170, 1951.

NAKAE, H., R. Inui, et al. Effects of surface roughness on wettability. **Acta materialia**, v. 46, p. 2313-2318, 1998.

NETO, J. M. **Acidente da Chevron: as mentiras de uma tragédia anunciada.**

2011. Disponível em: < <http://www.opiniaosustentavel.com.br/2011/11/acidente-da-chevron-as-mentiras-de-uma.html> >. Acesso em: 02 de Julho de 2012.

PAIVA, C. T. **Melhoria da qualidade da água em bacias de decantação localizada em área de extração de areia.** (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2004.

PALADINO, E. E. **Modelagem matemática e simulação numérica de trajetórias de derrames de petróleo no mar.** 110. (Mestrado). Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000.

RABOCKAI, T. Física química de superfícies. **Serie de química**, v. 20, 189p., 1979.

ROSEN, M. J. Surfactants and interfacial phenomena. v.4, 258p., 1989.

ROSSI, L. F. d. S. and R. E. MORALES. Modelagem matemática do escoamento de emulsão envolvendo água e óleo. **Instituto brasileiro de petróleo e gás**, v. 3, p. 9, 2004.

RUSANOV, A. I. and V. A. Prokhorov. **Interfacial tensiometry.** St. Petesburg: Elsevier Science, 1996.

SAFFMAN, P. G. and G. TAYLOR. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 245, p. 312-329, 1958.

SAFFMAN, P. G. and G. I. TAYLOR. The penetration of a fluid into a porous medium on Hele Shaw cell containing a more viscous liquid. In: (Ed.). **Society of Petroleum Eng J**. 1985. cap.2.

SANTOS, R. G. d., R. S. MOHAMED, et al. **Avaliação da molhabilidade de oleodutos através de medidas de ângulo de contato: efeitos de asfaltenos e ácidos naftênicos do petróleo**. 105p. (Mestrado). São Paulo. 2003.

SHAW, D. J. **Introduction to colloid and surface chemistry**. London: Butterworths, 1966. 306p.

SILVA, L. **Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre**. (Doutorado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SOUSA, P. É., S. R. B. Araujo, et al. Métodos de recuperação secundária convencionais. **Cadernos de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas (ISSN 1980-1777)**, v. 12, p. 13, 2010.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. **Editora Interciência**, v. 2, p. 200-207, 2001.

TOWLER, B. F. Fundamental principles of reservoir engineering. **Recherche**, v. 67, p. 02, 2002.

UOL. How stuff works? **Quantos litros de gasolina os EUA consomem por ano?**

2007. Disponível em: < <http://carros.hsw.uol.com.br/questao417.htm> >. Acesso em: 02 de Julho de 2012.

VENTURI, J. J. **Cônicas e Quadricas**. Curitiba: 2003.

WANG, Z. and M. FINGAS. Study of the effects of weathering on the chemical composition of a light crude oil using GC/MS GC/FID. **Journal of Microcolumn Separations**, v. 7, p. 617-639, 1995.

WÖRNER, M. **A compact introduction to the numerical modeling of multiphase flows**. Forschungszentrum Karlsruhe, 2003.

YAPA, P. D., L. ZHENG, et al. Modeling Underwater Oil/Gas Jets and Plumes. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, p. 481, 1999.

YUE, P., C. Zhou, et al. Phase-field simulations of interfacial dynamics in viscoelastic fluids using finite elements with adaptive meshing. **Journal of Computational Physics**, v. 219, p. 47-67, 2006.

ZIENKIEWICZ, O. C., R. L. TAYLOR, et al. The finite element method: its basis and fundamentals. v.6, p. 733, 2005.

